

## ТИТАН: СПЛАВЫ, СВАРКА, ПРИМЕНЕНИЕ

**В. Е. БЛАЩУК**, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Показано преимущество титана и его сплавов по сравнению с существующими традиционными материалами. Описаны способы производства титана и его сплавов, применяемых в промышленности, а также способы их сварки и используемые сварочные материалы. Отмечены наиболее интересные случаи применения титана и его сплавов.

*Ключевые слова:* титан и его сплавы, производство, способы сварки, применение, сварные изделия и конструкции

Титан — новый металл, повторно открытый М. Г. Клапротом\* в 1795 г. и названный им в честь мифологических божеств. Сегодня титан считается металлом XXI века; по распространенности в земной коре он занимает 9-е место, уступая лишь таким конструкционным металлам, как алюминий, железо и магний. Исследования свойств титана, выполненные в XX в., показали, что название, данное этому металлу, полностью оправдано его замечательными механическими свойствами и высокой коррозионной стойкостью. До титана ни один конструкционный металл не знал такой длительной истории исследований и такого бурного роста производства. Открытый в конце XVIII в., промышленным способом он получен в США только в 1948 г., в СССР — в 1954 г.

Титан и его сплавы обладают рядом преимуществ по сравнению с большинством традиционных конструкционных материалов. В первую очередь к ним следует отнести следующие [1, 2]:

высокую коррозионную стойкость во многих природных, биологических и технологических средах, в которых использование традиционных сталей и сплавов невозможно либо требует применения дополнительных методов защиты;

вероятность существенного повышения коррозионной стойкости титана путем микролегирования, в частности поверхностного, благородными элементами (палладий и рутений) и катодными присадками (никель, молибден, кобальт, ванадий, вольфрам и др.);

более высокую или равноценную удельную прочность и усталостную долговечность по сравнению с коррозионностойкими сталями и сплавами; экологическую чистоту и хорошую биологическую совместимость с живыми тканями, что позволяет успешно использовать титан и его сплавы для изготовления эндопротезов.

Однако широкое применение титана и его сплавов сдерживается из-за:

высокой стоимости металла;

более сложной, а поэтому и более дорогой, технологии изготовления полуфабрикатов и изде-

лий (в особенности сварка) по сравнению с большинством конструкционных коррозионностойких сталей и сплавов;

высокой чувствительностью к водородному охрупчиванию и газопоглощению;

сильного адгезионного схватывания трущихся поверхностей при нарушении поверхности защитной пленки.

Высокая стоимость титана в первую очередь связана со сложностью технологии его производства. Титановая губка — сырье для производства компактного металла — получается сегодня по методу Кроля или магниетермическим (иногда натриетермическим) способом [3, 4]. Полученная титановая губка прессуется вместе с легирующими элементами и оборотными материалами в расходный электрод и плавится в вакуумных дуговых печах [3, 4]. Возрастают объемы выплавки в электронно-лучевых [5, 6] и плазменных [7] печах, ограниченно применяется плавка в электрошлаковых печах [8], а также переработка губки способом порошковой металлургии [9]. Электролитический, металлотермический и другие способы получения титана находятся в стадии опытно-промышленных испытаний [10]. Важной проблемой в металлургии титана является также переработка лома и отходов металла [3].

В последнее время наблюдается снижение спроса на титан. Это связано с уменьшением его потребления в оборонной промышленности (что невозможно компенсировать объемом его использования в гражданской авиации), а также тем, что благодаря его высокой коррозионной стойкости и коррозионно-механическим свойствам произошло относительное насыщение его потребления (химическая, нефтехимическая и целлюлозно-бумажная промышленность). Поэтому в промышленно развитых странах проводится поиск новых областей применения сплавов титана, при этом учитывается необходимость решения проблем охраны окружающей среды, а также безопасной эксплуатации оборудования и транспортных средств.

Основной легирующий элемент в титановых сплавах — алюминий. Следующими по важности легирующими элементами являются ванадий и молибден, образующие с  $\beta$ -Ti непрерывный ряд твердых растворов. В качестве легирующих элементов промышленных сплавов нашли применение хром, марганец, железо, медь, олово, цирконий, ванадий. Для повышения стойкости титановых сплавов в активных средах применяют катодное легирование

\*Мартин Генрих Клапрот (1.12.1743 (Вернигероде) — 1.01.1817 (Берлин) — известный немецкий химик и естествоиспытатель.



Таблица 1. Обозначение титановых сплавов в различных странах мира

Сплав (по ASTM B265, США)	Состав, мас. %	Международный стандарт UNS	Стандарт Германии DIN 17850	Фирма «Krupp VDM»	Другие страны
Grade 1	0,03[N]; 0,10[C]; 0,015[H]; 0,20Fe; 0,18[O]	R50250	Ti I	Titan 995	IMI115; Ti35A
Grade 2	0,03[N]; 0,10[C]; 0,015[H]; 0,30Fe; 0,25[O]	R50400	Ti II	Titan 994	IMI125; Ti50A
Grade 3	0,03[N]; 0,10[C]; 0,015[H]; 0,30Fe; 0,35[O]	R50550	Ti III	Titan 993	IMI130; Ti75A
Grade 4	0,05[N]; 0,10[C]; 0,015[H]; 0,50Fe; 0,40[O]	—	—	—	—
Grade 5	6Al-4V	R56400	—	—	—
Grade 6	5Al-2,5Sn	R54520	—	—	—
Grade 7	0,03[N]; 0,10[C]; 0,015[H]; 0,30Fe; 0,25[O]; 0,20Pd	R52400	Ti IPd	Titan 994Pd	IMI260; TiPd
Grade 9	3Al-2,5V	R56320	—	—	—
Grade 11	0,3[N]; 0,10[C]; 0,015[H]; 0,20Fe; 0,18[O]; 0,20Pd	R52250	Ti IIPd	Titan 995Pd	—
Grade 12	0,3Mo-0,8Ni	—	—	—	IMI325; Ti Code 12
Grade 23	6Al-4VELI	R56401	—	—	—
Grade 25	6Al-4V-0,6Pd	—	—	—	—

небольшими добавками электроположительных металлов (рубидий, платина, рений, рутений). Используется также ограниченное легирование кремнием, бором, углеродом, кислородом [1].

По характеру взаимодействия с титаном легирующие элементы условно разделяются на три группы:  $\alpha$ -стабилизаторы (элементы, повышающие температуру  $\alpha \rightarrow \beta$ -превращения титана) — алюминий, кислород, азот, углерод;  $\beta$ -стабилизаторы (элементы, снижающие температуру полиморфного превращения) — ванадий, молибден, ниобий, тантал, хром, марганец, железо, медь, никель, кобальт, кремний, вольфрам, и элементы, мало влияющие на температуру полиморфного превращения — олово, цирконий, гафний, галлий.

О фазовом составе титановых сплавов можно судить по условному коэффициенту  $\beta$ -стабилизации  $K_\beta = C_\beta / C_k$ , где  $C_\beta$  — содержание  $\beta$ -стабилизатора в рассматриваемом сплаве;  $C_k$  — содержание  $\beta$ -стабилизатора в двойном сплаве критического состава. По значениям  $K_\beta$  все промышленные титановые сплавы условно разделяются на  $\alpha$ -сплавы, псевдо $\alpha$ -сплавы ( $K_\beta \leq 0,25$ ), ( $\alpha + \beta$ )-сплавы ( $K_\beta = 0,3 \dots 0,9$ ), переходного типа ( $K_\beta = 1,0 \dots 1,4$ ), псевдо $\beta$ -сплавы ( $K_\beta = 1,4 \dots 2,4$ ) и  $\beta$ -сплавы ( $K_\beta \geq 2,5$ ).

В табл. 1 приведены составы зарубежных титановых сплавов, выпускаемых промышленностью, по ASTM B265 [1, 2]. Эти сплавы условно разделяются на сплавы с низкой прочностью —  $\sigma_B \leq 600$  МПа (например, серии VT1, марок AT2, ПТ-1М), средней прочностью (ПТ-3В, серий AT и OT4, VT20, VT5-1), а также высокопрочные —  $\sigma_B > 1000$  МПа. Сплавы VT3-1, VT8, VT18, VT25, VT36 и другие относятся к жаропрочным и используются при изготовлении дисков и лопаток компрессоров, а также деталей кожуха авиационных двигателей. То же можно сказать и о зарубежных сплавах типа IMI 318, 550, 685, 829 и 834, а также сплавах Ti-6-4, Ti-6-2-4-2, Ti-2-4-2 и др.

В последние годы большое внимание уделяется разработке экономнолегированных титановых

сплавов, в состав которых входят недорогие легирующие элементы. Для титановых сплавов в этом плане перспективно железо, стабилизирующее  $\beta$ -фазу и являющееся одним из наиболее сильных упрочнителей титана. При содержании железа до 0,5 мас. % в отожженных сплавах каждая его десятая доля процента повышает  $\sigma_B$  и  $\sigma_{0,2}$  на 20 МПа, а при содержании его 2...10 мас. % увеличение массовой доли железа на 1 % повышает  $\sigma_B$  на 45...70 МПа. При этом существенно снижаются их пластические свойства, хотя при содержании железа 2...6 мас. % они остаются на удовлетворительном уровне (по технологическим причинам в условиях производства содержание железа не должно превышать 2 %) [11–16].

Железо в титане является эвтектоидообразующим  $\beta$ -стабилизатором и находит применение в высоколегированных ( $\alpha + \beta$ )- и псевдо $\beta$ -сплавах, содержащих  $\beta$ -изоморфные стабилизаторы (ванадий, молибден). Оно находится в них преимущественно в  $\beta$ -твердом растворе и дополнительно повышает их стабильность [13–16].

Механические свойства титановых сплавов зависят от характера их легирования, а также их фазового состава и структуры. Структура металла определяется режимами его горячей пластической деформации и термической обработки.

Находят применение следующие виды термической обработки титановых сплавов [1, 17–21]: отжиг полный и неполный, ступенчатый и изотермический. Изотермический отжиг включает нагрев в  $\beta$ -области, охлаждение до температуры ( $\alpha + \beta$ )-области, выдержку при этой температуре с последующим охлаждением до комнатной температуры. Вид отжига выбирается в зависимости от состава сплава и назначения полуфабриката и изделия. Продолжительность отжига зависит от сечения изделия. Для снятия внутренних напряжений, образующихся в результате обработки изделий (и сваркой в том числе), используется неполный отжиг, поскольку ( $\alpha + \beta$ )-сплавы титана имеют повышенную чувствительность к термической обработке. Основным режимом термической

Таблица 2. Марки и составы сварочных проволок на основе титана

США		Япония, JIS Z3331	Россия, ГОСТ 27265-87	Украина, ТУУ 05416923.041-98	Международный стандарт UNS	Химический состав проволоки, мас. %	Марка свариваемого материала
AWS A5.16-90	SAE, AMS						
ERTi-1	495	YTB28/YTW28	BT1-00Cв	BT1-00Cв	R50100	0,03C; 0,10[O]; 0,005[H]; 0,015[N]; 0,10Fe	Технически чистый титан
ERTi-2		YTB35/YTW35			R50120	0,03C; 0,10[O]; 0,008[H]; 0,020[N]; 0,20Fe	
ERTi-3		YTB45/YTW49			R50125	0,03C; 0,12[O]; 0,008[H]; 0,020[N]; 0,30Fe	
ERTi-4					R50130	0,03C; 0,20[O]; 0,008[H]; 0,020[N]; 0,2Fe	
ERTi-5	4954	YTB640			R56400	6Al; 4V; 0,005Y; 0,18[O]; 0,015[H]; 0,03[N]	Ti6Al4V
ERTi-5ELI	4956	YTB640E			R56402	6Al; 4V; 0,005Y; 0,10[O]; 0,005[H]; 0,012[N]	Ti6Al4VELI
ERTi-6		YTB525			R54522	5Al; 2,5Sn; 0,005Y; 0,18[O]; 0,015[H]; 0,05[N]	Ti5Al2,5Sn
ERTi-6ELI					R54523	5Al; 2,5Sn; 0,005Y; 0,10[O]; 0,005[H]; 0,12[N]	Ti5Al2,5SnELI
ERTi-7		YTB28Pd/YTW28Pd			R52401	0,18Pd	Ti-Pd-сплав
ERTi-9		YTAB325			R56320	3Al; 2,5V; 0,12[O]; 0,008[H]; 0,02[N]	Ti3Al2,5V
			BT6св	BT6св		4Al; 3V	BT6; BT23
			2B	2B		2Al; 1,5V	PT-3B; AT3; AT6
ERTi-9ELI					R56321	3Al; 2,5V; 0,10[O]; 0,005[H]; 0,012[N]	Ti3Al2,5VELI
ERTi-12					R53400	0,3Mo; 0,7Ni	Grade 12 ASTM/ASME
ERTi-15					R56210	6Al; 2Cb; 1Ta; 1Mo	Ti-6-2-1-1
			PT-7Mсв	PT-7Mсв		2Al; 2,5Zr	PT-7M
			BT20-1св	BT20-1св		2,5Al; 1V; 1,5Zr	BT20
			BT20-2св			4Al; 1Mo; 1V; 1,5Zr	BT20
			СП15св	СП15св		4,2Al; 2,7V; 2,7Mo; 3,5Nb; 1,5Zr	СП15; BT6; BT23
			СПТ-2			4Al; 3V; 1,5Zr	BT6; BT14; BT23,1
				СП17		3,7Al; 4Nb; 0,5Zr; 1,5Fe	Ti-Al-Nb-Fe-Zr
			OT4-1св			2Al; 1,5Mn	OT4-0; OT4-1
			OT4св			4,2Al; 1,5Mn	OT4; OT4-2
			BT2св			2,5Al	OT4-1; 3M; PT-3B; AT3; AT6

Примечание. Диаметры проволок, выпускаемых по ГОСТ 27265-87 и ТУУ 05416923.041-98, составляют от 1,4 до 7,0 мм, по ANSI/AWS A5.16-90 – от 1,6 (1/16") до 4,8 мм (3/16").

обработки, применяемой для этих сплавов, является изотермический отжиг, при котором получается стабильная двухфазная ( $\alpha + \beta$ )-структура, обеспечивающая  $\sigma_b \geq 1000$  МПа, высокую пластичность и термическую стабильность в течение всего срока эксплуатации. Наиболее эффективна для этих сплавов упрочняющая термическая обработка, включающая закалку и старение.

Высокотемпературные и длительные нагревы осуществляют в вакууме, защитных газах, а также с использованием специальных защитных покрытий.

Предел прочности титана значительно увеличивается при деформации. В случае 80%-го обжатия технический титан упрочняется в 3 раза, для титановых сплавов упрочнение может быть двукратным.

Легирование металла шва влияет на снижение чувствительности сварных соединений к охрупчи-

ванию вредными примесями-газами, в частности к водородному охрупчиванию. Легирующие элементы в разной степени повышают прочность металла швов. Увеличение содержания легирующих элементов приводит к возрастанию твердости и снижению относительного удлинения металла шва. В то же время относительное сужение его увеличивается (при добавках до 2...3 % легирующих элементов), а затем уменьшается. Подобным образом изменяются и ударная вязкость. Комплексное легирование металла шва позволяет достичь более однородного распределения атомов легирующих элементов и равномерного искажения кристаллической решетки титана. По степени улучшения механических свойств сварных соединений титановых сплавов при легировании  $\beta$ -стабилизирующими элементами последние располагаются следующим образом: Cr, Fe, Cr+Fe, Mn, V+Fe, Mo,

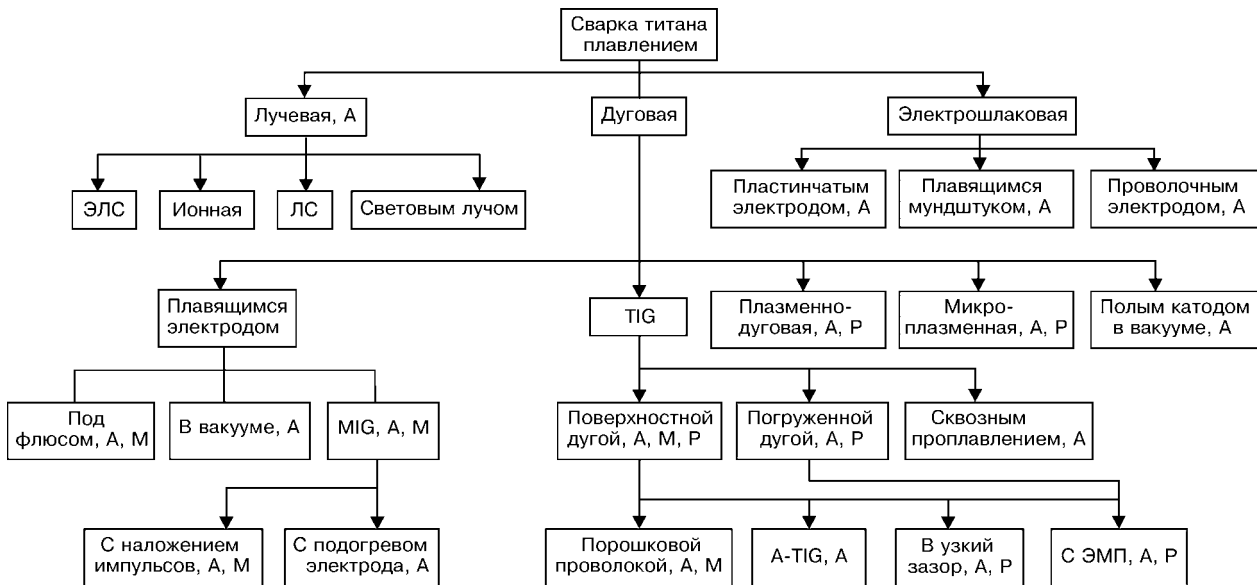


Рис. 1. Способы сварки титана плавлением, применяемые в промышленности: А — автоматическая сварка; М — механизированная; Р — ручная; ЭМП — сварка с электромагнитным перемешиванием; остальные обозначения см. в тексте

Mo+Fe, Mo+V, Mo+Cr, Mo+V+Cr+Fe. При сварке титановых сплавов для получения оптимальных свойств сварных соединений часто необходимо, чтобы химический состав металла шва отличался от свариваемого металла [19, 21].

Для сварки титановых сплавов различных классов разработаны и выпускаются промышленностью сварочные титановые проволоки различного состава (табл. 2). Проволоки поставляют в травленном и дегазированном состоянии.

Для сварки титановых сплавов в основном применяются почти все созданные для сварки сталей и цветных металлов способы (рис. 1–3) [18–28]. Качество сварных соединений, выполненных на титане, во многом определяется термомеханическим циклом сварки, отличающимся от такого же при сварке сталей. При сварке титана потери энергии меньше, а продолжительность нахождения металла ЗТВ в области высоких температур в 2–3 раза больше. Чувствительность к термическому циклу сварки связана с протеканием  $\alpha \rightarrow \beta$ -превращения, быстрым ростом зерна высокотемпературной  $\beta$ -фазы при нагреве выше температуры полиморфного превращения, перегревом и образованием хрупких фаз при охлаждении и старении.

Высокая химическая активность титана по отношению к газам, находящимся в атмосфере ( $[O]$ ,  $[N]$ ,  $[H]$ ), приводит к заметному насыщению ими металла сварного соединения. Это вызывает его охрупчивание и снижение механических свойств (пластичности, длительной прочности, коррозионных разрушений). Заметное насыщение металла в

процессе сварки происходит уже при  $T \geq 350$  °С. Поэтому зону сварки, ограниченную изотермой 350 °С, необходимо тщательно защищать от взаимодействия с воздухом. Для защиты используются чистые аргон и гелий (ГОСТ 10157–79 и EN439) или их смесь, а также специальные бескислородные флюсы. Сварка в вакууме также исключает возможность взаимодействия титана с газами. При сварке давлением допускается отсутствие дополнительной защиты.

Обязательным условием получения качественных соединений является регулирование механических свойств и структуры металла швов и ЗТВ путем выбора рациональной технологии и режимов сварки, обеспечивающих ее выполнение при минимальной погонной энергии. Качество сварных соединений во многом определяется технологией подготовки кромок под сварку.

При выборе способов сварки титановых сплавов исходят из необходимости обеспечения защиты зоны сварки и остывающих участков соединения от взаимодействия с газами атмосферы, а также учета особенностей соединения металла малых, средних и больших толщин [18–24].

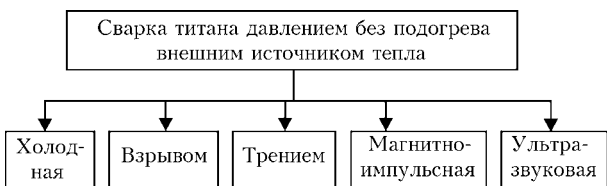


Рис. 2. Способы сварки титана давлением без подогрева внешним источником тепла

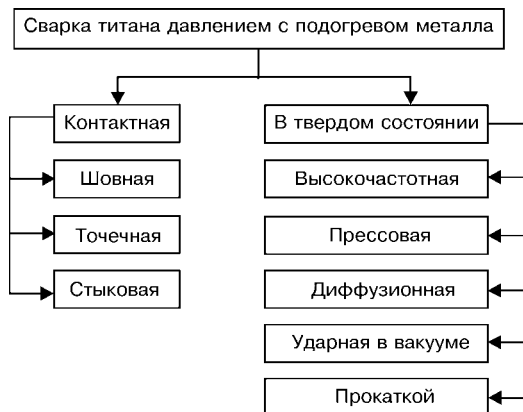


Рис. 3. Способы сварки титана давлением с подогревом металла

Наиболее распространенным и универсальным способом сварки плавлением сплавов титана является дуговая сварка в инертных газах (аргон и гелий) неплавящимся электродом (TIG), которая позволяет получить соединения на металле в широком диапазоне толщин с высокими показателями механических свойств. Сварка может выполняться на воздухе со струйной защитой, а также в камерах с контролируемой инертной атмосферой. Для защиты зоны перегрева остывающих участков соединения при сварке трубчатых конструкций и кольцевых поворотных и неповоротных стыков применяются накидные камеры малых размеров. Для сварки TIG в качестве неплавящихся электродов используют вольфрамовые электроды марок ЭВЛ ( $W-La_2O_3$ ), ЭВИ ( $W-Y_2O_3$ ) по ГОСТ 24949-80 и EWTh( $W-ThO_2$ ) по ANSI/AWS A5.12-92 [18, 19, 21, 24].

При плазменной сварке листов толщиной  $\delta \geq 10$  мм и микроплазменной сварке листов с  $\delta \leq 1,5$  мм используются те же способы защиты, что и при сварке TIG. Все большее применение в различных отраслях промышленности для соединения титановых сплавов находят лучевые способы сварки. Среди них наиболее широкое распространение получила электронно-лучевая сварка (ЭЛС) в вакууме. Лазерная сварка (ЛС) титановых сплавов осуществляется на воздухе в аргоне и гелии, благодаря чему может применяться для соединения элементов крупногабаритных конструкций.

Способы сварки титановых сплавов плавящимся электродом в среде инертных газов (MIG) и под бескислородными флюсами являются высокопроизводительными процессами, обеспечивающими необходимые свойства сварных соединений и отсутствие в них пор, трещин и несплавлений. Электрошлаковой сваркой (ЭШС) выполняют соединение изделий большой толщины.

Среди способов сварки титана давлением без подогрева металла внешним источником тепла (рис. 2) популярна сварка взрывом, которая применяется для соединения высокопрочных сплавов, а также разнородных металлов. Из способов сварки титана давлением с подогревом металла (рис. 3) наиболее распространена контактная сварка.

Крупнейшей в мире сварной конструкцией из титановых сплавов является малозумный тяжелый ракетный крейсер стратегического назначения (ТРКСН) проекта 941 (шифр «Акула», по классификации НАТО — «Typhoon»). Всего было построено шесть (одна дивизия) кораблей проекта 941, один из которых представлен на рис. 4. Первый из них был спущен на воду в сентябре 1979 г., а последний в июле 1988 г. Это самые крупные подводные корабли мира.

Впечатляющими являются характеристики ТРКСН проекта 941: длина — 172,8 м; ширина — 23,3 м; нормальное водоизмещение — 28500 м<sup>3</sup>; предельная глубина погружения — 500 м; рабочая — 380 м; скорость надводная — 13 уз.; подводная — 27 уз.

Конструкция ТРКСН проекта 941 выполнена по типу «катамарана»: два отдельных прочных

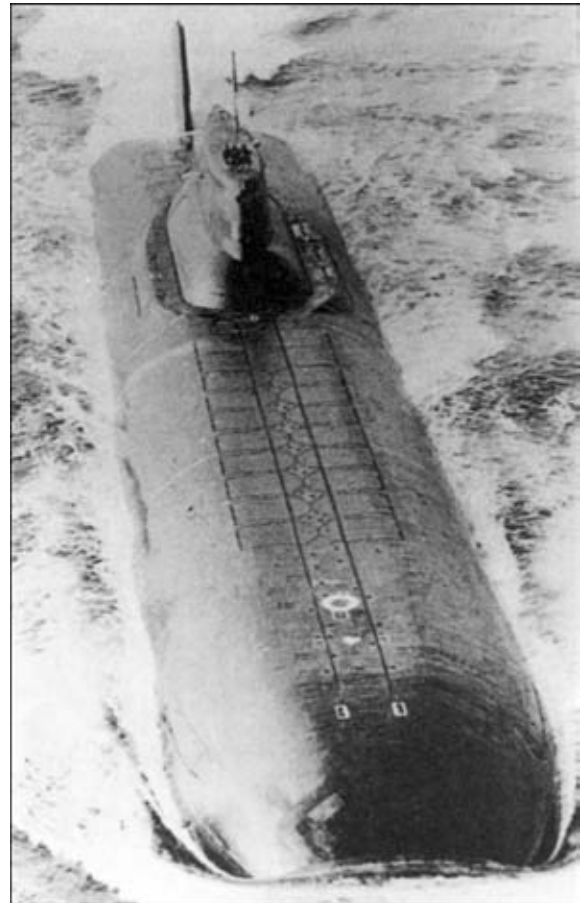


Рис. 4. Тяжелый ракетный крейсер стратегического назначения (СССР)

корпуса (диаметр каждого — 7,2 м) расположены параллельно друг другу в горизонтальной плоскости. Кроме того, имеются две отдельные герметичные капсулы — торпедный отсек и установленный между главными корпусами в диаметральной плоскости модуль управления. В нем находится центральный пост и размещенный за ним отсек радиотехнического вооружения. Ракетный отсек расположен между прочными корпусами в передней части корабля. Оба корпуса и капсулы отсека соединены между собой переходами. Всего водонепроницаемых отсеков 19. Прочные корпуса, центральный пост и торпедный отсек выполнены из титанового сплава, а легкий корпус — из стали [29]. Основная трудность при изготовлении конструкции таких габаритов заключалась в разработке технологии сварки длинномерных швов металла больших толщин, обеспечивающей надежную защиту шва и остывающих в процессе производства участков для получения необходимых свойств сварных соединений.

Использование титана для изготовления корпуса лодки позволяет уменьшить массу корпуса, увеличить глубину погружения, уменьшить магнитное поле, что увеличивает ее главное тактическое свойство — скрытность. Кроме того, сокращаются затраты на содержание наружной и внутренней части корпуса. Стоимость таких подводных лодок значительно выше, чем со стальным корпусом. Поэтому они в дальнейшем будут выпускаться в единичных образцах и предназначаться



Рис. 5. Двухместный разведывательный самолет SR-71A «Blackbird» фирмы «Lockheed» (США)



Рис. 6. Прототип бомбардировщика Сухой СуТ-100 (СССР)

лишь для решения специальных задач.

В качестве корпусного материала титановые сплавы ПТ-3 и ПТ-3В использовали также при строительстве атомных подводных лодок:

проект 685 — «Плавник» (по классификации НАТО — «Mike»), К-278 «Комсомолец»: рабочая глубина погружения — 1000 м, предельная — 1250 м; полная скорость подводного хода 30,6 уз.; нормальное водоизмещение — 5680 м<sup>3</sup>;

проекты 705 и 705К — «Лира» (по классификации НАТО — «Alfa»): рабочая глубина погружения — 350 м; предельная — 400 м; полная скорость подводного хода — 41 уз.; нормальное водоизмещение — 2300 м<sup>3</sup> (построено 6 шт.);

проект 661 — «Анчар» (по классификации НАТО — «Papa»): предельная глубина погружения — 400 м; полная скорость подводного хода — 44,7 уз. (такая скорость и до настоящего времени является абсолютным мировым рекордом для подводных лодок); нормальное водоизмещение — 5197 м<sup>3</sup> (построен один атомоход);

проект 10831 — атомная глубоководная станция первого ранга АС-12 — исследовательская подводная лодка, лишённая вооружения (по классификации НАТО — «Norsus-5»): корпус выполнен из титанового сплава и рассчитан на глубину погружения более 1000 м; нормальное водоизмещение — 1600 м<sup>3</sup>; полная скорость подводного хода — 30 уз. (спущена на воду в августе 1995 г.).

Прочные корпуса указанных подводных лодок представляют собой полностью сварные пространственные конструкции из титановых сплавов большой толщины. Послесварочная термическая обработка (остаточные сварочные напряжения дости-

гают 40 %  $\sigma_{0,2}$ ) таких конструкций невозможна из-за больших габаритов и массы. Замедленное разрушение и коррозионное растрескивание на корпусах не наблюдались благодаря рациональному конструированию и правильному выбору технологии сварки, а также высоким показателям пластичности корпусных материалов и культуре производства.

На рис. 5 приведен внешний вид самолета SR-71A, планер которого изготовлен на 95 % из титановых сплавов. Его летно-технические данные следующие: размах крыла — 16,95 м; длина — 32,74 м; высота — 5,64 м; взлетная масса номинальная — 63505 кг, максимальная 77110 кг; максимальное число Маха — 3,0; максимальная скорость на высоте 24000 м — 3220 км/ч; практический потолок — 24400 м; радиус действия — 1930 км; продолжительность полета — 15 ч. Применение титана обусловлено высоким аэродинамическим нагревом самолета при длительных полетах на большой скорости. Изготовлено 24 самолета. На рис. 6 приведен внешний вид самолета Сухой СуТ-100, планер которого изготовлен более чем на 90 % из титановых сплавов. Максимальное число Маха составляет 2,8. В разработке технологии сварки принимали участие сотрудники ИЭС им. Е. О. Патона [30].

Одна из фирм США изготовила крупнейший в мире реактор из титанового сплава для химической промышленности. Верхнее днище реактора выполнено из технически чистого титана марки Grade 2 (см. табл. 1), а центральная часть — из сплава Grade 3. Применение титана для изготовления корпуса реактора взамен стали, плакированной титаном, позволило уменьшить толщину стенок, сократить объем работ на всех этапах производства почти в 2 раза, снизить массу изделий и сократить издержки по обслуживанию за время их эксплуатации. В результате был создан аппарат более экономичный по сравнению с изготовленным из стали. Длина корпуса аппарата — 46 м, диаметр — 3 м, объем — 1080 м<sup>3</sup>, общая масса — 156500 кг (в том числе собственно корпуса — 110000 кг, внутренних устройств — 46500 кг).

Крупнейшим аппаратом из титанового сплава АТЗ в отечественной практике был гидролизный аппарат вместимостью 160 м<sup>3</sup>, представлявший собой сварной сосуд с верхним эллиптическим и нижним коническим днищами. Корпус аппарата диаметром 3,8 м и высотой 17,07 м выполнен из



Рис. 7. Общий вид (а) и фрагмент (б) памятника первому космонавту Земли Ю. А. Гагарину



Рис. 8. Главная спортивная арена с покрытием из титана в парке г. Оита

листов сплава АТЗ толщиной 26 мм, внутренние устройства — из листов толщиной 3; 6 и 12 мм. При изготовлении аппарата использовали различные способы сварки неплавящимся электродом в инертных газах.

Благодаря уникальным свойствам и высокой коррозионной стойкости в атмосферных условиях титан нашел применение в монументальной скульптуре. Так, в Москве установлены две скульптуры из титана: монумент покорителям космоса, открытый 18 августа 1964 г. в честь запуска первого искусственного спутника земли, облицован полированными листами из технического титана ВТ1-0 и памятник первому космонавту Земли Ю. А. Гагарину, открытый 4 июля 1980 г. на Калужской площади, выполнен из монолитного титана (скульптор П. Бондаренко, архитекторы Я. Белопольский и Ф. Гажевский) (рис. 7).

Титан также широко используется в архитектуре несмотря на то, что его стоимость значительно выше, нержавеющей стали. Он применяется для внутренних декоративных работ в тех случаях, когда его мягкий серый цвет предпочтительнее яркого серого цвета нержавеющей стали. Благодаря своей высокой удельной прочности, высокому сопротивлению коррозии и незначительным расходам на обслуживание титан используется и для внеш-

них работ. Это экономически оправдано, поскольку он имеет длительный срок эксплуатации и мало подвержен влиянию окружающей среды [31, 32]. Так, здание Научного центра, открытого в 2000 г. в Глазго (Англия), имеет кровлю площадью 6000 м<sup>2</sup>, выполненную из титановых листов толщиной 0,3 мм. В Оита (Япония) титан использован для покрытия главной спортивной арены в парке (1999 г.) (рис. 8). Его расход для сооружения крыши в Японии составил 1300 т.

Благодаря своим уникальным свойствам титан находит применение в автомобилестроении, при строительстве судов малого каботажного флота и корпусов яхт, а также при производстве товаров народного потребления [31]. Используется для изготовления теплообменной аппаратуры АЭС, подводных крыльев, гребных винтов, напряженных элементов донной части морских платформ, буровых труб и др.

Низкая биологическая активность по отношению к плазме крови делает его перспективным для изготовления медицинского и бытового оборудования. Малый вес, неаллергенные свойства и высокое сопротивление коррозии при контакте с химическими веществами открыли его как материал для медицинских имплантатов и инвалидных колясок [32].

Расширяется область применения титана, в особенности его высококоррозионностойких легированных сплавов, также в химической и нефтехимической промышленности [33].

1. Горынин И. В., Чечулин Б. Б. Титан в машиностроении. — М.: Машиностроение, 1990. — 400 с.
2. *Materials properties handbook. Titanium alloys.* — S. I.: ASM International (The Materials Information Society), 1994. — 1176 p.
3. *Titanium* / В. А. Гармата, А. Н. Петрунько, Н. В. Галицкий и др. — М.: Металлургия, 1983. — 559 с.
4. *Technology trend of titanium sponge and ingot production* / S. Kasamura, E. Fukasawa, S. Ampo et al. // Nippon Steel

- Technical Report № 85. — 2002. — № 1. — P. 31–35.
5. *Электронно-лучевая плавка* / Б. Е. Патон, Н. П. Тригуб, Д. А. Козлитин и др. — Киев: Наук. думка, 1997. — 265 с.
  6. *Развитие технологии электронно-лучевой плавки титана* / Б. Е. Патон, Н. П. Тригуб, В. Н. Замков и др. // Пробл. спец. электрометаллургии. — 2000. — № 2. — С. 35–40.
  7. *Жадкевич М. Л., Лихобаба А. В.* Выбор режимов плазменно-дугового рафинирующего переплава титановых заготовок // Там же. — 1998. — № 2. — С. 26–30.
  8. *ESR for titanium: yesterday, today, tomorrow* / В. Е. Патон, В. I. Medovar, M. G. Benz et al. // Proc. of 9th World titanium conf., St. Petersburg, June 7–11, 1999. — St. Petersburg, 1999. — P. 1385–1398.
  9. *Development of low cost powder metallurgy process of titanium alloy products* / Н. Fujii, K. Fujisawa, K. Takahashi et al. // Nippon Steel Technical Report № 85. — 2002. — № 1. — P. 77–81.
  10. *Резниченко В. А., Гончаренко Т. В., Резниченко Е. А.* Металлотермическое получение титана // Технология металлов. — 2002. — № 11. — С. 2–7.
  11. *А. с. 188278 СССР, МПК В 23 К 36/01.* Электродная проволока для сварки титановых сплавов / В. Е. Блащук, С. М. Гуревич, Ф. Р. Куликов и др. — Оpubл. 20.10.66; Бюл. № 21.
  12. *А. с. 203449 СССР, МПК В 23 К 36/01.* Электродная проволока для сварки титановых сплавов / В. Е. Блащук, С. М. Гуревич, Н. А. Кушниренко. — Оpubл. 28.11.67; Бюл. № 20.
  13. *Колачев Б. А., Рынденков Д. В.* Титановые сплавы, легированные железом // Обработка легких и специальных сплавов. — М.: ВИЛС, 1996. — С. 134–148.
  14. *Исследование экономолегированных титановых сплавов* / В. Л. Радионов, Т. В. Ишункина, В. Н. Моисеев и др. // Технология легких сплавов. — 1997. — № 1. — С. 59–61.
  15. *Свариваемые сплавы системы Ti–Al–Fe–Nb–Zr* / В. Н. Замков, В. Ф. Топольский, И. К. Петриченко и др. // Автомат. сварка. — 1998. — № 3. — С. 23–27.
  16. *Fujii H., Takahashi K.* Development of high performance Ti–Fe–Al alloy series // Nippon Steel Technical Report № 85. — 2002. — № 1. — P. 113–117.
  17. *Штамповка, сварка, пайка и термообработка титана и его сплавов в авиастроении* / Под ред. А. Г. Братухина. — М.: Машиностроение, 1997. — 600 с.
  18. *Изготовление и эксплуатация оборудования из титана* / Г. М. Шеленков, В. Е. Блащук, Р. К. Мелехов и др. — Киев.: Техніка, 1984. — 120 с.
  19. *Металлургия и технология сварки титана и его сплавов* / С. М. Гуревич, В. Н. Замков, В. Е. Блащук и др. — Киев: Наук. думка, 1986. — 240 с.
  20. *Электронно-лучевая сварка* / О. К. Назаренко, А. А. Кайдалов, С. Н. Ковбасенко и др. / Под ред. Б. Е. Патона. — Киев: Наук. думка, 1987. — 256 с.
  21. *Гуревич С. М.* Справочник по сварке цветных металлов. — Киев: Наук. думка, 1990. — 512 с.
  22. *Zamkov V. N., Prilutskii V. P., Shevelev A. D.* Metallurgy and technology of welding titanium alloys. — Amsterdam, 1992. — Vol. 2., Pt. 1. — 39 p. — (Sov. Tech. Rev. C. Weld and Surf.).
  23. *Плазменная сварка титановых сплавов* / В. Е. Блащук, Л. М. Оноприенко, Г. М. Шемленков и др. // Автомат. сварка. — 1993. — № 3. — С. 31–33.
  24. *American Welding Society. Welding handbook.* — Vol. 4. — Miami: American Welding Society, 1998. — 621 p.
  25. *Неровный В. М.* Дуговая сварка в вакууме титановых сплавов // Технология машиностроения. — 2001. — № 2. — С. 27–30.
  26. *Nd: YAG laser welding of pure titanium to stainless steel* / Н. Н. Hitoshi, F. Kenichi, O. Konsaku et al. // Quarterly J. of the Japan Welding Society. — 2002. — 19, № 4. — P. 716–726.
  27. *Диффузионная сварка титана и его сплавов* / А. В. Бондарь, В. В. Пешков, Л. С. Киреев, В. В. Шурупов. — Воронеж: Изд-во Воронеж. гос. ун-та, 1998. — 256 с.
  28. *Mechanical properties of friction welds in high strength titanium alloys* / A. Wisbey, H. Wallis, H. S. Ubhi et al. // Proc. of 9th World titanium conf., St. Petersburg, June 7–11, 1999. — St. Petersburg, 1999. — P. 1718–1725.
  29. *Ильин В. Е., Колесников А. И.* Подводные лодки России: Иллюстрир. справ. — М.: ООО «Изд-во Астрель»; ООО «Изд-во АСТ», 2002. — 286 с.
  30. *Foszination Flugzeuge.* — London: Aerospace publ., Ltd., 1992. — 368 p.
  31. *Gorin V. V.* Titanium in the art of the XXI century // Proc. of 9th World titanium conf., St. Petersburg, June 7–11, 1999. — St. Petersburg, 1999. — P. 1268–1274.
  32. *Application of titanium to construction, civil engineering and ocean development* / K. Kimura, K. Kinoshita, K. Tokuno et al. // Nippon Steel Technical Report № 85. — 2002. — № 1. — P. 6–10.
  33. *Blashchuk V. E.* Corrosion of titanium alloy welded joints. — 1996. — Vol. 6, Pt. 3. — 130 p. — (Welding and Surfacing Rev.).

Advantages of titanium and its alloys compared to the currently available traditional materials are demonstrated. Processes of producing titanium and its alloys used in industry are described, as well as their welding processes and applied welding consumables. The most promising and significant cases of application of titanium and its alloys are described.

Поступила в редакцию 19.06.2003,  
в окончательном варианте 22.09.2003

## НОВОСТИ НКМЗ

### НКМЗ завершает реализацию крупного энергетического проекта

*Новокраматорский машиностроительный завод завершает выполнение своих обязательств по участию в реализации крупного международного энергетического проекта. Они были определены контрактом, заключенным весной прошлого года с немецкой фирмой «Нордекс», который предусматривает изготовление уникальных роторных валов для тринадцати ветровых электростанций северной Европы.*

*К десяти уже отгруженным роторным валам претензий у заказчика не было. Три последних находятся в стадии изготовления и будут поставлены уже в первом квартале текущего года. В реализации проекта, помимо немецкой фирмы и НКМЗ, участвуют также известные компании Норвегии и Дании.*

*Самый северный парк энергии ветра в мире создается на северном побережье Норвегии, южнее мыса Нордкап и является наилучшим местом образования ветра в Европе. При средней скорости ветра более 9 м/с, парк энергии ветра (имеются в виду ветроэнергетические установки) общей мощностью 40 МВт сможет вырабатывать до 120 ГВт·ч электроэнергии ежегодно.*