



УДК 669.187.56.002.2:546.82

ВЫСОКОПРОЧНЫЕ И ЖАРОПРОЧНЫЕ ТИТАНОВЫЕ СПЛАВЫ С ИНТЕРМЕТАЛЛИДАМИ ТЕХНОЛОГИИ МЭП

Я. Ю. Компан, И. В. Протокилов, В. Н. Моисеев

Предложен новый класс высокопрочных и жаропрочных титановых сплавов на основе α - и β -твердых растворов с фазой в виде химического соединения. Для производства таких сплавов используется метод магнитоуправляемой электрошлаковой плавки (МЭП). Приведены результаты исследований механических свойств и структуры твердо-растворных титановых сплавов с интерметаллидным упрочнением.

New class of high-strength and heat-resistant titanium alloys, based on α - and β -solid solutions with a phase in the form of chemical compound, is offered. To produce these alloys a method of magnetically-controlled electroslag melting (MEM) is used. Results of investigations of mechanical properties and structure of solid-solution titanium alloys with an intermetallic strengthening are given.

Ключевые слова: высокопрочные и жаропрочные титановые сплавы; интерметаллидное упрочнение; магнитоуправляемая электрошлаковая плавка; гидродинамика; свойства

Введение

В минувшем, как и в нынешнем столетии авиастроение было и остается главным потребителем высокопрочных и жаропрочных титановых сплавов. Если еще вчера прочность сложнолегированных сплавов типа ВТ22, Ti-10-2-3 ($\sigma_b = 1200...1300$ МПа), предназначенных для деталей и узлов силового набора планера самолета (центропланы, силовые балки, монорельсы, шпангоуты, шасси и пр.), удовлетворяла самым высоким требованиям авиаконструкторов [1], то сегодня для авиации нового поколения требуется еще более прочный металл ($\sigma_b \geq 1400$ МПа). При этом прочность сплава должна сочетаться с достаточно высоким уровнем его пластичности (δ, ψ, KCU) и циклической выносливости. Наряду с вышеперечисленными свойствами при низких температурах жаропрочные сплавы, создаваемые для деталей и узлов современных авиадвигателей (лопатки, диски, газовые турбины и пр.) [2], должны еще иметь и высокие эксплуатационные характеристики при температурах до $700...800$ °С. Для сравнения отметим, что промышленные жаропрочные сплавы типа ВТ18У, ВТ22У характеризуются почти вдвое более низким температурным порогом жаропрочности ($400...450$ °С).

Постоянно растущий уровень требований к авиационным сплавам на основе титана обуславливает необходимость создания новых металлургических и технологических средств и методов их производства. Если до недавнего времени промышленные титановые сплавы рассматривали исключительно как α - и β -твердые растворы с различным соотношением фаз, а образующиеся химические соединения относили к нерегламентированной неизбежности, ухудшающей свойства сплавов, то в настоящее время такое представление претерпело существенное изменение. Более того, в последнее время в мировой практике активизировались работы по созданию многофазных сплавов с использованием интерметаллидных соединений. Появились титановые сплавы, представляющие собой исключительно химическое соединение. К ним, например, относятся алюминиды титана Ti_3Al , $TiAl$ с большим или меньшим количеством добавок β -стабилизирующих элементов.

Анализ существующего состояния исследований и разработок жаропрочных титановых сплавов показывает, что металлургические резервы совершенствования твердо-растворных α - и β -сплавов исчерпаны и нет оснований рассчитывать на принципиально новые достижения в их развитии. В то же время разработка и промышленное использование сплавов нового поколения возможны только при комплексном создании новых металлургических систем вместе с новыми методами их производства.



Новый класс высокопрочных и жаропрочных сплавов

Дальнейшее улучшение эксплуатационных характеристик титановых сплавов, прежде всего прочности и жаропрочности, наметилось в процессе исследований по созданию гетерогенных сплавов в виде пластичной матрицы, упрочняемой интерметаллидами. Новый подход к конструированию титановых сплавов позволяет гетерогенизировать структуру металла и получать более высокие физико-механические его свойства по сравнению с двухфазными твердо-растворными сплавами. Кроме того, открывается возможность управлять посредством термической обработки размером и формой выделяющихся химических фаз и выбирать само химическое соединение.

Изменяя в металле соотношение твердо-растворной матрицы, имеющей относительно высокую пластичность, и низкопластичных химических соединений возможно в широком диапазоне варьировать характеристики прочности, пластичности и жаропрочности этого класса титановых сплавов.

В качестве пластичной матрицы можно использовать α - и β -твердые растворы и их смеси с различной степенью легирования α - и β -стабилизирующими элементами. При этом предпочтительнее матрица, представляющая смесь равных количеств α - и β -твердых растворов и позволяющая наиболее эффективно использовать дисперсное твердение при закалке и старении [3]. Примером такой матрицы может быть широко используемый титановый сплав BT22.

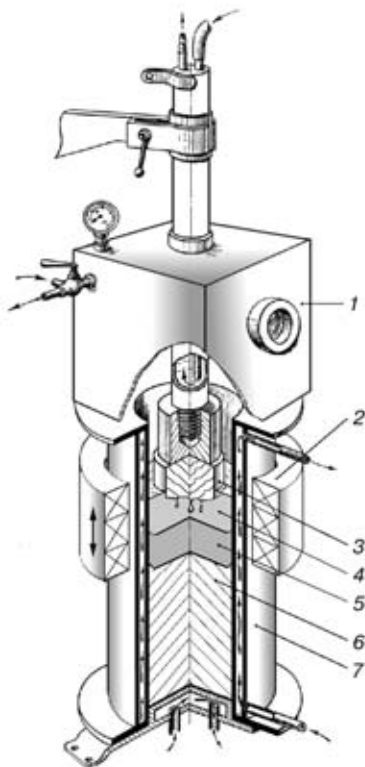


Рис. 1. Схема МЭП в продольно-радиальном магнитном поле: 1 — камера; 2 — электромагнитная система; 3 — расходный электрод; 4 — шлаковая ванна; 5 — металлическая ванна; 6 — слиток; 7 — кристаллизатор

Перспективной для создания «мягкой» матрицы является система Ti-Nb-Al, где имеется область твердого раствора титана Ti-25 % Nb-3 % Al с прочностью 650 МПа при 600 °С и удовлетворительной пластичностью при комнатной температуре. Определенный интерес может представлять матрица из никелида титана, содержащая 48...54 % Ni и имеющая хорошую пластичность при комнатной температуре.

Химическое соединение в структуре титановых сплавов может быть получено в виде дисперсных частиц или «каркаса» при образовании эвтектоида. При этом может быть использован тот и другой характер интерметаллидного упрочнения. Легирующими элементами, обеспечивающими возможность получения дисперсных химических соединений, являются кремний, углерод, бор и другие элементы, мало растворимые в титане. Для получения интерметаллидного «каркаса» могут быть использованы элементы, образующие с титаном эвтектоиды: железо, хром, олово и др.

Свойства твердо-растворных сплавов с интерметаллидным типом упрочнения можно регулировать в широких пределах путем их термической обработки. В этом одно из существенных отличий этих сплавов от сплавов на основе интерметаллидов, например алюминидов.

Технология магнитоуправляемой электрошлаковой плавки

Важным фактором, определяющим успех создания титановых сплавов с интерметаллидным типом упрочнения, является технология их изготовления. Производить такие сплавы традиционными методами плавки достаточно сложно. Этому препятствуют, прежде всего, высокотемпературные концентрированные источники нагрева, такие как электрическая дуга и электронный луч, а также неуправляемое или недостаточно интенсивное движение металлургического расплава.

Поскольку при получении таких сложнoleгированных сплавов весьма остро стоит вопрос их структурной и химической однородности, то потребовались принципиально новые процессы их плавки, которые обеспечивали бы высокую гомогенность кристаллизующегося металла слитка.

В ИЭС им. Е. О. Патона была разработана технология магнитоуправляемой электрошлаковой плавки (МЭП) многокомпонентных сплавов титана [4-6]. Отличительной особенностью технологии МЭП является управление тепловой, химической и гидродинамической активностью металлургической ванны путем создания тех или иных траекторий движения ее расплава.

Идея магнитного управления гидродинамикой металлургической ванны заключается в том, чтобы нужным образом сформировать поле электромагнитной силы. Как видно из выражения для электромагнитной силы

$$\vec{f}_e = \vec{j} \times \vec{B},$$

где \vec{j} — плотность тока плавки; \vec{B} — индукция магнитного поля, на этом пути имеются две возмож-

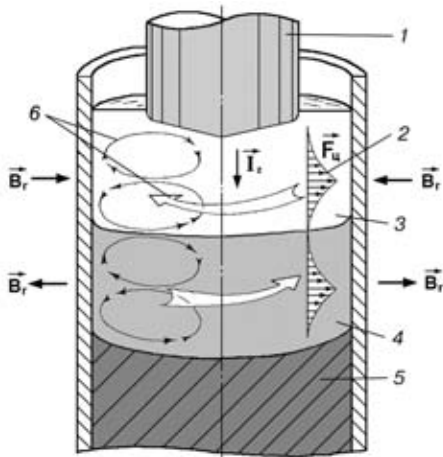


Рис. 2. Электровихревые течения при плавке в продольно-радиальном магнитном поле: 1 — расходимый электрод; 2 — распределение центробежной силы; 3 — шлаковая ванна; 4 — металлическая ванна; 5 — слиток; 6 — направление вращения расплава

ности. Первая заключается в изменении распределения плотности тока в металлургической ванне. Такой подход достаточно консервативен, так как требует изменения технологических параметров плавки, влияющих на качество формирования слитка. Вторая возможность связана с наложением на зону плавления электрода внешнего магнитного поля, т.е. поля, создаваемого магнитными системами, расположенными вне зоны плавки. Такой подход более гибок, так как позволяет изменять не только величину, но и направленность индукции магнитного поля.

На основании анализа воздействия внешних магнитных полей на гидродинамику металлургического расплава были разработаны два основных механизма магнитного управления гидродинамикой электрошлакового процесса: создание в металлургической ванне направленных электровихревых те-

чений (ЭВТ); создание возвратно-поступательных колебаний (вибрации) расплава. Направленные электровихревые течения создаются в металлургической ванне под воздействием внешних продольного и продольно-радиального магнитных полей, а вибрация расплава — под воздействием поперечного магнитного поля.

На рис. 1 показана схема МЭП в продольно-радиальном магнитном поле. Поле электромагнитных сил, создаваемых взаимодействием тока плавки с внешним продольно-радиальным полем, генерирует дифференциальные ЭВТ расплава, которые в свою очередь возбуждают разнонаправленные торoidalные его вращения (рис. 2). Такой сложный характер движения расплава выравнивает температурное поле ванны, интенсифицирует тепло- и массообмен в металлургической ванне и, как результат, способствует формированию металла с высокой химической и физической однородностью.

Аналогичный эффект управления тепломассопереносом металлургического расплава достигается при плавлении расщепленного электрода (рис. 3). При этой схеме гидродинамическая структура ванны носит более сложный характер, чем при плавлении одного электрода. Тем не менее, и в этом случае достигается интенсивное перемешивание конусообразного расплава по всему объему ванны, благодаря чему обеспечивается повышение однородности металла слитка.

В свою очередь, плавка в поперечном магнитном поле позволяет создавать интенсивное возвратно-поступательное движение расплава (рис. 4). Амплитуда таких колебаний пропорциональна силе тока плавки и индукции магнитного поля, а частота соответствует частоте тока плавки (50 Гц). Такая «вибрация» расплава (и расходимого электрода)

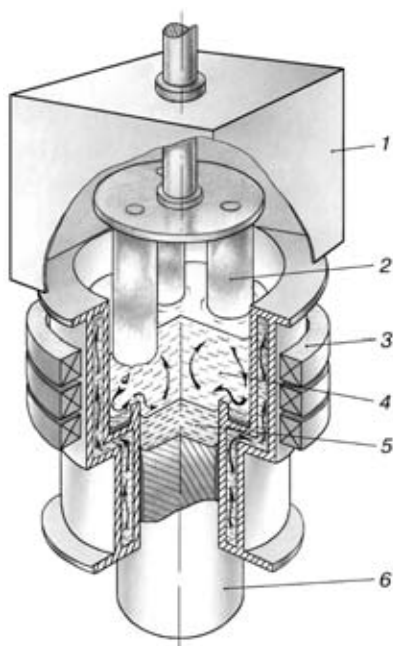


Рис. 3. Схема МЭП с использованием расщепленного электрода: 1 — камера; 2 — расходимый электрод; 3 — электромагнитная система; 4 — шлаковая ванна; 5 — металлическая ванна; 6 — слиток

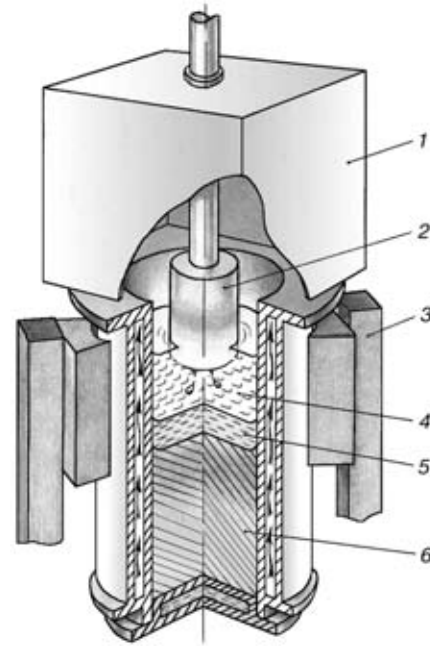


Рис. 4. Схема МЭП в поперечном магнитном поле: 1 — камера; 2 — расходимый электрод; 3 — электромагнитная система; 4 — шлаковая ванна; 5 — металлическая ванна; 6 — слиток



Таблица 1. Механические свойства титановых сплавов с дисперсионным интерметаллидным упрочнением (пруток диаметром 25 мм) после закалки и старения

Сплав	σ_b , МПа	δ , %	ψ , %	KCU, Дж/см ²	E_d , ГПа
BT22 + 0,2%С	1288... 1366	14,8... 16,6	37... 40	20... 22	130
BT22 + 0,2%B	1330... 1340	8,0... 11,5	27... 36	22... 24	132
BT22 + 0,1%Si-0,1%C-0,1%B	1300... 1370	8,6... 14,0	22... 30	18... 22	132

способствует равномерному тепломассопереносу в металлургической ванне, измельчает растущие кристаллиты и позволяет получать химически и физически однородный металл слитка.

Таким образом, технология МЭП в значительной мере удовлетворяет важнейшим требованиям, предъявляемым к выплавке слитков высокопрочных и жаропрочных сплавов с интерметаллидным типом упрочнения, обеспечивая высокую степень однородности и мелкокристалличности литого металла.

Помимо металлургических достоинств, способ МЭП имеет и ряд технологических преимуществ. Это простота и надежность используемого оборудования, гибкость технологических параметров плавки, высокое качество поверхности слитков, возможность получения слитков различного поперечного сечения. Для плавки по способу МЭП можно использовать оборудование, предназначенное для ЭШП и ВДП, после соответствующей его реконструкции.

Качество металла, упрочненного интерметаллидами

Методом МЭП были изготовлены и исследованы опытные высокопрочные и жаропрочные титановые сплавы с интерметаллидами. В табл. 1 показаны механические свойства сплавов, представляющих собой матрицу из титанового сплава BT22 с дисперсионным интерметаллидным упрочнением. В этих сплавах интерметаллидное упрочнение достигается за счет образования дисперсных соединений титана с малорастворимыми элементами — углеродом, бором и кремнием (рис. 5).

По сравнению с традиционными сплавами эти сплавы отличаются не только более высокими характеристиками прочности и пластичности, но и модуля нормальной упругости E_d , что в ряде случаев чрезвычайно важно.

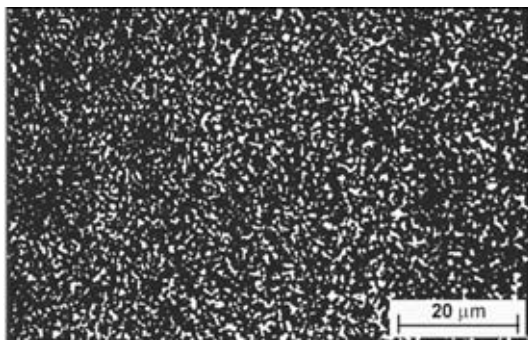


Рис. 5. Микроструктура титанового сплава Ti-5% Al-5% Mo-5% V-1% Fe-1% Cr-0,1% Si-0,1% C-0,1% B (пруток диаметром 25 мм) после термической обработки по режиму: нагрев 810 °С, 1 ч, охлаждение на воздухе, старение 540 °С, 4 ч

Применение жаропрочных сплавов с интерметаллидным типом упрочнения открывает широкие возможности для изготовления изделий, предназначенных для работы при высоких температурах вплоть до 700... 800 °С. Примером таких сплавов могут служить сплавы с «жестким каркасом» из химического соединения, который образуется в пластичной матрице в процессе длительной термической обработки металла. Уровень прочности и пластичности этих сплавов может гибко регулироваться химическим составом металла посредством изменения соотношения в нем твердорастворной и интерметаллидной составляющих.

Таблица 2. Механические свойства опытных жаропрочных сплавов (пруток диаметром 25 мм) при комнатной температуре

Сплав	σ_b , МПа	δ , %	ψ , %	KCU, Дж/см ²
Ti-4,5%Al-25%Nb-5%Mo-0,15%B-0,15%C-0,15%Si	1230	4,5	6,5	18
Ti-4,5%Al-25%Nb-5%Mo-0,1%B-0,1%C-0,1%Si-4%Fe	1380	3,5	5,5	14

В табл. 2 и 3 представлены механические свойства сплава с матрицей на основе твердого раствора ниобия и молибдена, дисперсно упрочненного химическими соединениями, а также сплава с дополнительным каркасным упрочнением за счет эвтектоида TiFe (рис. 6).

Исходя из данных этих таблиц, можно сделать вывод о том, что путем интерметаллидного упрочнения твердорастворных титановых сплавов можно существенно повысить их прочность и жаропрочность и сохранить при этом необходимую пластичность. Разработанная технология МЭП позволяет реализовать преимущества титановых сплавов с интерметаллидным типом упрочнения прежде всего посредством их гомогенизации.

Таблица 3. Механические свойства жаропрочного сплава (пруток диаметром 25 мм) при высоких температурах

Сплав	$T_{исп}$, °С	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_d^{100} , МПа
Ti-6%Al-25%Nb-5%Mo-4%Fe-0,1%Si-0,1%C-0,1%B	650	520	485	450
	750	435	340	320

Представленные в табл. 1–3 механические свойства являются предварительными в связи с ограниченным количеством проведенных испытаний и требуют дальнейшего подтверждения. Следует подчеркнуть, что дальнейшие исследования и решение

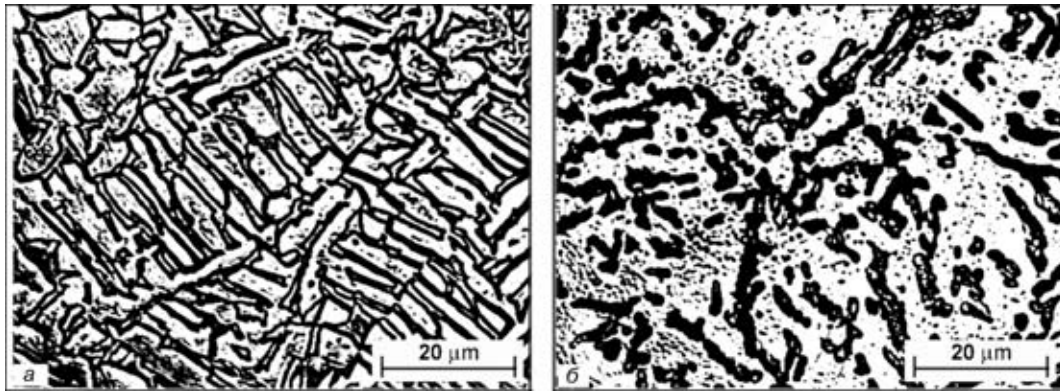


Рис. 6. Микроструктура титанового сплава Ti-4,5 % Al-25 % Nb-5 % Mo-4 % Fe-0,1 % B-0,1 % C-0,1 % Si (пруток диаметром 25 мм): а — после закалки и старения; б — после обработки на эвтектоид (нагрев при температуре вблизи эвтектоидного превращения)

проблемы создания титановых сплавов с интерметаллидным упрочнением весьма актуальны и важны, поскольку открывают широкие возможности создания нового класса титановых сплавов с разнообразными физико-механическими свойствами, более высокими, чем у твердорастворных сплавов. В контексте решения этой проблемы первоочередным является изучение кинетики образования химических соединений в титановых сплавах и на этой основе разработка наиболее рациональных направлений создания титановых сплавов с интерметаллидным типом упрочнения. Работы по выплавке и испытанию твердорастворных сплавов с интерметаллидами и чисто интерметаллидов продолжаются.

Выводы

1. Металлургические резервы усовершенствования традиционных твердорастворных титановых сплавов хорошо изучены и не предусматривают возможности достижения существенно более высокого уровня их эксплуатационных характеристик.

2. Предложен новый класс высокопрочных и жаропрочных твердорастворных сплавов с интерметаллидными дисперсным и «каркасным» типами упрочнения.

3. Технология магнитоуправляемой электрошлаковой плавки высокопрочных и жаропрочных титановых сплавов с интерметаллидами обеспечивает высокую однородность и точно заданный химический состав металла слитков.

4. Путем интерметаллидного упрочнения твердорастворных титановых сплавов можно существенно повысить их прочность и жаропрочность и сохранить при этом необходимую пластичность. Так, сплав Ti-4,5 % Al-25 % Nb-5 % Mo-0,1 % B-0,1 % C-0,1 % Si-4 % Fe технологии МЭП имеет предел прочности 1380 МПа и относительное удлинение 3,5 % при комнатной температуре и длительную жаропрочность $\sigma_d^{100} = 320$ МПа при температуре 750°C.

1. Братухин А. Г., Новожилов Г. В., Куликов Ф. Р. Применение сплавов титана в конструкциях магистральных пассажирских и тяжелых транспортных самолетов // Титан. — 1996. — № 1 (9). — С. 52-59.
2. Моисеев В. Н. Титан // Энциклопедия «Машиностроение». Т.П-3: Цветные металлы и сплавы; Композиционные металлические материалы. — М.: Машиностроение, 2001. — С. 272-347.
3. Сысоева Н. В., Моисеев В. Н. Титановые сплавы с интерметаллидным типом упрочнения // Авиационные материалы и технологии. — Москва: ВИАМ, 2002. — С. 162-170.
4. Колпан Я. Ю., Протокоvilov И. В. Некоторые технологические аспекты магнитоуправляемой электрошлаковой плавки (МЭП) титановых сплавов // Материалы Международн. науч.-техн. конф. «Специальная металлургия: вчера, сегодня, завтра», Киев, 8-9 окт. 2002 г. — Киев: Політехніка, 2002. — С. 56-62.
5. Колпан Я. Ю., Протокоvilov И. В. Получение высоколегированного титана методом МЭП // Теория и практика металлургии. — 2001. — № 5 (25). — С. 70-77.
6. Колпан Я. Ю., Протокоvilov И. В. Peculiarities of process of magnetically-controlled electroslag melting (MEM) of titanium alloys // Proceedings of the 9th World Conference on Titanium, St. Petersburg, Russia, June 7-11, 1999.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев
 Всероссийский ин-т авиационных материалов, Москва

Поступила 02.03.2004

16 февраля 2004 г. после тяжелой болезни скончался известный немецкий металлург Геральд Штайн (родился 24.05.1943 г.). В течение долгих лет его деятельность была связана с различными подразделениями концерна "Крупп", в т. ч. такими фирмами, как "Deutsche Titan GmbH", VSG, Enegrietechnik Essen GmbH. Г. Штайн известен металлургам своими работами по созданию техники и технологии производства сталей со сверхравновесным содержанием азота. Именно благодаря его усилиям появилась первая в мире промышленная 20-тонная камерная печь ЭШП, способная работать под избыточным давлением азота до 40 атм.

Многие ученые и инженеры металлурги Украины тесно сотрудничали с Г. Штайном и это сотрудничество взаимно обогащало.



Редколлегия