

# Титанический труд: к 60-летию развития титановых технологий в России



**А. С. Орыщенко,**  
д. т. н., профессор,  
генеральный директор



**В. П. Леонов,**  
д. т. н., с. н. с.,  
зам. генерального директора



**В. И. Михайлов,**  
д. т. н., с. н. с.,  
начальник лаборатории

**ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей» им. И. В. Горынина Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»)**

[mail@crism.ru](mailto:mail@crism.ru)

*В статье изложены основные этапы разработки титановых сплавов и технологий изготовления из них полуфабрикатов и сварных соединений. Рассмотрены перспективные исследования, связанные с разработкой более прочных морских титановых сплавов, снижением их стоимости и расширением областей применения титана. Определена роль в развитии этого направления ЦНИИ КМ «Прометей» (сегодня НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»).*

**Ключевые слова:** титановые сплавы, морская техника, атомная энергетика.

## Введение

Освоение титана и его сплавов в России осуществлялось в несколько этапов. Первый этап, относящийся к 1950-м гг., характеризовался началом освоения промышленной технологии изготовления титановых полуфабрикатов. В этот период весь изготовленный промышленный титан предназначался только для авиастроения и космической техники. С начала 1960-х гг. к потребителям этого материала присоединилась новая отрасль промышленности – судостроение. Проектантов морской техники привлекли такие уникальные свойства, как высокая удельная прочность, высокая коррозионная стойкость в морской воде, немагнитность. Однако разработанные для авиакосмической техники титановые сплавы по ряду характеристик не удовлетворяли требованиям морской техники. Морские конструкции требовали сплавов в виде крупногабаритных полуфабрикатов, обладающих хорошей свариваемостью, не требующих термической обработки после сварки, хорошей обрабатываемостью и другими необходимыми для строительства крупногабаритных конструкций технологическими характеристиками. Разработка морских титановых

сплавов и технологии их производства была поручена Министерством судостроительной промышленности научно-исследовательскому институту «Прометей» (ныне НИЦ «Курчатовский институт – ЦНИИ КМ «Прометей»). С этого момента начался второй этап освоения титана, который продолжался более 30 лет. На этом этапе были выполнены технологические разработки, позволившие обеспечить строительство большого количества крупногабаритных конструкций подводной морской техники, построено и находилось в эксплуатации максимальное количество цельнотитановой морской техники.

К третьему этапу следует отнести период с начала 1990-х гг., когда появились новые области применения сплавов, такие как энергомашиностроение (включая атомную энергетику), химическая, нефтегазодобывающая и другие отрасли промышленности. Лидером этого этапа освоения титана, также как и при создании морских титановых сплавов, стал НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», который сегодня является ведущим материаловедческим центром РФ, широко известным в мире своими научно-техническими разработками и выполняющим инновационные проекты государственного значения.

## Производство титановых полуфабрикатов

Если для аэрокосмической техники полуфабрикаты изготавливали из слитков массой 250-400 кг, то для полуфабрикатов судовых конструкций требовались слитки в 8-10 раз большей массы. В результате выполнения большого объема теоретических и экспериментальных работ при активном участии специалистов-прометеевцев и других предприятий была разработана технология плавки титана, позволившая освоить на ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА» производство крупногабаритных слитков массой до четырех, а в дальнейшем и до 10 т [1]. В настоящее время предприятие осваивает производство слитков массой до 17 т (рис. 1).

Специалисты «Прометей» разработали новые технологии: изготовления различных полуфабрикатов (листов, поковок, профилей, труб, отливок и других) [2], защиты слитков от окисления при нагреве перед прокаткой и ковкой, а также удаления поверхностного газонасыщенного слоя. Для тонких листов была решена проблема водородного растрескивания. Большой объем работ был выполнен по разработке технологии производства холоднодеформированных труб для парогенераторов [3]. Технология имела ряд особенностей и включала обязательную обточку наружной и внутренней поверхностей после горячей прошивки и раскатки, искусственное наведение оксидной пленки для получения бездефектной поверхности в процессе холодной прокатки, травление для удаления окалины и альфированного слоя. Производство холоднодеформированных труб по новой технологии осваивали на Никопольском Южно-трубном заводе (ЮТЗ), Украина. Сегодня в рамках реализации программы импортозамещения разработаны технологии и освоено производство холоднодеформированных труб в России на ОАО «Машиностроительный завод» (г. Электросталь) и ОАО «Чепецкий механический завод» (г. Глазов) [4].

В период 1960-1968 гг. в нашем институте были разработаны и внедрены в производство технологии фасонного литья для изделий судостроения, созданы проекты вакуумно-дуговых плавильных печей от

«Невы-2» до «Невы-6» [5]. Специалисты института участвовали в проектировании, подготовке строительства и оснащении оборудованием цеха титанового литья на ОАО «Завод им. А. М. Горького» (г. Зеленодольск). Титановое фасонное литье широко используется в конструкциях судового машиностроения (арматура, гребные винты и др.) (рис. 2).

## Сварка титановых сплавов

Разработка технологии сварки титановых сплавов выполнялась параллельно с разработкой и освоением технологии изготовления полуфабрикатов. По результатам лабораторных исследований и опытных работ в производственных условиях в качестве основного был принят метод электродуговой сварки в среде инертных газов. С целью обеспечения качественной защиты сварных соединений от окисления были разработаны специальные горелки и газозащитные приспособления. Строго контролировалась чистота инертного газа по примесям и режимы его расхода. Для сварки сложных и труднодоступных узлов использовались спроектированные институтом обитаемые и необитаемые камеры с контролируемой инертной средой. Большое внимание было уделено механизации и автоматизации сварочных процессов, разработана большая серия сварочных автоматов.

Сварка титана с традиционными разделками свариваемых кромок вызывала необходимость выполнения довольно значительных по высоте усиленных швов для обеспечения необходимой прочности. Новые экономичные сварочные технологии — сварка погруженной дугой и сварка по щелевому зазору [6] — значительно уменьшили объем сварки и расход сварочных материалов. При постройке первой в мире цельнотитановой атомной подводной лодки проекта 661 специалисты «Прометей» получили большой опыт сварки титановых конструкций. Он был использован в дальнейшей практике строительства морской техники [1, 2], а Россия прочно заняла место мирового лидера по изготовлению цельнотитановых крупногабаритных конструкций подводной морской техники (рис. 3).



Рис. 1. Титановый слиток

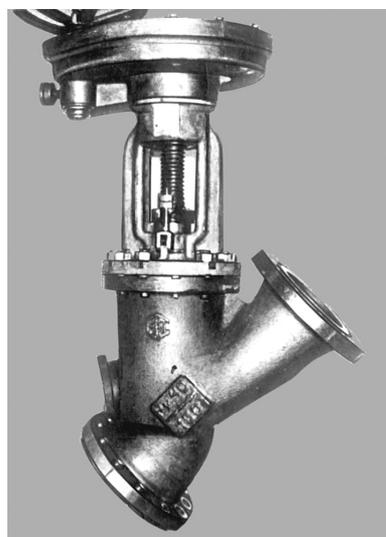


Рис. 2. Судовая титановая арматура

Разработка технологии ЭЛС позволила при сварке больших толщин за один проход обеспечивать большую глубину проплавления при малой ширине шва. Были решены проблемы двухсторонней сварки ЭЛС, связанные с образованием в корне шва дефектов, в основном, в виде удлиненных полостей [7].

Следует отметить также работу института в области создания расчетно-экспериментальных методик оценки работоспособности и долговечности сварных соединений при статическом, малоцикловом и многоцикловом нагружениях. Методики были использованы при разработке конструктивных элементов, экспертных оценках и прогнозировании долговечности сварных соединений, а также при оценках возможности продления срока службы конструкций морской техники. Для судостроительной промышленности обоснованное продление срока службы в настоящее время является особенно актуальной проблемой в связи с сокращением финансирования строительства новых и ремонта находящихся в эксплуатации судов.

На ряде конструкций морской техники было проведено исследование фактического состояния поверхности и механических свойств титановых сплавов и сварных соединений после длительной эксплуатации. Результаты исследования показали отсутствие разрушений, а испытание образцов, вырезанных из металла, — отсутствие изменений механических характеристик по сравнению с соответствующими характеристиками до начала эксплуатации конструкции. Использование этих результатов в совокупности с аналитическими методами прогнозирования позволили обоснованно продлить срок эксплуатации этих конструкций до 50 лет.

## Создание новых композиций сплавов

Развитие титанового направления в судостроении в настоящее время связано с необходимостью обеспечения и повышения тактико-технических характеристик морской техники, что требует разработки новых сплавов и дальнейшего увеличения габаритов полуфабрикатов. Многочисленные исследования с учетом специфики судовых морских конструкций по габаритам, широкому диапазону толщин, большому объему сварки и невозможности для многих узлов

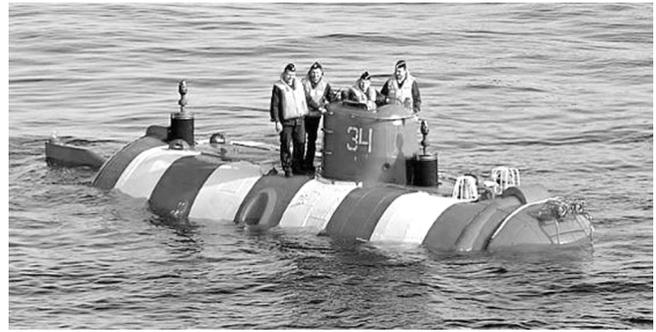


Рис. 3. Глубоководный спасательный аппарат «Приз» из сплава титана

выполнить термическую обработку показали, что для судостроения наиболее приемлемыми являются сплавы, относящиеся к группе  $\alpha$ - и псевдо- $\alpha$ -сплавов. Исследования НИЦ «Курчатовский институт – ЦНИИ КМ «Прометей» в рамках этой группы определили и научно обосновали область легирования морских свариваемых титановых сплавов, ограниченную величинами молибденового и алюминиевого эквивалентов 3 и 8%, соответственно (рис. 4). В указанных пределах легирования на базе большого объема исследований была разработана серия морских сплавов композиций Ti-Al-V, Ti-Al-V-Mo, Ti-Al-Mo [2].

Многочисленные исследования показали, что повышение прочности в титановых сплавах возможно не только за счет легирования, но и за счет формирования различных типов структур (рис. 5). Было установлено, что оптимальным комплексом механических характеристик (прочности, пластичности и вязкости) обладают сплавы со структурой переходного типа (от глобулярной к пластинчатой). Для получения такой структуры разработана технология многостадийной прокатки крупногабаритных плит, которая обеспечивала формирование структуры переходного типа и повышение предела текучести на 50-100 МПа. В дальнейшем теория многостадийной деформации была положена в основу разработки технологии изготовления других типов деформированных полуфабрикатов из титановых сплавов морского назначения (поковок, штамповок, катаных колец и др.).

К настоящему времени в институте разработана серия высокотехнологичных свариваемых сплавов

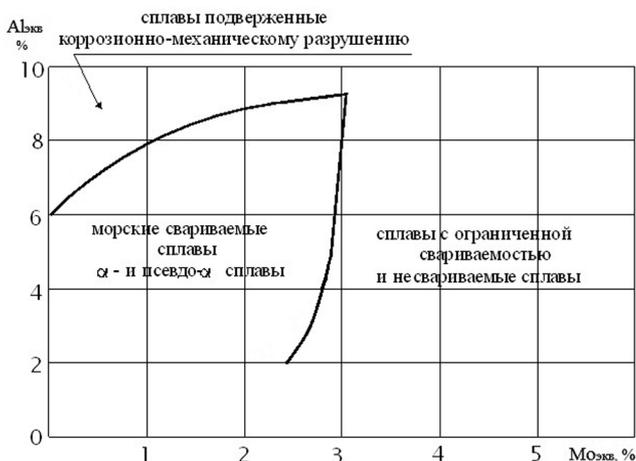


Рис. 4. Область легирования морских титановых сплавов

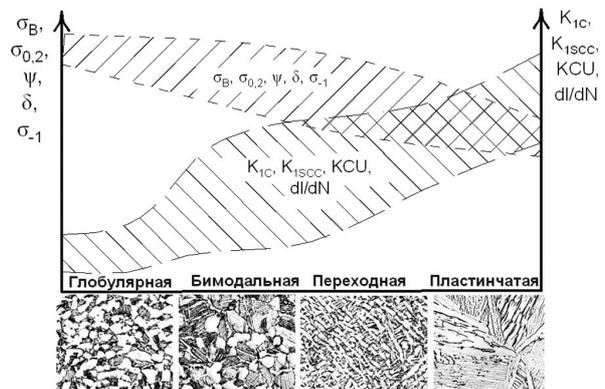


Рис. 5. Взаимосвязь типовых микроструктур морских титановых сплавов с механическими свойствами



Рис. 6. Титановый парогенератор

с пределом текучести от 350 до 850 МПа. Сплавы освоены промышленностью и использованы при строительстве образцов морской техники, как для корпусных конструкций, так и для изделий судового машиностроения и судовой энергетики. В качестве перспективных проектов института следует отметить работы по созданию свариваемых морских титановых сплавов с пределом текучести более 850 МПа и по разработке технологий, обеспечивающих снижение стоимости полуфабрикатов.

## Титан в атомной энергетике

Сегодня титан находит широкое применение и в атомной энергетике благодаря своим свойствам, обеспечивающим хорошую работоспособность в условиях ядерных водо-водяных энергетических установок (ЯЭУ). Он обладает высокой радиационной стойкостью при температурах 250-400°C, малой активностью и быстрым спадом во времени наведенной радиации, высокой коррозионной стойкостью в воде и паре при температуре до 400°C в условиях ядерного облучения, отсутствием коррозионно-механических разрушений и высокими характеристиками кратковременной и длительной прочности при температурах до 400°C. Быстрый спад наведенной радиации титана позволяет подвергать рециклингу конструкции ЯЭУ после выведения их из эксплуатации через 30 лет (для стали этот срок составляет 100-150 лет).

Известно, какую положительную роль сыграли титановые парогенераторы для судовых энергетических установок, позволившие решить проблему применения ЯЭУ для морской техники (рис. 6) [3]. Кроме парогенераторов титановые сплавы, разработанные институтом, применяются для различного оборудования судовых ЯЭУ: трубопроводов, конденсаторов, фильтров очистки, циркуляционных насосов, вспомогательного теплообменного оборудования. Титановые сплавы также широко начинают применяться для теплообменного оборудования стационарных атомных станций, где в качестве охлаждающих сред используется морская вода и соленосодержащие воды внутренних водоемов. В связи с возросшими требованиями к конструкционным материалам по радиационной стойкости, стабильности механических свойств, увеличению срока службы до 60 лет и более рассматривается вопрос об использовании титановых сплавов для корпусов реакторов ЯЭУ малой и средней мощности. Перспективным представляется использование титановых сплавов

в качестве материала корпусов контейнеров (герметичных емкостей) для хранения и транспортировки различных радиоактивных и сопутствующих веществ, помещенных в бетон. Титан, обладая высокой коррозионной стойкостью в природных условиях (атмосфере воздуха, почве, пресной и болотной воде, в морской воде на всех глубинах Мирового океана, в условиях Арктики и Антарктиды), обеспечивает долговременное отсутствие контакта бетона с окружающей средой и соответственно радиационную безопасность.

## Заключение

За 60 лет деятельности НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей» создан в титановом направлении большую серию сплавов морского назначения; разработал технологии изготовления полуфабрикатов и технологии их сварки. Разработки института внедрены при строительстве различных конструкций морской техники. Опыт их эксплуатации показал высокие характеристики работоспособности и долговечности. Дальнейшие работы института связаны с разработкой более прочных морских титановых сплавов, мероприятиями по снижению их стоимости и расширением областей применения титана для других отраслей промышленности (нефтегазодобывающей, химической).

### Список использованных источников

1. С. С. Ушков. Подводная лодка пр. 661 – первая в мире цельнотитановая субмарина//Сб. «По пути созидания». Т. 1. СПб: ЦНИИ КМ «Прометей», 2009. С. 76-94.
2. И. В. Горьнин, В. В. Рыбин, С. С. Ушков, А. С. Кудрявцев, В. И. Михайлов, Б. Г. Ушаков, Э. А. Карасев. Проблемы создания титановых сплавов для подводных лодок//Сб. «Роль российской науки в создании отечественного подводного флота». М.: Наука, 2008. С. 300-311.
3. Б. Б. Чечулин. Парогенераторы – борьба за ресурс//Сб. «По пути созидания». Т. 1. СПб: ЦНИИ КМ «Прометей», 2009. С. 131-147.
4. В. П. Леонов, В. Н. Копылов, Л. П. Ртищева, В. Г. Смирнов, М. В. Егоров. Освоение и особенности технологии производства титановых труб на заводах России//Вопросы материаловедения. № 2. 2014. С. 63-72.
5. Ю. А. Филин. Развитие титанового литья в России//Сб. «По пути созидания». Т. 1. СПб.: ЦНИИ КМ «Прометей», 2009. С. 148-157.
6. А. С. Орыщенко, А. С. Кудрявцев, В. И. Михайлов, В. П. Леонов. Титановые сплавы для морской техники и атомной энергетики//Вопросы материаловедения. 2011. № 1 (65). С. 60-74.
7. В. П. Леонов, В. И. Михайлов, И. Ю. Сахаров, С. В. Кузнецов. Сварка морских высокопрочных титановых сплавов больших толщин//Вопросы материаловедения. 2015. № 1 (81). С. 219-228.

## Titanium direction is sixty years old

**A. S. Oryshchenko**, PhD, Professor, Director General.  
**V. P. Leonov**, PhD, Senior Researcher, Deputy Director General.  
**V. I. Mikhailov**, PhD, Senior Researcher, Department Chief. The Federal State Unitary Enterprise «Central Research Institute of Structural Materials «Prometey» named by I.V. Gorynin of National Research Centre «Kurchatov Institute» (NRC «Kurchatov Institute» – CRISM «Prometey»)

Sixty years have passed since the start of creation in NRC «Kurchatov Institute» – CRISM «Prometey» divisions on working out and nuclear power engineering. The basic stages of working out of titanium alloys and also manufacturing techniques ingots, semi-products and welded connection are considered in the article.

**Keywords:** titanium alloys, marine technics, nuclear power engineering.