



ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТИТАНА В АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ УКРАИНЫ

Б. Е. Патон, Н. П. Тригуб, С. В. Ахонин

Рассмотрены перспективы использования титановых сплавов в качестве конструкционных материалов для атомного машиностроения. Показано, что их применение позволит увеличить срок службы теплообменных аппаратов и корпуса реактора до проектного срока эксплуатации перспективных АЭС нового поколения. Подтверждено высокое качество полуфабрикатов титановых сплавов, полученных в Украине с использованием технологии электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью.

Prospects of application of titanium alloys as structural materials for the nuclear power engineering are considered. It is shown that their application will allow increasing the service life of heat exchangers and reactor bodies up to designed service life of challenging nuclear power stations of the new generation. The high quality of semi-products of titanium alloys, produced in Ukraine with use of technology of electron beam cold hearth melting was confirmed.

Ключевые слова: титановые сплавы; электронно-лучевая плавка; теплообменник

Прогресс современной техники в значительной степени зависит от применения конструкционных материалов с более высокими значениями эксплуатационных свойств. К таким металлическим материалам относятся титан и сплавы на его основе. Благодаря высокому уровню удельной прочности, коррозионной стойкости в большинстве агрессивных сред (сопоставимой с коррозионной стойкостью такого металла, как платина) и ряда других уникальных свойств, титановые сплавы нашли широкое применение в аэрокосмической технике, судостроении, химическом машиностроении и энергетике, в том числе атомной.

Критическим элементом атомных энергетических установок, работоспособность которого ограничивает срок службы всей установки, является трубная арматура теплообменных аппаратов. Традиционно применяемые в Украине медные, медно-никелевые и коррозионно-стойкие стали аустенитного класса из-за эксплуатации в условиях высокой температуры и агрессивной среды не обеспечивают необходимого ресурса работоспособности, требуют частого ремонта и замены.

Важной проблемой энергетики Украины является повышение надежности и безопасности эксплуатации теплообменного оборудования (парогенераторов, конденсаторов и др.) путем обеспечения высокой коррозионной стойкости трубных систем в средах с повышенным содержанием солей и абразивными взвесями. Сорокалетний зарубежный опыт

свидетельствует, что эту задачу можно успешно решить при помощи теплообменной аппаратуры для атомных и других энергетических установок, изготовленной из титановых сплавов, гарантирующих их высокий рабочий ресурс [1].

В Украине имеются значительные запасы титановых руд наивысшего качества, добываемых и обогащаемых на Иршанском и Вольногорском горно-обогатительных комбинатах, а из полученного концентрата на КП «Запорожский титано-магниевого комбинат» производят до 9000 т в год металлического губчатого титана. За последние 15 лет в Украине на базе технологии электронно-лучевой плавки создано промышленное производство слитков титана и его сплавов, из которых на металлургических предприятиях освоено производство титановых полуфабрикатов различного сортамента (отливки, поковки, прутки, трубы и др.). Таким образом, титановая отрасль Украины позволяет производить весь спектр титановой продукции — от руды до полуфабрикатов и конечных изделий.

Разработанная в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины технология электронно-лучевой плавки титана и сплавов на его основе с применением промежуточной емкости (ЭЛПЕ) в качестве исходной шихты позволяет использовать как нескомпактированный губчатый титан (рис. 1, а), так и прессованные брикеты из губчатого титана (рис. 1, б). Технология имеет ряд существенных преимуществ, по сравнению с традиционной вакуумно-дугового переплава [2].

Технология ЭЛПЕ обеспечивает гарантированное удаление тугоплавких включений высокой и

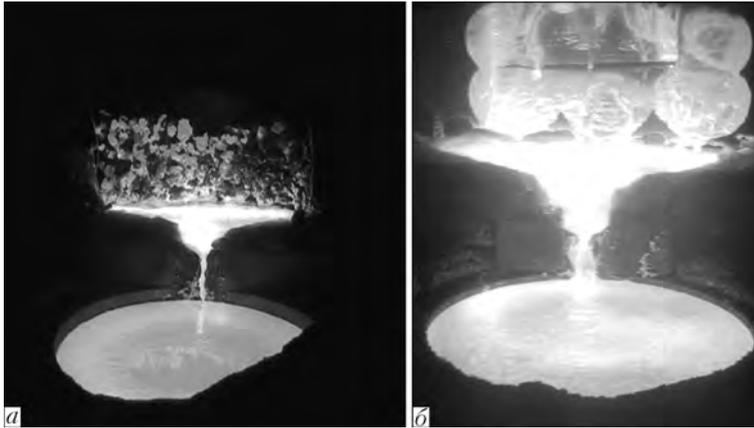


Рис. 1. Процесс плавки губчатого титана в электронно-лучевой установке с промежуточной емкостью: *а* – некомпактированная шихта; *б* – прессованные брикеты

низкой плотности. Плавку осуществляют в вакууме 0,10...0,01 Па, что практически исключает дополнительное загрязнение титана газовыми примесями. Технология ЭЛПЕ позволяет выплавлять слитки как круглого, так и квадратного сечений, а также слитки-слябы, обеспечить не только хорошую очистку от вредных примесей и неметаллических включений, но и значительное улучшение структуры слитка, а кроме того, — повышение коррозионной стойкости металла [3] (табл. 1).

Следует отметить, что повышение качества титановых слитков (исходного звена для производства полуфабрикатов), одновременно со снижением их стоимости, является важнейшей задачей, определяющей дальнейшее успешное применение титана в промышленности, в частности, в атомном машиностроении.

Для оценки качества труб, произведенных из титановых слитков, полученных способом ЭЛПЕ, на трубных предприятиях Украины проведены комп-

лексные работы по производству опытных партий труб различного сортамента (рис. 2). Из титановых слитков диаметрами от 300 до 600 мм способом горячей деформации изготовили передельные трубы диаметром 90...140 мм [4].

С целью снижения себестоимости труб и повышения выхода годного металла путем исключения операцийковки и последующей механической обдирки поковки непосредственно из литого слитка диаметром 110...200 мм способами горячей прокатки или прессования изготовили трубы диаметрами соответственно 108 и 89 мм и толщиной стенки 15 и 11 мм [4, 5].

Определение уровня прочностных и пластичных характеристик металла различных партий титановых труб показало, что механические свойства труб полностью отвечают требованиям стандартов (табл. 2). При этом различий в значениях механических свойств холоднокатаных труб, изготовленных из деформированного металла или литой заготовки, не обнаружено.

С целью опытно-промышленной проверки возможности использования труб из титановых сплавов для изготовления теплообменников АЭС из полученных на производственных мощностях ГП «НПЦ «Титан» ИЭС им. Е. О. Патона» слитков трубных титановых сплавов Grade 12 (рис. 3) и ПТ-7М изготовили партию холоднокатаных труб диаметром 16 мм и толщиной стенки 0,5 мм. Анализ результатов испытаний механических свойств труб из сплава ПТ-7М (табл. 3) показал, что они полностью соответствуют требованиям ГОСТ 22897–86.

Таблица 1. Скорость коррозии i_k сплава ВТ1-0 до и после ЭЛПЕ

Условия испытаний	i_k , мм/год	
	ВДП	ЭЛПЕ
10 % H ₂ SO ₄ , 25 °С, выдержка 336 ч	0,3591	0,2814
	0,4101	0,2998
10 % HCl, 25 °С, выдержка 336 ч	0,2844	0,1800
	0,3202	0,1818
0,9 % H ₂ SO ₄ , 50 °С, выдержка 100 ч	0,0033	0,0013
	0,0036	0,0013
Морская вода, 40 °С, выдержка 1000 ч, без нагрузки	0,0005	0,0001
	0,0006	0,0003
Морская вода, 40 °С, выдержка 1000 ч, нагрузка 0,9 $\sigma_{0,2}$	0,0008	0,0002
	0,0008	0,0003

Примечание. В числителе дана минимальная, знаменателе — максимальная скорость коррозии.



Рис. 2. Трубы горячекатаные из титана ВТ1-0 и холоднодеформированные из титанового сплава ПТ-7М различного сортамента



Таблица 2. Механические свойства труб из титана марки ВТ1-0, полученного способом ЭЛПЕ

Марка сплава	σ_B , МПа	σ_T , МПа	δ , %	ψ , %	a_n , Дж/м ²
<i>Горячекатаные диаметром 108 мм и толщиной стенки 15 мм</i>					
ВТ1-0	445... 475	385... 410	26... 34	64... 75	22... 25
ГОСТ 21945-76	343... 568	>245	>20	>42	Не нормируется
<i>Холоднокатаные диаметром 38 и толщиной стенки 2 мм</i>					
ВТ1-0	450... 550	310... 420	30... 40	56... 64	20... 25
ГОСТ 22897-86	343... 568	>216	>24	Не нормируется	Не нормируется

Для дальнейшего снижения себестоимости и трудоемкости изготовления слитков титана по первичному сырью (губки в виде крицы), а также повышения качества титановых слитков в ИЭС им. Е. О. Патона разработана технология переплава недробленых блоков губчатого титана в специализированной электронно-лучевой установке с промежуточной емкостью (рис. 4), позволяющая уменьшить себестоимость титановых слитков на 10 % [6].

Значительного удешевления титановых труб можно достичь при использовании сварных труб вместо цельнотянутых. Для производства заготовки под прокатку титанового штрипса в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины разработана технология выплавки в электронно-лучевой установке с промежуточной емкостью слитков-слябов (рис. 5).

Использование слитков-слябов позволяет исключить из технологической цепочки получения титанового проката капиталоемкую и энергозатратную операцию перековывания цилиндрических слитков на слябы. Механические свойства горячекатаного листа целиком отвечают требованиям стандартов (табл. 4). Использование слитков-слябов вместо цилиндрического слитка дало возможность увеличить выход годного металла на 10% и снизить себестоимость титановых листов на 20%.

В промышленных масштабах производство титановых труб нужного сортамента для теплообменного оборудования, а также морских платформ по добыче нефти и газа и других отраслей промышленности может быть организовано на ГП «Днепропетровский завод прецизионных труб» из литых



Рис. 3. Внешний вид слитка титанового сплава Grade 12 диаметром 600 мм

Таблица 3. Механические свойства холоднокатаных труб диаметром 16 мм и толщиной стенки 0,5 мм из титанового сплава ПТ-7М, полученного способом ЭЛПЕ

Марка сплава	σ_B , МПа	σ_T , МПа	δ , %
ПТ-7М	580... 660	270... 360	26... 32
ГОСТ 22897-86	470... 666	<372	>20

трубных заготовок, изготовленных в ГП «Научно-производственный центр «Титан» ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины».

В ИЭС им. Е. О. Патона выполнили комплекс исследований по созданию новых хорошо свариваемых титановых сплавов, значения характеристик которых превышают таковые существующих титановых сплавов, а также промышленной технологии изготовления этих сплавов.

На основании данных исследований разработали среднелегированный титановый сплав СП15 (Ti-4Al-2,5Mo-3,5Nb-2,5V-1,5Zr), который по уровню механических и коррозионных свойств (табл. 5), а также свариваемости превосходит широко известный титановый сплав ВТ6 (Ti-6Al-4V). Кроме того, в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины создан новый высокопрочный ($\alpha+\beta$)-сплав Т-110 (Ti-5Al-1Mo-1V-5Nb-1Fe-0,3Zr), полуфабрикаты из которого имеют прочность свыше 100 МПа при пластичности более 11 %.

Механические характеристики титанового сплава Т-110 после различных режимов термического упрочнения (толщина 5... 25 мм) следующие: $\sigma_B = 1100... 1450$ МПа; $\sigma_T = 1050... 1370$ МПа; $\delta = 10... 18$ %; $\gamma = 30... 58$ %; $a_n = 17... 30$ Дж/м².

Одно из основных направлений технического развития атомной энергетики — создание энергоб-

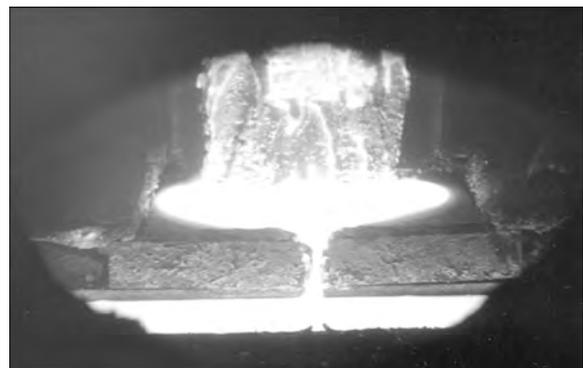


Рис. 4. Процесс электронно-лучевой плавки недробленого блока губчатого титана

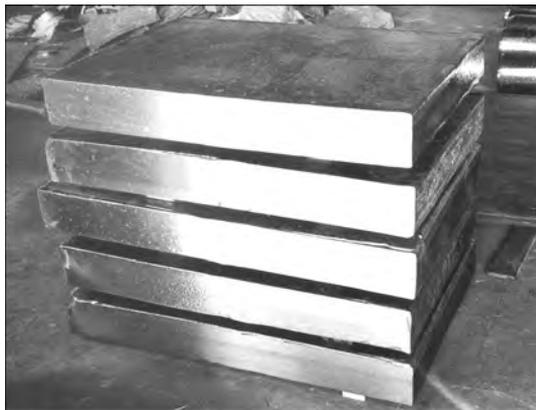


Рис. 5. Слябы размерами 160×950×1800 мм из титанового сплава BT1-0, полученные способом ЭЛПЕ

Таблица 4. Средние значения механических характеристик горячекатаного листа толщиной 6 мм, полученного из слябов ЭЛПЕ

Марка сплава	σ_B , МПа	σ_T , МПа	δ , %	γ , %
BT1-0	415... 475	340... 385	24... 40	58... 65
ГОСТ 22178-76	375... 540	Не определяли	>20,0	Не определяли
ПТ-3В	770... 820	710... 730	12... 14	29... 36
ГОСТ 23755-79	<882	Не определяли	>10,0	Не определяли

Таблица 5. Коррозионная стойкость титанового сплава системы Ti-Al-Mo-Nb-V-Zr

Марка сплава	i_k (выдержка 500 ч при 20 °C), мм/год, в растворе кислоты (%)			
	соляной		серной	
	5	10	5	10
BT1-0	0,0050	0,1020	0,0045	0,0091
Ti-4Al-2,5Mo-3,5Nb-2,5V-1,5Zr	0,0002	0,0083	0,0002	0,0005

локов водо-водяных реакторов повышенной мощности (типа ВВЭР-1500), а также увеличенных ресурса и срока эксплуатации (до 60 лет и более). Особо важным при решении этой задачи является увеличение ресурса работы корпуса реактора, который в процессе эксплуатации подвергается активному нейтронному облучению.

Применяемые в настоящее время корпусные реакторные стали склонны к хладноломкости, непрерывно возрастающей в процессе эксплуатации вследствие облучения, что приводит к повышению вероятности хрупкого разрушения в области положительных температур (>20 °C) [7].

Проведенные в ЦНИИ КМ «Прометей» исследовательские работы показали, что титан и сплавы на его основе характеризуются более высокой радиационной стойкостью, чем существующие корпусные реакторные стали, что позволяет увеличить

срок безопасной эксплуатации корпуса реактора до 60 лет и более. При этом титан имеет уникально низкую склонность к радиационной активизируемости и отличается быстрым спадом наведенной радиоактивности, что в будущем позволит ускорить и удешевить процесс вывода реактора из эксплуатации. Кроме того, высокий уровень коррозионной стойкости титана даст возможность упростить конструкцию корпуса реактора [8, 9].

Выводы

1. Показано, что титан и сплавы на его основе являются перспективными конструкционными материалами для атомного машиностроения, применение которых позволит увеличить срок службы теплообменных аппаратов и корпуса реактора до проектного срока эксплуатации перспективных АЭС нового поколения.

2. В Украине создан полный металлургический цикл производства титана; выплавка слитков базируется на прогрессивной технологии ЭЛПЕ.

3. В ИЭС им. Е. О. Патона разработаны отечественные титановые сплавы, отличающиеся повышенными механическими и физическими характеристиками при хорошей свариваемости.

4. В Украине разработана технология и налажено производство труб в широком диапазоне размеров. Механические свойства поковок, листа, прутков и труб, изготовленных из титановых слитков, полученных способом ЭЛПЕ, отвечают требованиям отечественных и зарубежных стандартов.

1. Александров А. В., Прудковский Б. А. Разные грани титана и его сплавов // Титан. — 2005. — № 1. — С. 64–70.
2. Электронно-лучевая плавка титана / Б. Е. Патон, Н. П. Тригуб, С. В. Ахонин, Г. В. Жук. — Киев: Наук. думка, 2006. — 248 с.
3. Электронно-лучевая плавка / Б. Е. Патон, Н. П. Тригуб, Д. А. Козлитин, С. В. Ахонин и др. — Киев: Наук. думка, 1997. — 265 с.
4. Калинин А. Н., Козловец О. Н., Ахонин С. В. Производство полуфабрикатов из титановых сплавов, полученных методом электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью // Пробл. спец. электрометаллургии. — 2002. — № 2. — С. 25–28.
5. Исследование процесса изготовления горячекатаных и холоднодеформированных труб из литой недеформированной трубной заготовки титанового сплава BT1-0, полученной электронно-лучевой плавкой / Н. П. Тригуб, Г. В. Жук, А. А. Чепинский и др. // Современ. электрометаллургия. — 2006. — № 2. — С. 25–28.
6. Электронно-лучевая плавка недробленых блоков губчатого титана / Н. П. Тригуб, С. В. Ахонин, Г. В. Жук и др. // Там же. — 2006. — № 4. — С. 6–9.
7. Рыбин В. В., Ушков С. С., Кожевников О. А. Роль титановых сплавов на новом этапе развития атомной энергетики // Титан-2008 в СНГ: Тр. междунар. конф. (Санкт-Петербург, 18–21 мая 2008 г.). — СПб., 2008. — С. 11–24.
8. Сплавы на основе титана как перспективные материалы для ЯЭУ / О. А. Кожевников, В. В. Рыбин, С. С. Ушков, Г. П. Карзов // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Материаловедение и новые материалы. — 2004. — Вып. 1. — С. 176–182.
9. Рыбин В. В., Ушков С. С., Кожевников О. А. Сплавы на основе титана — перспективные материалы для атомной энергетики // Вопросы материаловедения. — 2006. — № 1. — С. 159–168.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев
Поступила 08.04.2009