



УДК 669.187.526.001.5

## ТИТАНОВЫЕ СПЛАВЫ ДЛЯ АВИАЦИОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ УКРАИНЫ

С. Л. Антонюк, А. Г. Моляр, А. Н. Калинюк, В. Н. Замков

Исследовано распределение легирующих элементов и примесей по длине и сечению слитков диаметром 400 мм из титановых сплавов марок VT6, VT22, T-110, полученных методом электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью (ЭЛПЕ). Изучены макро- и микроструктура поковок этих сплавов. Определены механические свойства сплавов после деформации и термической обработки.

Distribution of alloying elements and impurities in length and section of 40 mm diameter ingots from titanium alloys of VT6, VT22, T-110 grades, produced by the method of electron-beam melting with an intermediate crucible (EBMC) is investigated. Macro- and microstructures of forgings from these alloys are examined. Mechanical properties of alloys after deformation and heat treatment are determined.

**Ключевые слова:** титановые сплавы; химический состав; распределение легирующих элементов; полуфабрикаты; макро- и микроструктура; механические свойства.

Как известно, применение титановых сплавов в самолетостроении обусловлено их высокой удельной прочностью, коррозионной стойкостью, особенностями теплофизических свойств титана. В конструкциях самолетов «АН» масса деталей из титановых сплавов в настоящее время составляет 8... 9 % массы деталей планера. Это, прежде всего, подкосы и силовые цилиндры шасси, вилки, кронштейны системы управления, силовые детали механизации крыла, грузовые дорожки настила, трубопроводы, компенсаторы, теплообменники и др. элементы.

Эффективность и надежность в эксплуатации деталей и узлов из титановых сплавов во многом определяется чувствительностью их механических свойств к отклонениям технологических параметров в процессе обработки. Это относится не только к технологии изготовления тех или иных деталей и узлов, но в значительной степени к технологии производства полуфабрикатов. Так, например, долговечность деталей шасси из сплава VT22 при малоцикловых испытаниях колеблется в пределах 17783... 110880 циклов в зависимости от качества полуфабрикатов, в частности, от наличия в металле заготовки неметаллических включений. Поэтому для более широкого использования титановых сплавов в авиационных конструкциях необходимо не только создавать новые материалы на основе титана с более высокими эксплуатационными характери-

стиками, но и в дальнейшем совершенствовать производство титановых полуфабрикатов. При этом следует отметить, что такие дефекты полуфабрикатов титановых сплавов, как неоднородность химического состава и структуры, включения высокой и низкой плотности, повышенное содержание газовых примесей (кислорода, азота и водорода) закладываются в металл уже на стадии выплавки слитка и сохраняются в нем при всех дальнейших переделах [1–7]. Причем, если включения в слитках титановых сплавов образуются в результате загрязнения шихтовых материалов, то возникновение химической неоднородности и увеличение концентрации примесей в металле (по сравнению с их содержанием в шихте) обусловлены особенностями вакуумно-дуговой плавки (ВДП) — основного промышленного способа производства титановых слитков [4–6].

Эффективным способом предупреждения образования указанных дефектов в литом металле является электронно-лучевая плавка с промежуточной емкостью (ЭЛПЕ) [8–11]. Это обусловлено тем, что ЭЛПЕ осуществляется при более высоком, чем ВДП, вакууме и в процессе плавки не происходит заметного насыщения металла газовыми примесями. При ЭЛПЕ расплавленный титан длительное время находится в жидком состоянии, что способствует его дегазации (удалению водорода) и выравниванию химического состава. Одновременно с дегазацией жидкого металла происходит его рафинирование от инородных частиц большой и малой плотности, которые при отсутствии промежуточной

© С. Л. АНТОНЮК, А. Г. МОЛЯР, А. Н. КАЛИНЮК, В. Н. ЗАМКОВ, 2003



**Таблица 1. Распределение легирующих элементов и примесей по длине слитков титановых сплавов, полученных ЭЛПЕ**

Марка сплава	Место отбора пробы	Содержание, % мас								
		Al	Mo	V	Nb	Fe	Cr	Zr	O	N
BT6	Верх	6,37	–	4,05	–	0,13	–	–	0,09	0,026
	Середина	6,32	–	4,27	–	0,15	–	–	0,11	0,024
	Низ	6,45	–	4,18	–	0,18	–	–	0,09	0,026
Гост 19807–91		5,3... 6,8	–	3,5... 5,3	–	< 0,3	–	–	< 0,2	< 0,05
BT22	Верх	5,17	4,30	4,90	–	0,95	1,44	–	0,11	0,012
	Середина	5,23	4,67	5,13	–	1,03	1,32	–	–	–
	Низ	5,13	4,31	5,10	–	1,01	1,35	–	–	–
Гост 19807–91		4,4... 5,9	4,0... 5,5	4,0... 5,5	–	0,5... 1,5	0,5... 2,0	< 0,3	< 0,2	< 0,05
T-110 (условная марка)	Верх	5,47	1,03	1,33	5,04	1,62	–	0,36	0,09	0,02
	Середина	5,29	1,10	1,48	5,32	1,60	–	0,35	–	–
	Низ	5,35	1,16	1,37	4,93	1,58	–	0,32	–	–
Временные ТУ		5,0... 6,0	1,0... 1,5	1,2... 2,0	4,5... 5,5	1,5... 2,0	–	0,3... 0,5	< 0,15	< 0,04

**Таблица 2. Распределение легирующих элементов по сечению слитков титановых сплавов, полученных ЭЛПЕ**

Марка сплава	Часть слитка	Место отбора пробы*	Содержание, % мас						
			Al	Mo	V	Nb	Fe	Cr	Zr
BT6	Верхняя	О	6,28	–	4,19	–	–	–	–
		С	6,39	–	3,87	–	–	–	–
		П	6,35	–	3,96	–	–	–	–
	Средняя	О	6,41	–	3,91	–	–	–	–
		С	6,30	–	4,15	–	–	–	–
		П	6,36	–	4,25	–	–	–	–
	Нижняя	О	6,53	–	4,03	–	–	–	–
		С	6,72	–	4,14	–	–	–	–
		П	6,48	–	4,18	–	–	–	–
BT22	Верхняя	О	5,21	4,32	4,85	–	0,92	1,40	–
		С	5,12	4,26	4,95	–	0,90	1,42	–
		П	5,25	4,33	5,07	–	1,03	1,50	–
	Средняя	О	5,20	4,41	5,13	–	1,0	1,39	–
		С	5,11	4,59	5,21	–	1,05	1,35	–
		П	5,14	4,73	5,10	–	1,04	1,28	–
	Нижняя	О	5,16	4,42	5,13	–	1,02	1,32	–
		С	5,08	4,18	5,06	–	1,0	1,39	–
		П	5,16	4,23	5,10	–	1,01	1,33	–
T-110	Верхняя	О	5,48	1,02	1,18	5,32	1,63	–	0,40
		С	5,52	1,01	1,41	4,91	1,61	–	0,35
		П	5,57	1,06	1,40	5,02	1,60	–	0,33
	Средняя	О	5,45	1,02	1,50	5,45	1,58	–	0,37
		С	5,30	1,12	1,49	5,26	1,60	–	0,31
		П	5,14	1,14	1,45	5,27	1,61	–	0,37
	Нижняя	О	5,54	1,01	1,42	4,98	1,59	–	0,32
		С	5,43	1,12	1,39	4,78	1,69	–	0,34
		П	5,21	1,31	1,33	4,84	1,47	–	0,30

\*О – вблизи оси слитка; С – вблизи середины радиуса; П – в периферийной зоне (~ 10 мм от поверхности слитка).

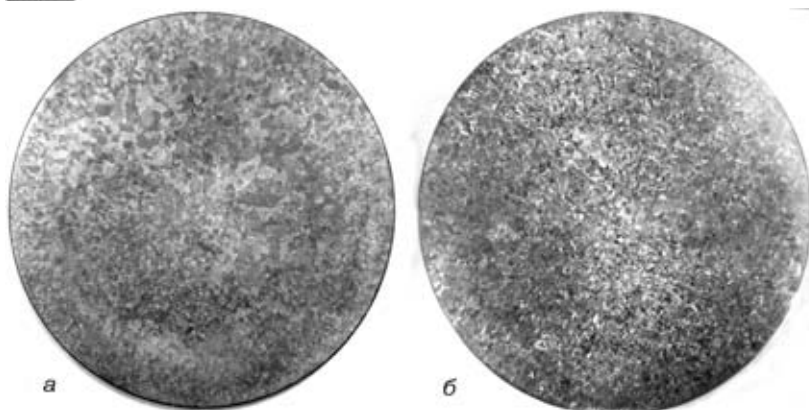


Рис. 1. Макроструктура поперечного сечения слитков диаметром 400 мм из сплавов BT22 (а) и Т-110 (б)

емкости образуют включения в закристаллизовавшемся слитке. Таким образом, ЭЛПЕ позволяет значительно повысить качество титановых слитков [9–12]. Однако при этом существует проблема получения слитков заданного химического состава, так как плавка в относительно глубоком вакууме способствует избирательному испарению легирующих элементов с высокой упругостью пара [12, 13]. Поэтому промышленные электронно-лучевые установки используются преимущественно для производства слитков технического титана [6, 8] и слитков первого передела из титановых сплавов, которые являются электродами для последующей плавки в вакуумно-дуговых печах [10, 11].

Актуальной является задача промышленного производства слитков титановых сплавов исключительно методом ЭЛПЕ и соответствующие исследования ведутся как у нас в стране, так и за рубежом [12, 14]. Их положительный результат особенно важен для аэрокосмического комплекса Украины, так как наша металлургическая промышленность не имеет вакуумно-дуговых печей для плавки титана.

Теоретические и экспериментальные работы, выполненные в Институте электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, были направлены на получение слитков высоколегированных сплавов титана методом ЭЛПЕ. Они представляли собой комплекс исследований, включающий математическое моделирование испарения легирующих элементов в зависимости от параметров ЭЛПЕ и статистический анализ результатов экспериментальных плавки. Так, была установлена количественная взаимосвязь

потерь легирующих элементов, в первую очередь алюминия, от режимов плавки, типа шихты, химического состава выплавляемого сплава. На основании полученных зависимостей были созданы технологические карты ЭЛПЕ титановых сплавов. Их использование при шихтовке и выборе параметров процесса плавки обеспечивает заданный химический состав металла слитка. Помимо этого, изучали влияние различных способов шихтовки на равномерность распределения легирующих элементов по длине слитка. Была разработана схема и специальная оснастка для непрерывной подачи легирующих элементов в шихту (в заданном количестве) по мере ее плавления. Применение этой техники легирования обеспечивает равномерное распределение легирующих элементов как вдоль слитка, так и по его сечению.

В качестве примеров в табл. 1 и 2 показано распределение легирующих элементов по длине и поперечному сечению слитков диаметром 400 мм из сплавов титана двух марок, широко применяемых в конструкциях самолетов «АН» — BT6 (Ti–6Al–4V) и BT22 (Ti–5Al–5Mo–5V–1Cr–1Fe), а также слитка опытного высокопрочного многокомпонентного сплава Т-110 (условная марка), который создан специалистами ИЭС им. Е.О. Патона и АНТК им. Антонова и является первым отечественным титановым сплавом. Приведенные данные подтверждают, что разработанная технология ЭЛПЕ обеспечивает достаточно равномерное распределение легирующих элементов по объему слитков титановых сплавов. Так, например, разность между максимальной и минимальной концентрацией алюминия в металле слитков (табл. 1 и 2) не превышает 0,25 % мас. Это почти в 4 раза меньше, чем в слитках сплава Ti–6Al–4V, полученных методом ЭЛПЕ в работе [14]. Следует отметить, что и в приповерхностных слоях слитков ВДП концентрация алюминия обычно на 1,0...1,5 % мас. больше, чем в их центральной части [4, 5].

Исследования макро- и микроструктуры металла слитков подтвердили высокую эффективность ЭЛПЕ с точки зрения предупреждения образования

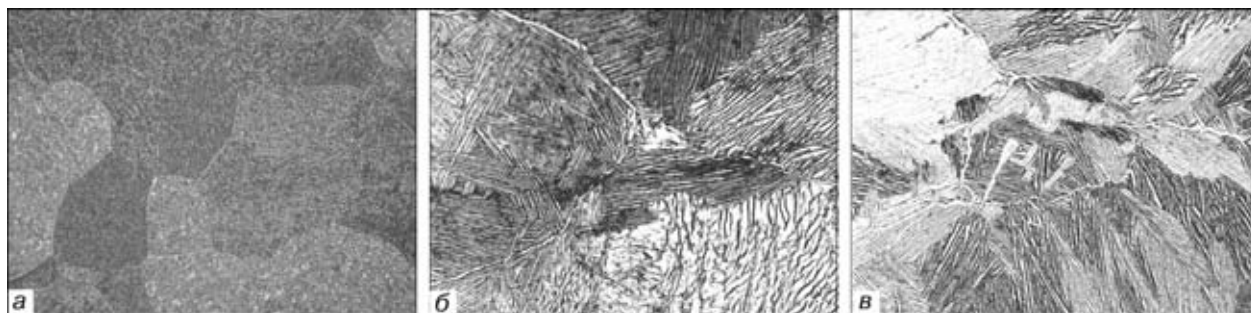


Рис. 2. Микроструктура (х 400) поковок из сплавов BT22 (а), Т-110 (б) и BT6 (в)

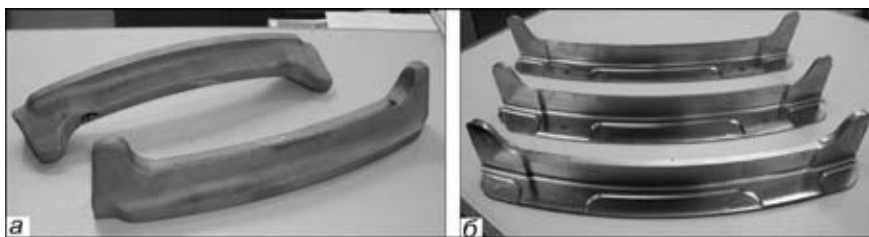


Рис. 3. Штамповки, изготовленные из слитков титановых сплавов ЭЛПЕ до (а) и после (б) механической обработки

ва Т-110, полученный ЭЛПЕ, на плиты толщиной 50 мм. Ковка слитков сплавов ВТ6 и ВТ22 осуществлялась по промышленной технологии [15]. Ковку слитка сплава Т-110 начинали при температуре 1050 °С (в β-области) и заканчивали при 850 °С (в α+β-области). Степень деформации за один нагрев составляла 30...40 %. Величина зерна макроструктуры металла

включений. Ни в опытных слитках, которые подвергались детальному изучению, ни в полуфабри-

Таблица 3. Механические свойства полуфабрикатов из слитков сплавов ВТ6 и ВТ22, полученных различными методами

Сплав	Вид заготовки	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	KCV, Дж/см <sup>2</sup>
ВТ6 (ВДП)	Поковка, диаметр 80 мм	<u>972...998</u> 985	<u>916...932</u> 927	<u>10...15</u> 12	<u>34...39</u> 36	<u>30...35</u> 32
	Штамповка	<u>1040...1060</u> 1054	<u>960...978</u> 965	<u>12...16</u> 14	<u>36...41</u> 38	<u>33...38</u> 34
ВТ6 (ЭЛПЕ)	Поковка, диаметр 80 мм	<u>954...979</u> 970	<u>893...918</u> 905	<u>14...18</u> 15	<u>39...47</u> 42	<u>39...43</u> 40
	Штамповка	<u>1005...1021</u> 1012	<u>958...964</u> 961	<u>14...17</u> 15	<u>44...49</u> 46	<u>41...48</u> 45
ВТ22 (ВДП)	Поковка, диаметр 70 мм	<u>1150...1180</u> 1163	<u>1070...1100</u> 1085	<u>12...17</u> 14	<u>46...49</u> 47	<u>23...28</u> 24
	Штамповка	<u>1176...1190</u> 1180	<u>1120...1139</u> 1128	<u>15...18</u> 17	<u>42...50</u> 45	<u>27...32</u> 29
ВТ22 (ЭЛПЕ)	Поковка, диаметр 70 мм	<u>1178...1216</u> 1189	<u>1100...1124</u> 1106	<u>13...16</u> 14	<u>43...47</u> 44	<u>22...30</u> 25
	Штамповка	<u>1175...1220</u> 1195	<u>1096...1118</u> 1110	<u>16...19</u> 17	<u>45...49</u> 47	<u>24...31</u> 27

Примечание. Над чертой приведены минимальные и максимальные значения, под чертой — средние.

катах из серийных промышленных слитков включения высокой и низкой плотности не обнаружены.

В слитках, полученных ЭЛПЕ, отсутствуют протяженные столбчатые кристаллиты. Их макроструктура состоит из равноосных или слегка вытянутых в направлении теплоотовода полиэдрических β-зерен (рис. 1). Соотношение длины и ширины вытянутых зерен находится в пределах 1,5...3,0. В литом металле отсутствуют дефекты в виде раковин и пор.

Слитки сплавов ВТ6 и ВТ22, выплавленные обоими методами, были подвергнуты ковке на прутки диаметром соответственно 80 и 70 мм, а слиток спла-

воковки соответствовала 4–5 баллу 10-балльной шкалы макроструктур для титановых сплавов [16], а микроструктура — 6-му типу шкалы микроструктур (рис. 2). Это полностью отвечает отраслевым требованиям авиационной промышленности, предъявляемым к структуре титановых полуфабрикатов.

Из всех поковок изготавливали однотипные штамповки для самолета «АН» (рис. 3). В табл. 3 и 4 приведены механические свойства кованых заготовок и полученных из них штамповок. Эти данные позволяют сделать вывод, что механические свойства полуфабрикатов из сплавов ВТ6 и ВТ22

Таблица 4. Механические свойства полуфабрикатов из титанового сплава Т-110

Сплав	Вид заготовки	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	KCV, Дж/см <sup>2</sup>
Т-110 (ЭЛПЕ)	Поковка	<u>1071...1099</u> 1085	<u>1034...1047</u> 1038	<u>16...19</u> 17	<u>38...41</u> 39	<u>39...42</u> 40
	Штамповка	<u>1165...1180</u> 1173	<u>1124...1145</u> 1130	<u>20...23</u> 21	<u>49...53</u> 51	<u>28...31</u> 29

Примечания: 1. Над чертой приведены минимальные и максимальные значения, под чертой — средние; 2. Термическая обработка проводилась по режимам: для поковки — нагрев 780 °С ± 10 °С, выдержка 2 ч, охлаждение на воздухе; для штамповки — нагрев 870 °С ± 10 °С, выдержка 0,5 ч, охлаждение с печью до 800 °С ± 10 °С, выдержка 15 мин, охлаждение с печью до 750 °С, выдержка 1 ч, охлаждение на воздухе, нагрев до 380 °С, выдержка 8 ч, нагрев до 570 °С, выдержка 2 ч, охлаждение на воздухе.



полностью соответствуют требованиям стандартов независимо от метода выплавки слитков.

Следует отметить, что сплав Т-110 является опытным. Цель, которая ставилась при его создании, — разработка хорошо свариваемого высокопрочного титанового сплава для тяжело нагруженных деталей и узлов аэрокосмической техники. Поэтому уже на начальных этапах исследований слитки из этого сплава выплавлялись исключительно методом ЭЛПЕ как наиболее перспективным, обеспечивающим отсутствие дефектов в литом металле. Предполагается, что в дальнейшем он заменит сплав ВТ22. Сравнение механических характеристик этих сплавов позволяет утверждать, что при фактически равной прочности пластичность сплава Т-110 выше.

Таким образом, выполненные исследования показали, что свойства полуфабрикатов, изготовленных из слитков, выплавленных по разработанной технологии ЭЛПЕ, отвечают всем требованиям, предъявляемым авиационной промышленностью к качеству титановых сплавов.

1. *Механизм образования включений при плавке слитков титановых сплавов в вакуумных дуговых печах* // Н. Ф. Аношкин, Е. И. Огинская, Г. С. Андреева и др. // 8-е науч.-техн. совещание по металлургии, металлосведению и применению титана и его сплавов: Тез. докл. — М.: ВИЛС, 1969. — 92 с.
2. *Влияние параметров вакуумной дуговой плавки слитков титановых сплавов на растворимость тугоплавких элементов* // Е. И. Огинская, Н. Ф. Аношкин, М. И. Мусатов и др. // Вакуумная дуговая плавка металлов и сплавов. Вып. 4-й. — М.: Металлургия, 1966. — С. 27–31.
3. *Уртьев В. П., Береславский А. Л. Влияние электрического режима плавки в вакуумной дуговой печи на растворимость тугоплавких частиц* // Там же. — С. 65–69.
4. *Аношкин Н. Ф. Исследование макронеоднородности слитков титановых сплавов* // Производство титановых спла-

вов: Матер. науч.-техн. совещания. — М.: ОНТИ-ВИАМ, 1961. — С. 15–20.

5. *Чучурюкин А. Д., Данилова Т. В., Павлов А. Г. Испарение алюминия при ВДП слитков титановых сплавов* // Технология легких сплавов: Науч.-техн. бюл. ВИЛСа. — 1975. — № 1. — С. 45–50.
6. *Адамс Р. Е., Розенберг Г. У. Затвердевание титановых слитков* // Титан (Металловедение и технология): Тр. 3-й Междунар. конф. по титану. Т.1. — М.: ВИЛС, 1977. — 485 с.
7. *The formation and removal of «Hard-Alpha» material during the melting of titanium alloys* // J-P.Bellor, S. Hans, E. Hess. et al. // Titanium'95. Science and Technology. V. 2: Mater. of the 8-th world conference on titanium, 22–26 October 1995, Birmingham, UK. — P. 1454–1462.
8. *Электронная плавка титана* / А. С. Ронжин, Б. Г. Соколов, Т. И. Зеленцов и др. // Применение титановых сплавов: Матер. 2-го науч.-техн. совещания. — М.: ОНТИ-ВИАМ, 1961. — С. 114–120.
9. *Clifford E. Shamblen. Titanium alloy hearth melt «only» technology development* // Titanium'95. Science and Technology. V. 2: Mater. of the 8-th world conference on titanium, 22–26 October 1995, Birmingham, UK. — P. 1438–1446.
10. *Buttrill W. H., Shamblen C. E. Hearth melt plus vacuum arc remelt: production status* // Ibid. — P. 1446–1454.
11. *Eldon Poulsen, William Chinnis, Matt Mede. Status of titanium cold hearth melting* // Titanium'99. Science and Technology. V. 3: Mater. of the 9-th world conference on titanium, 7–11 June, Saint-Petersburg, Russia. — P. 1328–1335.
12. *Paton B. E, Trigub N. P, Akhonin S. V. Electron beam melting of titanium* // Ibid. — P. 1373–1379.
13. *Испарение алюминия из сплавов на основе титана в процессе электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью* // И. Ю. Варич, С. В. Ахонин, Н. П. Тригуб и др. // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1997. — № 4. — С. 15–21.
14. *Wood J. R. Producing Ti-6Al-4V plate from single-melt EVCHM ingot* // JOM. — February 2002. — P. 56–58.
15. *Полуфабрикаты из титановых сплавов* / Под ред. Н. Ф. Аношкина. — М.: Металлургия, 1979. — 512 с.
16. *Металлография титановых сплавов* / Под ред. С. Г. Глазунова. — М.: Металлургия, 1980. — 464 с.

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

Поступила 12.12.2002

Министерство образования и науки Украины  
Национальная академия наук Украины  
Институт электросварки им. Е. О. Патона

## II Всеукраинская научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов «Сварка и смежные технологии»

Май 2003 г. Украина, г. Ворзель

### Тематика конференции

- Прогрессивные технологии сварки и соединения материалов
- Прочность, надежность и долговечность сварных конструкций
- Наплавка, нанесение покрытий и обработка поверхности
- Специальная электрометаллургия
- Новые конструкционные и функциональные материалы
- Техническая диагностика и неразрушающий контроль
- Автоматизация процессов сварки и родственных технологий
- Фундаментальные исследования физико-химических процессов

### Адрес оргкомитета

Украина, 03680, г. Киев, ул. Боженко, 11

E-mail: konferents@ua.fm

Http://paton.kiev.ua