

ОСОБЕННОСТИ ПРОИЗВОДСТВА ЛЕНТОЧНЫХ ЛИТЫХ ЗАГОТОВОК МАРОК BT1-0 И GRADE 2 ИЗ НИЗКОСОРТНОГО ГУБЧАТОГО ТИТАНА *

А. Н. Калинюк, А. Я. Дереча, В. В. Тэлин,
А. Ф. Коляда, В. И. Костенко, Н. М. Иванов

ООО «Стратегия БМ».

03026, г. Киев, ул. Новая, 1. E-mail: strategiya_bm@ukr.net

Показана возможность выплавки ленточных литых заготовок (слябов) нелегированного титана марок BT1-0 и Grade 2 из шихты, включающей низкосортный губчатый титан марок ТГ-150 и ТГ-Тв. Переплавляемая шихта может содержать в своем составе до 100 % низкосортной титановой губки в зависимости от содержания примесей в ней. Высокое содержание низкосортного губчатого титана в шихте снижает себестоимость продукции. Качественные ленточные литые заготовки (слябы), отвечающие требованиям стандартов, выплавляют по технологии однократной электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью, что существенно снижает затраты по сравнению с другими переplавными процессами. Выпускаемые предприятием ООО «Стратегия БМ» слябы титана марок BT1-0 и Grade 2 имеют высокую равномерность химического состава по высоте и поперечному сечению, что обеспечивает не только требуемый уровень служебных свойств полуфабрикатов (плит, листов, штрипса и т. п.), но и их высокую повторяемость и равномерность. Библиогр. 3, табл. 2, ил. 12.

Ключевые слова: электронно-лучевая плавка; ленточные литые заготовки; слябы; титановая губка; химический состав; содержание примесей; распределение примесей; кислородный эквивалент; механические свойства

В технологическом цикле производства титановых полуфабрикатов важное место занимает выплавка литых заготовок (слитков и слябов) [1]. Стремление к удешевлению титановой продукции стимулирует развитие технологий, которые позволяют получать наиболее экономичную форму заготовок — ленточные литые заготовки (слябы) для последующего изготовления плит, листов, штрипса и сварных труб. Ленточные литые заготовки, приближенные по своей форме к готовым полуфабрикатам, позволяют уменьшить количество стадий металлургического передела [2, 3].

Производство слитков нелегированного титана (CP-титана) с точно заданным интервалом концентраций примесей обеспечивает получение служебных свойств (σ_b , σ_r , δ , ψ) у полуфабрикатов и готовых изделий в узком строго определенном диапазоне. Поэтому важной задачей является выплавка слитков и слябов, не только отвечающих требованиям стандартов по химическому составу, но обладающих высокой химической гомогенностью. Для слябов (ленточных литых заготовок) CP-титана один из критериев качества — это содержание примесей,

разница в концентрации которых на разных уровнях сравнима с ошибкой анализа.

Метод выплавки ленточных литых заготовок.

Для получения слябов из нелегированного титана (CP-титана) марок BT1-0 и Grade 2 применяется технология однократной электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью (ЭЛПЕ). Следует отметить, что предприятие ООО «Стратегия БМ» располагает промышленной технологией ЭЛПЕ производства слябов на электронно-лучевой установке (ЭЛУ) «СТРАТЕГИЯ-1» мегаваттного класса.

Схема плавки на плавильном оборудовании ООО «Стратегия БМ» представлена на рис. 1.

Формирование сляба производится по способу непрерывной разливки в медный проходной водоохлаждаемый кристаллизатор. Шихта 4, загруженная в несплавляемые контейнеры 3 подается с двух сторон в зону плавки. Процесс плавления шихты осуществляется в плавильной камере в вакууме под воздействием электронных пучков электронно-лучевых пушек высоковольтного тлеющего разряда (ВТР) 6. Управление движением

*По материалам доклада, представленного на Международной конференции «Титан-2018. Производство и применение в Украине», 11–13 июня 2018, г. Киев, ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины.

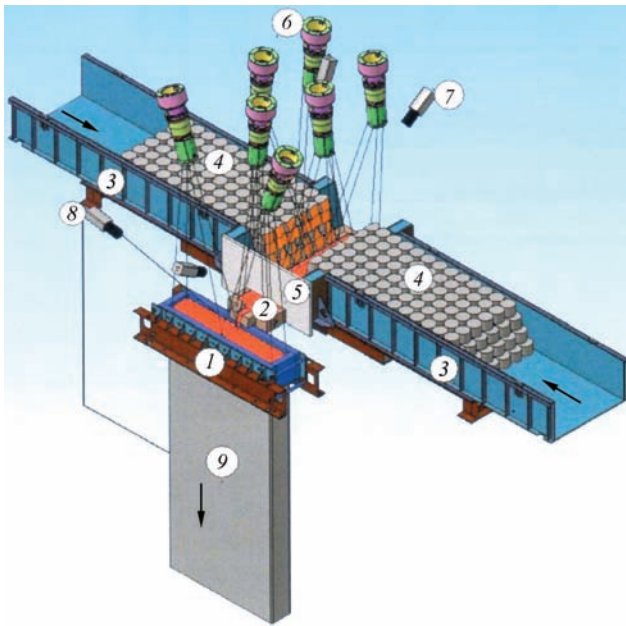


Рис. 1. Схема ЭЛПЕ на электронно-лучевой установке «СТРАТЕГИЯ-1»

(сканированием) пучков позволяет контролировать технологические режимы плавки шихты на торцах заготовок в промежуточной емкости 2 на ее сливном носке и в кристаллизаторе 1, что исключает прожоги технологической оснастки. Для исключения попадания брызг расплавленного металла в кристаллизатор 1 установлен экран 5.

Сигнал с камер видеонаблюдения 7 транслируется на мониторы главного пульта управления (ГПУ) в режиме реального времени, а также автоматически обрабатывается системой управления. Сигнал с камеры контроля уровня ванны металла в кристаллизаторе 8 позволяет в автоматическом режиме управлять устройством вытягивания сляба 9.

Рабочим газом для электронно-лучевых пушек ВТР служит смесь технического водорода и кислорода в заданной пропорции.

Схема плавки, представленная на рис. 1, позволяет реализовывать такие преимущества ЭЛПЕ как: наличие высокого вакуума примерно 10^{-3} торр в качестве защитной среды; высокую плотность энергии в электронном луче; прецизионность распределения энергии по нагреваемой поверхности; разделение процессов плавления шихты и формирования слитка.

**Технические характеристики
ЭЛУ «СТРАТЕГИЯ-1»**

Установленная мощность, кВт	2800
Ускоряющее напряжение, кВ	30
Количество электронно-лучевых пушек, шт.	7
Рабочий вакуум, торр	10^{-3}
Производительность вакуумной системы, л/с	до 70000
Наибольшие размеры заготовки, мм	5000/920/450
Количество загрузочных устройств, шт.	2



Рис. 2. Механическая обработка сляба размерами 4300×1350×228 мм и массой 5,8 т

Количество контейнеров под загрузку, шт.	4...6
Размеры слябов, мм	4300/1350/228; 4300/1350/400
Габариты установки, м	20×20×16

Сейчас ЭЛУ «СТРАТЕГИЯ-1» выплавляет слябы массой 5,8 и 10,0 т (рис. 2, 3). Производительность установки составляет 1500 т/год.

Шихтовые материалы для выплавки ленточных литых заготовок. При производстве слябов используется комплексная шихта, состоящая из титановой губки различных марок (ТГ-90, ТГ-100, ТГ-110, ТГ-130, ТГ-150 и ТГ-Тв), а также отходов собственного производства (донных частей, стружки), образующихся в процессе механической обработки черновых слябов.

В табл. 1 приведен химический состав титановой губки, применяемой в технологии ЭЛПЕ на предприятии ООО «Стратегия БМ».

Данные таблицы показывают, что в процессе используют не только марки высокосортного губчатого титана, но и марки низших сортов титановой губки, а именно ТГ-150 и ТГ-Тв. Следует отметить, что если губчатый титан марок ТГ-90... ТГ-150 используется в производстве слябов без ограничений по химическому составу, то для губчатого титана марки ТГ-Тв определены следующие

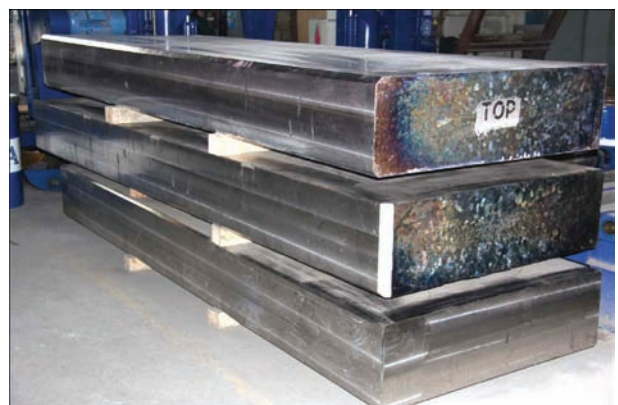


Рис. 3. Внешний вид слябов размерами 4300×1350×400 мм и массой 10,0 т

Таблица 1. Химический состав титановой губки для выплавки слябов на ЭЛУ «СТРАТЕГИЯ-1», мас. % (не более)

Марка	Титан (не менее)	Fe	Si	Ni	C	Cl	N	O	Твердость, HB, 10/1000/30 (не более)
ТГ-90	99,74	0,05	0,01	0,04	0,02	0,08	0,02	0,04	90
ТГ-100	99,72	0,06	0,01	0,04	0,03	0,08	0,02	0,04	100
ТГ-110	99,67	0,09	0,02	0,04	0,03	0,08	0,02	0,05	110
ТГ-130	99,56	0,13	0,03	0,04	0,03	0,10	0,03	0,08	130
ТГ-150	99,45	0,20	0,03	0,04	0,03	0,12	0,03	0,10	150
ТГ-Тв	97,75	1,00	–	–	0,10	0,15	0,10	–	–

щие ограничения по максимальному содержанию примесей: железа (ограничено уровнем 0,20 % включительно); кислорода (ограничено уровнем 0,10 % включительно); азота (ограничено уровнем 0,03 % включительно); углерода (ограничено уровнем 0,02 % включительно); кремния и никеля (ограничено уровнем 0,02 %); остальных контролируемых элементов (см. табл. 1).

Ограничения по максимальному уровню содержания некоторых примесей введены по причине жестких требований к химическому составу готовой продукции и преследуют цель минимизировать риски, связанные с применением титановой губки низших сортов.

Титановая губка в силу особенностей технологического процесса восстановления и сепарации на выходе имеет неоднородный химический состав по примесям. Качественная титановая губка (марки ТГ-90...ТГ-130) составляет до 60 % от общего объема и в основном применяется для серийного производства литых заготовок (слитков). Губка марок ТГ-150 и ТГ-Тв не используется в печах вакуумно-дугового переплава (ВДП) из-за повышенного содержания примесей, прежде всего хлора.

Практика показала, что химический состав применяемого в ЭЛПЕ на установке «СТРАТЕГИЯ-1» губчатого титана марок ТГ-150 и ТГ-Тв различных партий значительно отличается по содержанию железа, кислорода и хлора. Это приводит к тому, что доля низкосортной губки в комплексной шихте может колебаться от 50 до 100 %.

В шихтовочных картах для каждой конкретной плавки учитывается не только химический состав по партиям различных марок титановой губки, но и химический состав возвратных отходов собственного производства, в том числе и степень окисления донных частей.

До сих пор основная часть производства титановых слитков осуществляется способом ВДП с использованием качественной титановой губки высших сортов. Применение низкосортной губки и возвратных отходов снижает себестоимость

производства готовой продукции. При этом ВДП обеспечивает выплавку слитков круглого сечения и не позволяет выплавлять слитки прямоугольного (ленточные литые заготовки/слябы).

Выплавка слябов нелегированного титана с регламентированным содержанием примесей. В настоящее время ООО «Стратегия БМ» на своем плавильном оборудовании реализует два направления в технологии ЭЛПЕ слябов (ленточных литых заготовок) СР-титана:

выплавку слябов нелегированного титана марок ВТ1-0, соответствующих по химическому составу требованиям ГОСТ 19807–91, и Grade 2 с содержанием кислорода 0,095...0,130 %, железа не более 0,15 % без учета кислородного эквивалента;

выплавку слитков Grade 2 с кислородным эквивалентом (O_{Eq}) в пределах 0,17...0,25.

При реализации на практике этих направлений проводится 100%-ный контроль химического состава слябов, ультразвуковой контроль донных и головных частей слябов. Определение концентрации контролируемых примесей проводится по стандартным методикам. Для определения содержания железа, кремния и других элементов используется метод индуктивно связанной плазмы (ICP), углерода — кулонометрический, кислорода, азота и водорода — метод восстановительного плавления образца в потоке газа-носителя.

Обязательной процедурой является проведение 100%-ного контроля поверхности слябов проникающими красками (penetrant control) после механической обработки. Такой контроль позволяет выявить остаточные дефекты литья с минимальными размерами до 0,1 мм и гарантировать качество металла при дальнейшем переделе на плиту, лист или штрипс.

В табл. 2 представлены требования к химическому составу титана марок ВТ1-0 и Grade 2 и характерные результаты контроля содержания примесей в слябах размерами 4300×1350×228 мм, массой 5,8 т с различными концентрациями железа.

Таблица 2. Содержание примесей в слябах титана марки BT1-0 и Grade 2, мас. %

Марка титана		Fe	C	O	H	N
BT1-0	ГОСТ 19807–91 (не более)	0,25	0,07	0,20	0,010	0,04
BT1-0	Расчетное	0,19	0,01	0,091	–	0,008
ЭЛПЕ	Фактическое	0,19...0,20	0,005...0,012	0,089...0,094	0,0010...0,0015	0,006...0,010
Grade 2	Требования (не более)	≤0,15	≤0,02	0,095...0,130	≤0,004	≤0,015
Grade 2	Расчетное	0,12	0,01	0,103	–	0,008
ЭЛПЕ	Фактическое	0,11...0,13	0,004...0,013	0,097...0,120	0,0010...0,0015	0,004...0,010

Все слябы полностью соответствуют предъявляемым к ним требованиям. Для данного вида продукции уровень качества (содержание контролируемых примесей кислорода, азота, железа, углерода) определяется главным образом качеством используемого сырья. Концентрация примесей в слябах по сравнению с исходной практически не меняется. Иными словами, какая концентрация примесей была задана в шихте перед плавкой, такая же концентрация их будет по окончании выплавки в готовом слябе. Следует отметить, что в Украине первый титановый слиток с регламентированным содержанием кислорода в пределах 0,16...0,18 % был выплавлен в 1991 г. на электронно-лучевой установке УЭ-196 в Институте электросварки им. Е. О. Патона*.

Проведен анализ однородности распределения примесей в слябах путем отбора проб от подката толщиной 30 мм по схеме, изображенной на рис. 4. Результаты химического и газового анализов приведены на рис. 5. Слябы массой 5,8 т титана марки Grade 2 характеризуются высокой однородностью химического состава как по высоте, так и по сечению. Механические свойства листов толщиной 5,0 мм, полученных дальнейшей прокаткой металла ЭЛПЕ в продольном и поперечном направ-

лениях полностью соответствовали требованиям ГОСТ 22178–76 (рис. 6). Угол изгиба образцов листов толщиной 4,0...6,0 мм из металла ЭЛПЕ составил 143...155° при минимально допустимом значении 80° (ГОСТ 22178–76).

Слябы BT1-0 ЭЛПЕ характеризовались высокой химической однородностью по высоте. Так, концентрация кислорода изменялась в пределах 0,005 %, железа — 0,01 % (рис. 7).

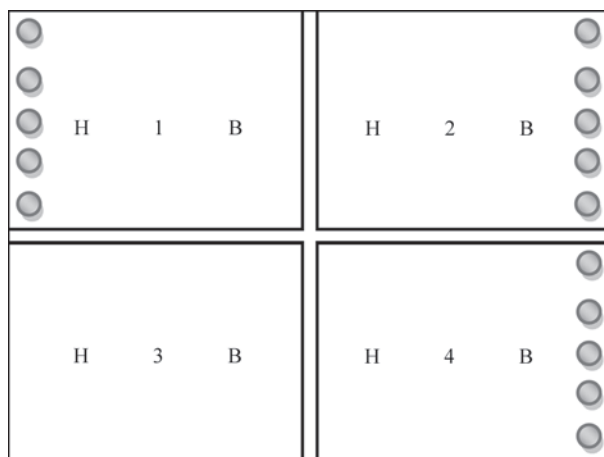


Рис. 4. Схема отбора проб для исследования образцов 1–4 на химический и газовый анализ (Н — низ; В — верх)

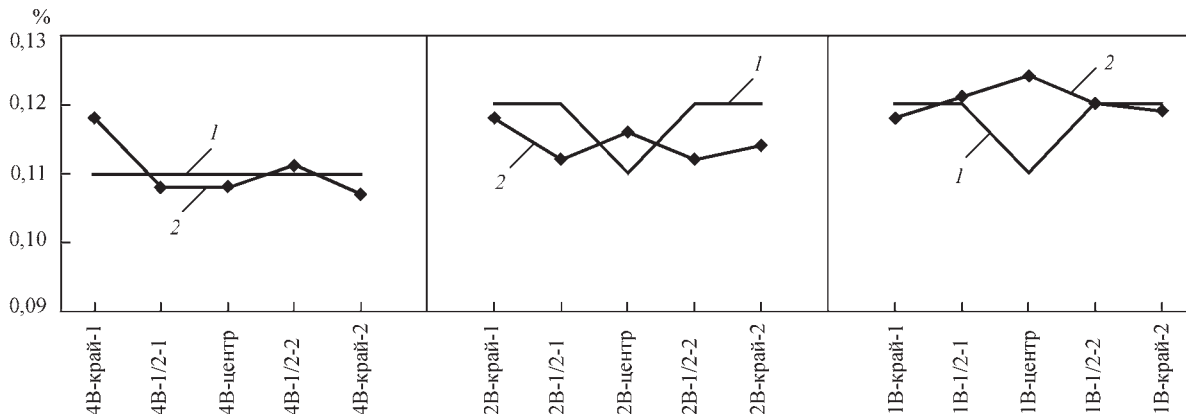


Рис. 5. Распределение железа (1) и кислорода (2) по высоте и сечению сляба размерами 4300×1350×228 мм, массой 5,8 т марки Grade 2

*В работе принимали участие Дереча А. Я., Калинюк А. Н., Салов С. Н.

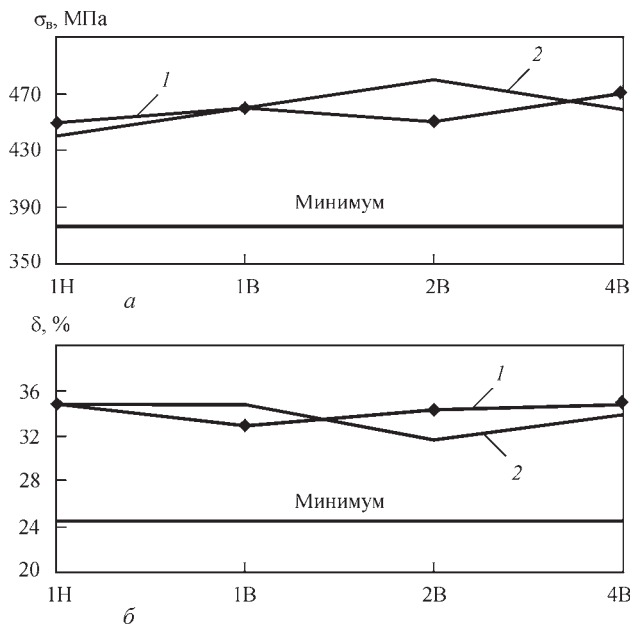


Рис. 6. Механические свойства (а — σ_b ; б — δ) листа толщиной 5,0 мм, прокатанного в поперечном (1) и продольном (2) направлениях из сляба марки Grade 2 ЭЛПЕ массой 5,8 т

Второе направление деятельности ООО «Стратегия БМ» — это производство слябов с определенным кислородным эквивалентом (O_{Eq}), который рассчитывается по формуле:

$$O_{Eq} = O + 2,5N + 0,6 Fe + 0,7 C + 0,3 Al.$$

Кислородный эквивалент (O_{Eq}) является безразмерным и связывает концентрации примесей нелегированного титана в одну величину, позволяющую в определенной степени прогнозировать служебные свойства деформированного металла (табл. 3).

Для практики плавки на ЭЛУ «СТРАТЕГИЯ-1» формула расчета O_{Eq} была видоизменена в связи с тем, что требуемая концентрация кислорода в готовом слябе, как правило, больше чем в титановой губке, являющейся основой расходуемой заготовки:

$$O_{Eq} = O_{исх.} + \Delta O + 2,5N + 0,6 Fe + 0,7 C + 0,3 Al,$$

где $O_{исх.}$ — среднее содержание кислорода в расходуемой заготовке без дополнительного содержа-

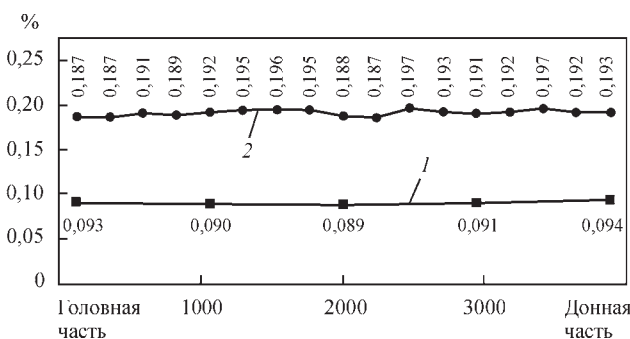


Рис. 7. Распределение железа (1) и кислорода (2) по высоте сляба марки BT1-0

Таблица 3. Сопоставление O_{Eq} и механических свойств нелегированного титана

Grade	O_{Eq}	σ_r , МПа
CP-1	$\leq 0,16$	170...310
CP-2	0,16...0,23	275...450
CP-3	0,23...0,28	380...550
CP-4	0,28...0,34	485...655

ния кислорода, %; ΔO — добавочное содержание кислорода в расходуемой заготовке, %.

Если для первого направления конечная концентрация кислорода в переплавленном металле определяется его концентрацией в исходной шихте, то искусственное повышение концентрации кислорода потребовало решения целого комплекса задач технологического характера. А именно, разработки методики расчета кислородного эквивалента (O_{Eq}) с учетом конечных концентраций как кислорода, так и концентраций остальных примесей, влияющих на величину O_{Eq} , шихтовки расходуемых заготовок и отработки технологических приемов проведения процесса плавки. Дополнительный кислород вводится в металл в виде оксида титана IV (TiO_2).

Все эти задачи были успешно решены при получении слябов массой 10 т нелегированного титана марки Grade 2 по нескольким типам химического состава (рис. 8). По требованию заказчика пробы

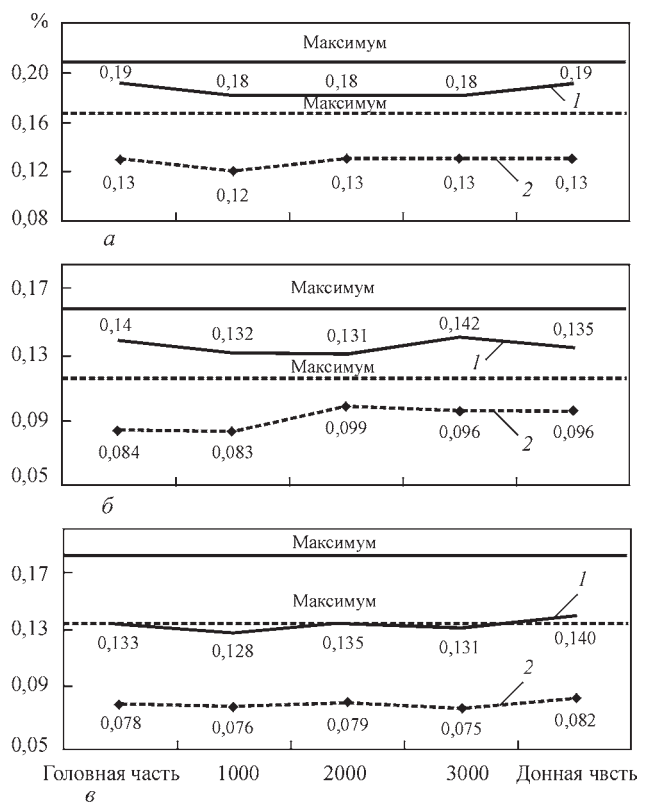


Рис. 8. Распределение кислородного эквивалента (а), железа (б) и кислорода (в) по высоте слябов массой 10 т, показатели находятся: 1 — в пределах 0,18...0,21; 2 — 0,111...0,17



Рис. 9. Строительство культурного центра (вид в вечернее время)



Рис. 11. Монтаж крыши культурного центра



Рис. 10. Облицовочные титановые панели



Рис. 12. Крыша из титановых листов

(пять проб) отбирали по высоте сляба по схеме: головная часть—1000 мм—2000 мм—3000 мм—донная часть.

Слябы, выплавленные по второму направлению в технологии ЭЛПЕ ленточных литых заготовок СР-титана, характеризуются высокой повторяемостью и равномерностью значений кислородного эквивалента (O_{Eq}) по высоте. Для этого направления производственной деятельности ООО «Стратегия БМ» уровень качества заготовок (содержание контролируемых примесей железа, углерода и др.) определяется, главным образом, качеством используемого сырья. Концентрация примесей в слябах по сравнению с исходной концентрацией практически не меняется. Исключение составляет кислород. Его концентрация является суммой концентраций в компонентах шихты плюс концентрация, вводимая дополнительно в виде диоксида титана.

Все слябы имеют высокую равномерность распределения других примесей, определяющих значение кислородного эквивалента (O_{Eq}). Содержание азота в слябах находится на уровне до 0,006 %, при максимально допустимом значении не более 0,020 %. Концентрация углерода находится в пределах 0,003...0,009 %, алюминия — 0,006...0,013 % при допустимых значениях не более 0,02 % и 0,06 % соответственно. Остаточное содержание водорода в слябах составляет 0,0010...0,0015 %.

Практическое применение металлургической продукции предприятия ООО «Стратегия БМ». В качестве примера использования металла, выплавленного ООО «Стратегия БМ», можно привести следующий факт. Титановый лист, изготовленный из слябов с учетом кислородного эквивалента (O_{Eq}), был применен при строительстве культурного центра в Кувейте (рис. 9–12). Для этих целей было израсходовано 300 т слябов, произведенных на ЭЛУ «СТРАТЕГИЯ-1». Проект начат в 2015 г. и считается одним из крупнейших в мире по проведению кровельных работ с применением титанового листа.

Выводы

1. Показана возможность выплавки слябов (ленточных литых заготовок) нелегированного титана марок ВТ1-0 и Grade 2 из шихты, включающей низкосортный губчатый титан марок ТГ-150 и ТГ-Тв.

2. Переплавляемая шихта может содержать в своем составе до 100 % низкосортной титановой губки марок ТГ-150 и ТГ-Тв в зависимости от содержания примесей в ней. Высокое содержание низкосортного губчатого титана в шихте снижает себестоимость продукции.

3. Качественные слябы (ленточные литые заготовки), отвечающие требованиям отечественных и зарубежных стандартов, выплавляются за один переплав (однократным ЭЛПЕ), что существенно снижает затраты по сравнению с другими переplавными процессами.

4. Выпускаемые предприятием ООО «Стратегия БМ» слябы титана марок VT1-0 и Grade 2 имеют высокую равномерность химического состава по высоте и поперечному сечению, что обеспечивает не только требуемый уровень служебных свойств полуфабрикатов, производимых из ленточных литых заготовок, но и их высокую повторяемость и равномерность.

Список литературы

1. Мусатов М. Н., Фридман А. Ш., Фролов В. А. и др. (1990) Состояние технологии производства слитков титановых сплавов за рубежом. *Технология легких сплавов*, **8**, 60–75.
2. Патон Б. Е., Тригуб Н. П., Ахонин С. В. и др. (1996) Некоторые тенденции металлургического передела титана. *Пробл. спец. электрометаллургии*, **1**, 25–32.

3. Жук Г. В., Калинюк А. Н., Тригуб Н. П. (2004) Производство титановых слитков-слябов методом электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью. *Современная электрометаллургия*, **3**, 22–24.

References

1. Musatov, M.N., Fridman, A.Sh., Frolov, V.A. et al. (1990) State of the technology of production of titanium alloy ingots abroad. *Tekhnologiya Lyogkikh Splavov*, **8**, 60–75 [in Russian].
2. Paton, B.E., Trigub, N.P., Akhonin, S.V. et al. (1996) Some tendencies of metallurgical processing of titanium. *Problemy Spets. Elektrometallurgii*, **1**, 25–32 [in Russian].
3. Zhuk, G.V., Kalinyuk, A.N., Trigub, N.P. (2004) Production of titanium ingots-slabs using method of EBCHM. *Advances in Electrometallurgy*, **3**, 20–22.

ОСОБЛИВОСТІ ВИРОБНИЦТВА СТРИЧКОВИХ ЛИТИХ ЗАГОТОВОК МАРОК VT1-0 ТА GRADE 2 З НИЗЬКОСОРТНОГО ГУБЧАСТОГО ТИТАНУ

О. М. Калинюк, О. Я. Дереча, В. В. Телін, О. Ф. Коляда, В. І. Костенко, М. М. Іванов
ТОВ «Стратегія БМ».

03026, м. Київ, вул. Нова, 1. E-mail: strategiya_bm@ukr.net

Показана можливість виплавки стрічкових литих заготовок (слябів) нелегованого титану марок VT1-0 та Grade 2 з шихти, що включає в себе низькосортний губчастий титан марок ТГ-150 та ТГ-Тв. Шихта, що переплавляється може містити в своєму складі до 100 % низькосортної титанової губки в залежності від вмісту домішок у ній. Високий вміст низькосортного губчастого титану в шихті знижує собівартість продукції. Якісні стрічкові литі заготовки (сляби), що відповідають вимогам стандартів, виплавляють за технологією однократної електронно-променевої плавки з проміжною ємністю, що суттєво знижує витрати у порівнянні з іншими переплавними процесами. Сляби титану марок VT1-0 та Grade 2, що випускаються підприємством ТОВ «Стратегія БМ», мають високу рівномірність хімічного складу по висоті та поперечному перетину, що забезпечує не тільки необхідний рівень службових властивостей напівфабрикатів (плит, листа, штрипсу і т. п.), але й їх високу повторюваність та рівномірність. Бібліогр. 3, табл. 2, іл. 12.

Ключові слова: електронно-променева плавка; стрічкові литі заготовки; сляби; титанова губка; хімічний склад; вміст домішок; розподіл домішок; кисневий еквівалент; механічні властивості

PECULIARITIES OF PRODUCTION OF SLAB-TYPE CAST BILLETS OF VT1-0 AND GRADE 2 TYPES OF LOW-GRADE SPONGY TITANIUM

A.N. Kalinyuk, A.Ya. Derecha, V.V. Telin, A.F. Kolyada, V.I. Kostenko, N.M. Ivanov
LLC «Strategiya BM».

1 Novaya Str., 03026, Kyiv. E-mail: strategiya_bm@ukr.net

The feasibility of melting the slab cast billets of unalloyed titanium of grades VT1-0 and Grade 2 of charge, containing the low-grade spongy titanium of TG-150 and TG-Tv grades is shown. The charge remelted can contain in its composition up to 100 % of a low-grade titanium sponge depending on content of impurities in it. The high content of the low-grade spongy titanium in charge decreases the cost of products. The quality slab cast billets, meeting the requirements of standards, are melted by using the technology of electron beam cold hearth melting, that reduces greatly the expenses as compared with other remelting processes. The slabs of titanium of grades VT1-0 and Grade 2, produced by the enterprise LLC «Strategiya BM», have a high uniformity of chemical composition in height and cross section, thus providing not only the required level of service properties of semi-products (plates, sheets, strips, etc.), but also their high repeatability and uniformity. 3 Ref., 2 Tabl., 12 Fig.

Key words: electron beam melting; slab cast billets; titanium sponge; chemical composition; content of impurities; distribution of impurities; oxygen equivalent; mechanical properties

Поступила 26.06.2017