



2. *Электронно-лучевая плавка титана* / Б. Е. Патон, Н. П. Тригуб, С. В. Ахонин, Г. В. Жук. — Киев: Наук. думка, 2006. — 248 с.
3. *Лесной А. Б., Демченко В. Ф., Жадкевич М. Л.* Моделирование гидродинамики и теплообмена при кристаллизации слитков электронно-лучевого переплава // Пробл. спец. электрометаллургии. — 2001. — №2. — С. 17-21.
4. *Тепловые процессы при электрошлаковом переплаве* / Б. И. Медовар, В. Л. Шевцов, Г. С. Маринский и др. — Киев: Наук. думка, 1978. — 304 с.
5. *Электронно-лучевая плавка крупных слитков сложнотермически обработанных сплавов с мелкозернистой структурой* / Д. А. Козлитин, Н. П. Тригуб, С. В. Ахонин, А. Я. Дереча // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1994. — №3-4. — С. 42-47.
6. *Термогидродинамическое состояние расплава при электронно-лучевом переплаве слитка титана* / Ж.-П. Белло, А. Жарди, С. Анс, Д. Аблизер // Там же. — 1997. — №3. — С. 3-18.
7. *Лесной А. Б., Демченко В. Ф.* Моделирование гидродинамики и массообмена при электронно-лучевом переплаве титановых сплавов // Современ. электрометаллургия. — 2003. — №3. — С. 19-23.
8. *Жук Г. В., Тригуб М. П., Калишок А. Н.* Влияние скорости охлаждения на структуру цилиндрических слитков ЭЛПЕ титанового сплава Ti-6Al-4V // Процессы литья. — 2003. — №4. — С. 79-82.
9. *Жук Г. В., Березос В. А., Тригуб Н. П.* Прогнозирование структуры титановых слитков-слябов, получаемых способом ЭЛПЕ // Современ. электрометаллургия. — 2005. — №3. — С. 28-30.
10. *Zhuk H. V., Kobryn P. A., Semiatin S. L.* Influence of heating and solidification conditions on the structure and surface quality of electron beam melted Ti-6Al-4V Ingots // JMPT. — 2007. — №190. — P. 387-392.
11. *Калишок А. Н., Жук Г. В., Тригуб Н. П.* Моделирование режимов вывода усадочной раковины в цилиндрических слитках ЭЛПЕ // Пробл. спец. электрометаллургии. — 2002. — №1. — С. 23-25.
12. *Жук Г. В., Ахонина Л. В., Тригуб Н. П.* Математическое моделирование процессов кристаллизации титанового сплава Ti-6Al-4V при ЭЛПЕ // Там же. — 1998. — №2. — С. 21-25.

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

Поступила 17.09.2008

УДК 669.187.526:51.001.57

## РАЗРАБОТКА И ПОЛУЧЕНИЕ ТИТАНОВОГО СПЛАВА С ПОВЫШЕННЫМИ ЖАРОПРОЧНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

А. Ю. Северин, Г. В. Жук, Н. П. Тригуб,  
В. Н. Замков, П. Ф. Топольский, И. К. Петриченко

Разработан и получен сплав на основе титана с повышенными жаропрочными свойствами и ресурсом работы, по сравнению с существующими жаропрочными сплавами. Установлена возможность улучшения жаропрочных свойств сплавов титана, выбрана система легирования. Рассчитан состав шихты и создана технология электронно-лучевой плавки для данного сплава. Разработаны режимы его деформации и определены оптимальные режимы термической обработки. Исследована структура сплава после деформации и термической обработки.

Alloy on the titanium base with increased heat-resistant properties and service life, as compared with existing heat-resistant alloys, has been developed and produced. The feasibility was established for improving the heat-resistant properties of titanium alloys, system of alloying was selected. Charge composition was calculated and technology of electron beam melting for the given alloy was developed. Conditions of its deformation were developed and optimum conditions of thermal treatment were defined. Structure of alloy after deformation and heat treatment was investigated.

**Ключевые слова:** жаропрочные титановые сплавы; электронно-лучевая плавка; деформация; термическая обработка; механические свойства; микроструктура

Для создания авиационных двигателей нового поколения с рабочими температурами на первой ступени двигателя более 600 °С необходимо решить проблемы разработки титановых сплавов с повышенной жаропрочностью. Жаропрочные титановые сплавы, выпускаемые серийно, имеют требуемый ресурс при значениях температуры до 500... 550 °С.

В последние годы в качестве перспективных жаропрочных материалов рассматриваются сплавы на основе алюминидов титана TiAl, Ti<sub>3</sub>Al. Однако они имеют очень низкую пластичность при температуре 20 °С, что резко понижает их технологичность и не позволяет использовать в узлах и деталях двигателей. Существуют также сплавы системы Ti-Al-Si с содержанием кремния до 4... 5 %, что существенно повышает жаропрочность и жаростойкость, но пластичность при комнатной температуре в литом состоянии остается весьма низкой, что также предопределяет их неудовлетворительную технологичность.

© А. Ю. СЕВЕРИН, Г. В. ЖУК, Н. П. ТРИГУБ, В. Н. ЗАМКОВ, П. Ф. ТОПОЛЬСКИЙ, И. К. ПЕТРИЧЕНКО, 2008

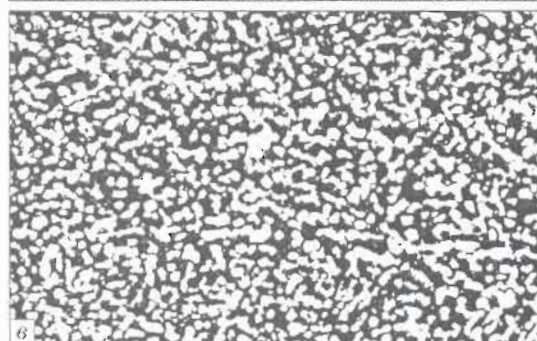


Таблица 1. Химический состав полученного слитка после электронно-лучевого переплава

Место отбора проб	Массовая доля элементов, %							
	Al	Mo	W	Nb	Zr	Si	O	N
Головная часть	7,34	2,95	2,72	3,01	2,43	0,65		
Средняя часть	7,40	2,92	2,70	3,16	2,31	0,66	0,12	0,015
Донная часть	7,15	3,00	2,71	3,12	2,20	0,57		

Вторым, не менее важным, направлением усовершенствования жаропрочных титановых сплавов является повышение ресурса их использования при температурах 500... 600 °С. Однако ни один из известных в данное время отечественных и зарубежных жаропрочных титановых сплавов не позволяет обеспечивать долговременный ресурс их использования при данных температурах.

В настоящее время в отечественной промышленности в качестве жаропрочных титановых сплавов чаще всего применяют двухфазные сплавы ВТ3-1,



Микроструктура ( $\times 800$ ) исследуемого жаропрочного сплава: а — после прокатки; б — после термической обработки (табл. 2, №3); в — после термической обработки (табл. 2, №2)

Таблица 2. Механические свойства полученного сплава после прокатки и термических обработок, а также свойства известных жаропрочных сплавов

№ п/п	Состояние испытуемых образцов	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	КСУ, Дж/см <sup>2</sup>
1	После прокатки	1250	9	25	22
2	Отжиг 950 °С — 2 ч, воздух + старение 570 °С — 4 ч, воздух	1440	4	12	16
3	Отжиг 850 °С — 2 ч, воздух + старение 650 °С — 2 ч, воздух	1190	7	15	20
ВТ18У	Исходное	910	7	15	15
IMI 834	»»	1030	6	15	Нет данных

ВТ8, ВТ9, ВТ25, а также псевдо- $\alpha$  сплав ВТ18У. Эти сплавы используются при температурах от 450 до 600 °С. За рубежом промышленное применение получили сплавы IMI 550, IMI 679, IMI 685, IMI 829, IMI 834 [1–5], используемые для работы при температурах до 600 °С.

До последнего времени основным критерием при разработке жаропрочных сплавов были значения кратковременной и долговременной прочности при определенной температуре. В работе [1] сформулирован целый комплекс требований к жаропрочным сплавам. Основные из них следующие:

высокая кратковременная и долговременная прочность во всем интервале рабочих температур. Минимальные требования — временное сопротивление при комнатной температуре составляет 1000 МПа, кратковременная и «стochastic» прочность при 400 °С — 750 МПа;

удовлетворительные пластические свойства при комнатной температуре (относительное удлинение более 5 %);

термическая стабильность: сплав должен сохранять свои пластические свойства после длительного влияния высоких температур и напряжений. Минимальные требования — сплав не должен быть хрупким после 100 ч нагрева при любой температуре в пределах 20... 500 °С;

высокое сопротивление усталости при комнатной и высоких температурах: предел выносливости при комнатной температуре должен составлять не менее 45 % временного сопротивления при комнатной температуре, а при 400 °С — не менее 50 % при соответствующей температуре;

высокое сопротивление ползучести. Минимальные требования — при температуре 400 °С и напряжении 500 МПа остаточная деформация за 100 ч не должна превышать 0,2 %.

Однако ни один из известных в настоящее время отечественных и зарубежных жаропрочных титановых сплавов не удовлетворяет комплексу перечисленных требований. Наиболее перспективными легирующими элементами при создании жаропроч-



ных, термически стабильных титановых сплавов являются алюминий, галлий (повышают температуру полиморфного превращения), цирконий и олово (почти не влияют на температуру фазового превращения), молибден, ванадий, ниобий, тантал (не имеют с титаном эвтектических точек), а также кремний (образует эвтектику, поэтому его содержание, как правило, не превышает 0,4 %).

Для дальнейших исследований выбрали систему легирования Ti-7,5 Al-4,0 Nb-3,0 W-3,0 Mo-2 Zr-0,6 Si [6]. Экспериментальный слиток выплавляли способом электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью (ЭЛПЕ). В качестве исходной шихты использовали титановую губку марки ТГ-130 фракцией 12...20 мм, чистые легирующие компоненты (алюминий, вольфрам, ниобий, цирконий и кремний). В процессе переплава использовали лабораторную электронно-лучевую печь УЭ-208. Выплавили экспериментальные слитки диаметром 75 мм и длиной 680 мм. От слитка отобрали пробы и образцы для проведения химического анализа, металлографических исследований и механических испытаний. Результаты химического анализа приведены в табл. 1.

Экспериментальный слиток показал равномерность распределения легирующих элементов и примесей по длине.

Для определения необходимого температурного режима горячей деформации установили температуру полиморфного превращения, составившую 1025 °С. Режим прокатки слитка следующий: нагрев до 1050 °С, выдержка 1 ч, прокатка за один нагрев от 70 до 32 мм. Затем провели повторный нагрев до температуры 960 °С, и слиток был докатан в этом же направлении до 11 мм.

После прокатки выполнили термическую обработку образцов исследуемого сплава. Механические свойства сплава после прокатки и термической обработки приведены в табл. 2.

Исследуемый жаропрочный титановый сплав имеет коэффициент стабилизации  $\beta$ -фазы  $K_{\beta} = 0,49$ . Его можно отнести к жаропрочным титановым двухфазным ( $\alpha+\beta$ )-сплавам мартенситного класса, способным упрочняться при термической обработке. Температура полиморфного превращения сплава составляет  $T_{\alpha+\beta} = 1025$  °С.

Структуру исследуемого жаропрочного титанового сплава в деформированном состоянии изучали с помощью металлографического микроскопа

«Neophot». Следует отметить, что микроструктура сплава после прокатки достаточно равномерная и однородная, глобулярного типа (рисунок, а). Термическая обработка по следующему режиму: 850 °С — 2 ч, воздух +650 °С — 2 ч, воздух (табл. 2, №3) — способствует коагуляции структурных элементов (рисунок, б) и, как следствие, — незначительному снижению прочности и повышению ударной вязкости. Термическая обработка по режиму 950 °С — 2 ч, воздух + 570 °С — 4 ч, воздух (табл. 2, №2) приводит к уменьшению доли первичной  $\alpha$ -фазы в сплаве и ее коагуляции. Первичная  $\alpha$ -фаза зафиксирована на фоне высокодисперсной ( $\alpha+\beta$ )-структуры, образующейся при распаде метастабильных фаз, фиксируемых на первой стадии термической обработки (рисунок, в). Такая термическая обработка сопровождается существенным повышением прочности и некоторым снижением пластичности.

### Выводы

1. Установлена возможность улучшения жаропрочных свойств сплавов титана путем их легирования ниобием, вольфрамом и кремнием.
2. Выбрана система легирования исследуемого титанового жаропрочного сплава, разработаны состав шихты и технология электронно-лучевой плавки для данного сплава.
3. Разработаны режимы деформации полученного жаропрочного сплава и определены оптимальные режимы его термической обработки.

1. Солонина О. П., Глазунов С. Г. Жаропрочные титановые сплавы. — М.: Металлургия, 1976. — 447 с.
2. Металлография титановых сплавов // Е. А. Борисова, Б. А. Бочвар, М. Я. Брун и др. — М.: Металлургия, 1980. — 464 с.
3. Bania Paul J. Next generation titanium alloys for elevated temperature service // ISIJ Intern. — 1991. — 31, №8 — С. 840-847.
4. Meetham G. W. Aluminium and titanium alloys at high temperatures // Mater. and Des. — 1989. — 10, №1. — С. 15-22.
5. Blenkinsop P. A. High temperature titanium alloys // Des. Titanium: Pros. intern. conf. (Bristol, 7-8 July, 1986). — Bristol, 1986. — С. 191-197.
6. Исследование структуры и механических свойств сплава Ti-7,2 Al-2,9 Mo-2,7 W-3 Nb-2,3 Zr-0,4 Si / С. А. Фирстов, В. Н. Замков, Н. П. Бродниковский и др. // Современ. электрометаллургия. — 2006. — №2. — С. 33-38.

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

Поступила 17.09.2008