



УДК 669.187.526:51.001.57

## ПОЛУЧЕНИЕ ТРУБНЫХ ЗАГОТОВОК ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА VT14 СПОСОБОМ ЭЛП

С. В. Ахонин<sup>1</sup>, В. А. Березос<sup>1</sup>, В. А. Крыжановский<sup>2</sup>,  
А. Н. Пикулин<sup>1</sup>, А. Г. Ерохин<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины.  
03680, Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>2</sup>ООО «РАФФ».  
49000, г. Днепропетровск, ул. Червона, 14, оф. 28. E-mail: raff-titan@ukr.net

<sup>3</sup>ГП «НПЦ «Титан» ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины.  
03028, г. Киев, ул. Ракетная, 26. E-mail: titan.paton@gmail.com

Проведены комплексные работы по изготовлению полуфабрикатов в виде трубных заготовок из слитков титанового сплава VT14, полученных способом ЭЛП. По технологии электронно-лучевого переплава с промежуточной емкостью и порционной подачей металла в водоохлаждаемый кристаллизатор произведены слитки из титанового сплава VT14 диаметром 600 мм, длиной до 3000 мм. Показано соответствие полученных слитков требованиям ТУ 27.5-23712944-005-200 «Заготовка трубная литая из титановых сплавов». Представлены результаты исследований структуры и механических свойств трубных заготовок и горячепрессованных труб, изготовленных из слитков титанового сплава VT14, способом электронно-лучевой плавки. Показано, что электронно-лучевая технология получения слитков сплавов титана может эффективно применяться для изготовления полуфабрикатов для трубного производства. Библиогр. 10, табл. 4, ил. 9.

**Ключевые слова:** титановый сплав; слиток; электронно-лучевая плавка; промежуточная емкость; электронно-лучевое оплавление; кованый прут; трубная заготовка; труба; деформация

Большое влияние на работоспособность труб оказывают условия их эксплуатации: высокие температуры, большие скорости течения различных растворов, наличие коррозионных сред и т. д. Поэтому при выборе конструкционного материала для производства труб важное значение имеют физико-механические свойства материала. Титановые сплавы характеризуются уникальным сочетанием физико-механических свойств: высокими значениями прочности и коррозионной стойкости, низким уровнем плотности, отсутствием склонности к хладноломкости [1].

В настоящее время изделия из титана и его сплавов широко применяются в оборудовании для химической промышленности, машиностроительном производстве, энергетической промышленности, судостроении, они эффективны в качестве космических и авиационных материалов.

Использование полуфабрикатов из титановых сплавов существенно снижает металлоемкость изготавливаемого оборудования. При этом значительно повышается надежность изделий, возрастают сроки

их эксплуатации (до 10...15 раз), уменьшается объем капитальных и текущих ремонтов [2]. Поэтому несмотря на высокую стоимость применение титановых сплавов для производства труб в ряде случаев экономически оправдано.

Традиционно для производства труб из сплавов на основе титана применяют слитки, характеризующиеся крупнозернистой и неоднородной по объему слитка структурой. Электронно-лучевая плавка (ЭЛП) является прогрессивным направлением металлургического производства титановых сплавов, она позволяет более глубоко очищать эти материалы от газовых и летучих металлических примесей, обеспечивает получение изделий с более высокими пластическими свойствами [3].

ЭЛП с промежуточной емкостью дает возможность за счет разделения процессов плавления и кристаллизации обеспечивать однородную мелкозернистую структуру слитка, а также снижать себестоимость титановых изделий в результате использования дешевых исходных шихтовых материалов в виде титановой губки низших сортов и титанового



**Таблица 1. Распределение легирующих элементов и примесей по длине в слитке диаметром 600 мм из титанового сплава BT14, полученного способом ЭЛП**

Место отбора проб	Массовая доля, %								
	Al	V	Mo	Zr	Si	Fe	O	N	H
Верх	5,1	1,5	3,1	0,08	0,09	0,16	0,10	0,02	0,002
Середина	5,2	1,5	3,3	0,10	0,08	0,19	0,10	0,02	0,002
Низ	5,4	1,6	3,3	0,07	0,10	0,17	0,09	0,02	0,002
ГОСТ 19807-91	3,5...6,3	0,9...1,9	2,5...3,8	<0,3	<0,15	<0,25	<0,15	<0,05	<0,015

лома [4]. Снижению стоимости способствует и тот факт, что производство слитков титана и его сплавов массой до нескольких десятков тонн способом ЭЛП перестало быть сложной проблемой [5].

С целью изучения качества слитков сплавов титана на ГП «НПЦ «Титан» ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины» проведены комплексные работы по изготовлению полуфабрикатов в виде труб из слитков титанового сплава BT14, выполненных способом ЭЛП.

Для получения мелкого зерна и равномерного распределения механических свойств в трубных заготовках целесообразно применение слитков большого диаметра, что позволяет повысить степень деформации и способствует более полной проработке структуры [6].

По технологии ЭЛП с промежуточной емкостью и порционной подачей металла в водоохлаждаемый кристаллизатор изготовлены слитки из титанового сплава BT14 диаметром 600 мм, длиной до 3000 мм.

Исследование химического состава полученных слитков показало, что распределение легирующих элементов как по длине, так и по поперечному сечению слитков равномерное и соответствует марочному составу титанового сплава BT14 (табл. 1). Как видно из таблицы, содержание всех примесных элементов находится в пределах требований ГОСТ 19807-91. Повышенное содержание газов и в донной, и в головной частях слитков не обнаружено.

С целью сокращения потерь металла в стружку вместо механической обработки поверхность слит-

ков подвергали электронно-лучевому оплавлению [7-9], что позволило увеличить выход годного металла на 6 %.

Шероховатость поверхности слитка после оплавления соответствовала классу 3...4 при волнистости поверхности 0,2...0,6 мм (рис. 1).

Входной контроль слитков показал, что по качеству поверхности и геометрическим размерам они соответствуют требованиям ТУ 27.5-23712944-005-2001 «Заготовка трубная литая из титановых сплавов».

Исследованная макроструктура металла слитка титанового сплава BT14 характеризуется как плотная, однородная, с отсутствием различно травящихся зон по сечению слитка (рис. 2). Существенной разницы в структуре центральной зоны слитка и периферийной зоны не обнаружено. Дефекты в виде пор, раковин, трещин и неметаллических включений не отмечены. Сегрегация легирующих элементов отсутствует.

Кристаллическое строение металла одинаковое по всей длине слитков и характеризуется кристаллами, по форме близкими к равноосным. Участки столбчатой структуры отсутствуют.

Размер зерна на основной площади темплета в поперечном сечении соответствует баллу 8 по 10-балльной шкале макроструктур (Инструкция



Рис. 1. Оплавленный слиток диаметром 600 мм титанового сплава BT14

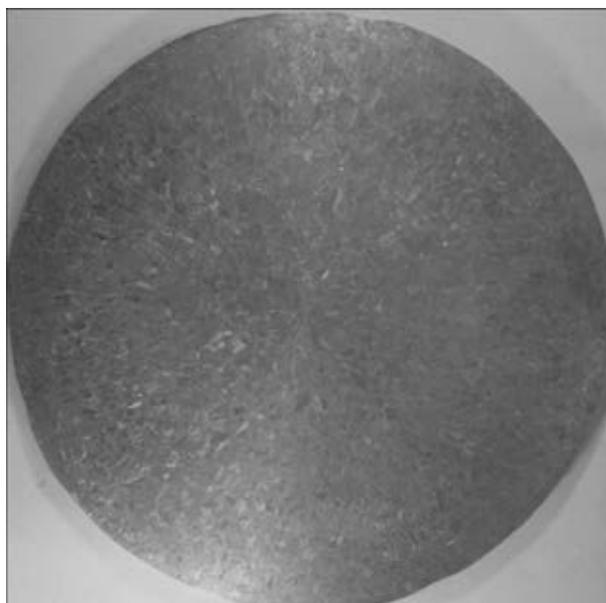


Рис. 2. Макроструктура титанового слитка сплава BT14 диаметром 600 мм



Рис. 3. Процесс ковки слитка сплава титана ВТ14

№ 1054–76 ВИАМ). По периметру темплета на глубину 10 мм — структура более мелкозернистая и соответствует баллу 6. Это вызвано термическим влиянием электронно-лучевого нагрева при применении оплавления поверхности слитка. Дефектов в виде пор, раковин, трещин, инородных включений не обнаружено.

Прочность титановых сплавов определяется не только степенью легирования, но и параметрами обработки давлением, последующей термической или термомеханической обработки. Однако повышение прочности сплава, как правило, приводит к снижению его пластичности. Основными факторами, влияющими на макроструктуру ковanej заготовки, являются исходная структура слитка, температура, степень и скорость его деформации [10]. Оптимальное сочетание механических свойств титановых кованных заготовок обеспечивается мелко- и среднезернистой пластинчатой структурой, которая положительно влияет на прочность, пластичность, длительную прочность и предел выносливости.

Выплавленные слитки диаметром 600 мм сплава ВТ14 с оплавленной поверхностью подвергали горячей деформации на открытом ковочном молоте в два этапа до диаметра поковки 200 мм: первый этап в интервале температур 1100...1150 °С при степени деформации 40 %, второй — в интервале температур 1050...1100 °С при степени деформации 60 % (рис. 3).



Рис. 4. Кованые прутки из титанового сплава ВТ14 диаметром 200 мм

Из слитков титанового сплава ВТ14 диаметром 600 мм, выплавленного способом ЭЛП с промежуточной емкостью, получены кованные прутки диаметром 200 мм (рис. 4).

На поверхности кованных прутков из сплава ВТ14 диаметром 200 мм при визуальном осмотре трещины, расслоения, а также включения не обнаружены.

Определение механических свойств кованных прутков производили при комнатной температуре на отожженных образцах (табл. 2). Образцы для определения прочности и пластичности металла отбирали от прутков в поперечном направлении из головной, средней и донной частей заготовки. Механические свойства кованных прутков соответствуют требованиям стандартов ОСТ1 90107–73 «Прутки кованные из титановых сплавов».

Макроструктура ковanej заготовки, выявленная на макротемплете, не имеет трещин, расслоений, волосовин, пустот, металлических и неметаллических включений, видимых невооруженным

Таблица 2. Средние значения механических свойств кованных прутков диаметром 200 мм из титанового сплава ВТ14

Номер поковки	Временное сопротивление $\sigma_b$ , МПа	Относительное удлинение $\delta$ , %	Относительное сужение $\phi$ , %	Ударная вязкость $KCU_{20}$ Дж/м <sup>2</sup>
1	990	12,0	22,0	5,0
2	981	13,0	24,0	5,2
3	973	10,0	24,0	5,1
ОСТ1 90107–73	850...1100	>8,0	>20,0	>3,0



Рис. 5. Макроструктура ковanej прутка из титанового сплава ВТ14 диаметром 200 мм



Рис. 6. Механически обработанные кованные прутки из титанового сплава ВТ14 диаметром 190 мм

глазом, и соответствует баллу 6 шкалы макроструктур (рис. 5).

Кованные прутки подвергали механической обработке для удаления поверхностных дефектов и газонасыщенного слоя (рис. 6).

Трубные заготовки получали по установившейся технологии — с применением механической обработки кованных прутков. На токарно-винторезном станке ДИП300 способом сверления получено отверстие диаметром 90 мм в центральной части трубной заготовки (рис. 7).

Трубные заготовки из титанового сплава ВТ14 диаметром 190/90 мм подвергали отжигу при температуре 750 °С в течение 1 ч с последующим остыванием на воздухе.

Визуальный осмотр наружной и внутренней поверхностей показал, что их качество, геометрические размеры и кривизна трубных заготовок из титанового сплава ВТ14 находятся в пределах требований стандартов.

Макроструктура трубных заготовок в продольном направлении характеризуется мелкими зернами, вытянутыми вдоль оси пластической деформации (рис. 8).

Механические свойства трубных заготовок определяли на образцах, вырезанных в продольном на-



Рис. 7. Трубные заготовки из титанового сплава ВТ14 диаметром 190/90 мм



Рис. 8. Макроструктура трубной заготовки из титанового сплава ВТ14 диаметром 190/90 мм



Рис. 9. Труба горячепрессованная диаметром 120×15×2500 мм после механической обработки

правлении (табл. 3). Как видно из таблицы, временное сопротивление трубных заготовок в продольном направлении несколько снижается, однако повышаются пластические характеристики.

Горячее прессование труб на диаметр 120×15 мм производили на прессе усилием 2000 тс. Перед прессованием на трубные заготовки наносили стеклосмазки. Нагрев трубной заготовки в печи осуществляли до температуры центра металла (960±10) °С.

Визуальный осмотр наружной и внутренней поверхностей показал, что их качество, геометрические

Таблица 3. Средние значения механических свойств трубных заготовок диаметром 190/90 мм из титанового сплава ВТ14

Номер поковки	Временное сопротивление $\sigma_{в}$ , МПа	Относительное удлинение $\delta$ , %	Относительное сужение $\phi$ , %	Ударная вязкость $KCU_2$ Дж/м
1	923	14,0	40,0	6,9
2	911	17,0	42,0	7,0
3	903	13,0	39,0	6,3
ТУ 1-5-127-73	900...1100	>10,0	>35,0	>5,0



**Таблица 4. Механические свойства горячекатаных труб из титанового сплава VT14 диаметром 120×15×2500 мм**

№ образца	Временное сопротивление разрыву $\sigma_r$ , МПа	Ударная вязкость $KCU_{20}$ Дж/м	Относительное удлинение $\delta$ , %	Относительное сужение $\phi$ , %
1	963	6,0	12,0	26,3
2	972	5,7	12,1	26,9
3	950	5,9	12,9	29,0
ГОСТ 21945	900...1100	>4,0	>8,0	>25,0

кие размеры и кривизна труб находятся в пределах требований стандартов.

Дефектов при ультразвуковом контроле не выявлено.

Трубы после механической обработки (рис. 9) подвергали термообработке по режиму нагрев при температуре  $(750 \pm 10)^\circ\text{C}$  в течение 1 ч с последующим охлаждением на воздухе.

Механические свойства горячепрессованных труб соответствуют требованиям ГОСТ 21945 «Трубы бесшовные горячекатаные из сплавов на основе титана» (табл. 4).

Таким образом, выполненные работы позволили показать, что качество труб, изготовленных из сплава титана VT14 способом ЭЛП, соответствует требованиям стандартов, трубы характеризуются высокой пластичностью при сохранении прочностных характеристик. Трубные заготовки из титанового сплава VT14 могут быть использованы для получения как горячекатаных, так и прессованных труб.

## Выводы

1. Комплекс исследований показал, что механические свойства труб, изготовленных из сплава титана

VT14 способом ЭЛП, отличаются повышенным запасом пластичности при сохранении прочностных свойств на уровне требований стандартов.

2. Электронно-лучевая технология получения слитков сплавов титана может эффективно применяться при получении полуфабрикатов для трубного производства.

1. *Полуфабрикаты* из титановых сплавов / В. К. Александров, Н. Ф. Аношкин, Г. А. Бочвар и др. — М.: Металлургия, 1979. — 512 с.
2. *Титановые сплавы в машиностроении* / Б. Б. Чечулин, С. С. Ушков, И. Н. Разуваева, В. Н. Гольдфайн. — Л.: Машиностроение, 1977. — 248 с.
3. *Мовчан Б. А., Тихоновский А. Л., Курапов Ю. А.* Электронно-лучевая плавка и рафинирование металлов и сплавов. — Киев: Наук. думка, 1973. — 240 с.
4. *Развитие* электронно-лучевой плавки титана в ИЭС им. Е. О. Патона / Б. Е. Патон, Н. П. Тригуб, Г. В. Жук, В. А. Березос // Современ. электрометаллургия. — 2008. — № 3. — С. 22–24.
5. *Производство* крупногабаритных слитков жаропрочных сплавов на основе титана способом электронно-лучевой плавки / Н. П. Тригуб, В. А. Березос, В. А. Крыжановский, А. Ю. Северин // Там же. — 2010. — № 3. — С. 11–14.
6. *Исследование* процесса изготовления горячекатаных и холоднодеформированных труб из литой недеформируемой трубной заготовки титанового сплава VT1-0, полученной способом электронно-лучевой плавки / Н. П. Тригуб, Г. В. Жук, А. А. Чепинский и др. // Там же. — 2006. — № 3. — С. 11–14.
7. *О возможности* использования электронно-лучевого и плазменно-дугового нагрева для обработки поверхностного слоя заготовок с грубыми дефектами / Г. А. Шилов, Э. Л. Вржижевский, А. В. Лихобаба и др. // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1993. — № 3. — С. 58–63.
8. *Электронно-лучевое* оплавление поверхности слитков сплавов титана / С. В. Ахонин, В. А. Березос, А. Н. Пикулин и др. // Современ. электрометаллургия. — 2014. — № 2. — С. 21–25.
9. *Электронно-лучевая* установка УЭ-185 для оплавления поверхностного слоя слитков / Н. П. Тригуб, Г. В. Жук, А. Н. Пикулин и др. // Там же. — 2003. — № 3. — С. 12–4.
10. *Полуфабрикаты* из титановых сплавов / Н. Ф. Аношкин, М. З. Ерманюк, Г. Д. Агарков и др. — М.: Металлургия, 1979. — 512 с.

A package of work has been performed on manufacturing semi-finished products in the form of tubular billets from ingots of VT14 titanium alloy made by EBM. Technology of electron beam remelting with intermediate crucible and portioned feed of metal into water-cooled mould were used to produce ingots of 600 mm diameter and up to 3000 mm length from VT14 titanium alloy. Compliance of the produced ingots to requirements of TU 27.5-23712944-005-200 «Cast tubular billet from titanium alloys» specification is shown. Results of investigation of the structure and mechanical properties of tubular billets and hot-pressed pipes made from ingots of VT14 titanium alloy by electron beam melting are presented. It is shown that electron beam technology of producing titanium alloy ingots can be effectively applied for fabrication of semi-finished products for pipe manufacture. 10 Ref., 4 Tables, 9 Figures.

**Keywords:** titanium alloy; ingot; electron beam melting; intermediate crucible; electron beam surface melting; forged rod; tubular billet; pipe; deformation

Поступила 27.06.2014