

ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЕ ОПЛАВЛЕНИЕ СЛИТКОВ СЛОЖНОЛЕГИРОВАННЫХ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

А. Н. Пикулин

Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины.
03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Проведены комплексные исследовательские работы по выплавке партии слитков сложнoleгированных сплавов титана BT20, BT22, T110 диаметром 150, 400 мм и слитков прямоугольного сечения 530×165 мм сплава BT23 длиной до 2000 мм соответственно. Поверхность полученных слитков подвергали электронно-лучевой обработке в установке УЭ-185. Показано, что химический состав металла оплавленного слоя сложнoleгированных титановых сплавов соответствует марочному составу, слитки имеют высокое качество поверхности при глубине проплавления до 12 мм, достаточной для эффективного удаления поверхностных дефектов. Представлены технико-экономические показатели обработки поверхности слитков сложнoleгированных титановых сплавов. Показано, что технико-экономическая эффективность электронно-лучевого оплавления подтверждается при сравнении статьи удельного расхода электроэнергии на оплавление со статьями совместного учета удельного расхода электроэнергии и потерь металла при механической обработке. Библиогр. 12, табл. 2, ил. 6.

Ключевые слова: сложнoleгированный титановый сплав; слиток; электронно-лучевая плавка; электронно-лучевое оплавление; оплавленный слой; глубина проплавления; качество металла

В последние десятилетия повышенное внимание уделяется созданию сплавов на основе тугоплавких и высокорреакционных металлов. Особый интерес представляют сложнoleгированные сплавы на основе титана, которые обладают высокой удельной прочностью и хорошей коррозионной стойкостью в различных средах. В настоящее время акцент смещается с изучения возможного широкого их внедрения в таких отраслях техники, как атомная энергетика, газотурбостроение, авиационное и космическое аппаратостроение, химическое машиностроение, а также повышения их служебных характеристик на экономические и технологические аспекты их промышленного производства [1–3].

Снижение себестоимости слитков сложнoleгированных титановых сплавов, как исходного звена для производства полуфабрикатов, одновременно с повышением их качества является актуальной задачей, так как определяющим фактором в принятии решения об их применении вместо традиционных конструкционных материалов является соотношение цена/качество [3, 4].

В последние годы в Украине на базе технологии электронно-лучевой плавки создано промышленное производство слитков титана и его сплавов, а на металлургических предприятиях освоено производство титановых полуфабрикатов различного сортамента.

Электронно-лучевая плавка (ЭЛП) является наиболее эффективным способом вакуумной ме-

таллургии для получения сплавов, в том числе тугоплавких и высокорреакционных, со сверхнизким содержанием газов, летучих примесей и неметаллических включений [5]. Однако, по ряду причин, обусловленных металлургическими и технологическими особенностями, в процессе электронно-лучевого переплава на поверхности получаемых слитков могут возникать дефекты в виде гофр, трещин и продольной полосы заливки металла (рис. 1).

Избежать образования такого рода дефектов при ЭЛП практически невозможно, а это, в свою очередь, затрудняет дальнейшую горячую обработку слитков и заготовок и приводит к развитию горячих трещин. Достигается требуемое качество поверхности слитков и заготовок путем удаления поверхностного слоя при механической обработке. Необходимо отметить, что механические свойства сплавов на основе титана такие, что производительность лезвийной обдирки на существующих станках в 3...6 раз ниже, чем при обдирке легированных конструкционных сталей, а малая теплопроводность приводит к локальному перегреву металла в месте контакта с резцом и, естественно, к окислению стружки. Высокие требования к чистоте исходных шихтовых материалов накладывают ряд ограничений на повторно используемую стружку для производства слитков, что приводит к безвозвратным потерям металла до 20...35 % [6–9].

Учитывая вышесказанное, большой интерес представляют работы, в которых изучается воз-

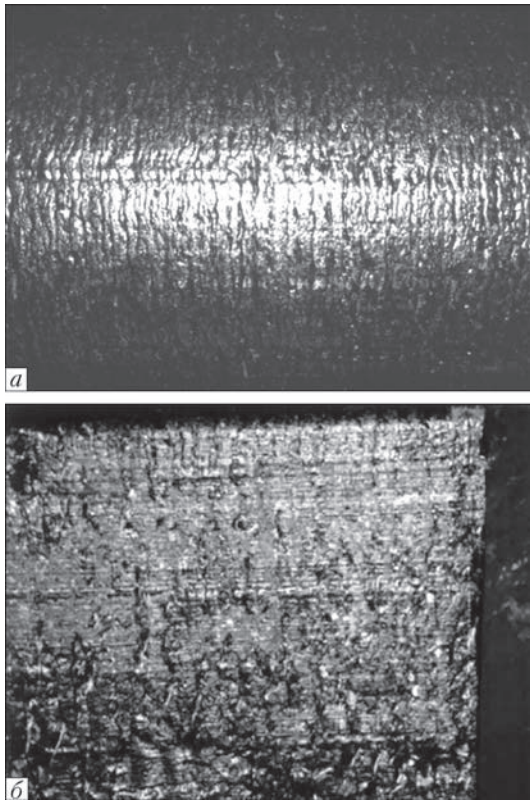


Рис. 1. Внешний вид поверхности слитков ЭЛП: *а* — цилиндрического; *б* — прямоугольного сечения

возможность безотходного удаления поверхностных дефектов слитков. Положительные результаты таких работ позволяют сократить потери металла в виде некондиционных отходов (стружки) и ценных легирующих элементов. При этом наиболее перспективным является путь применения новых технологических процессов, которые позволят исключить из производственной цепочки некоторые технологические переделы, и за счет этого улучшить качество поверхности слитков, повысить выход годного и значительно снизить себестоимость продукции.

В ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины накоплен большой опыт по использованию электрон-

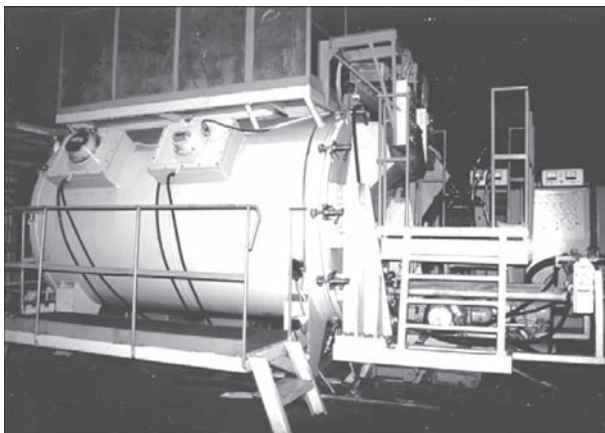


Рис. 2. Внешний вид электронно-лучевой установки УЭ-185

ного луча для обработки поверхностного слоя слитков круглого и прямоугольного сечений, проведен ряд исследований с применением математического моделирования процессов тепло- и массопереноса в обрабатываемом слитке [10, 11]. На базе этих исследований разработана технология электронно-лучевого оплавления (ЭЛО) и специализированная электронно-лучевая установка УЭ-185 для его реализации (рис. 2) [12].

С целью проверки эффективности применения ЭЛО поверхностного слоя слитков сложнолегированных титановых сплавов на производственных мощностях ГП «НПЦ «Титан» ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины» проведены комплексные исследовательские работы по выплавке партии слитков сложнолегированных сплавов титана ВТ20, ВТ22, Т110 диаметром 150, 400 мм и слитков прямоугольного сечения 530×165 мм сплава ВТ23 длиной до 2000 мм (рис. 3).

Поверхность полученных слитков подвергали электронно-лучевой обработке в установке УЭ-185 по режимам, полученным по результатам математического моделирования процессов тепло- и массопереноса в слитках титановых сплавов при ЭЛО. Оплавление слитков цилиндрического сечения осуществляли по схеме, при которой электронный луч неподвижен, а слиток вращается вокруг своей оси. При этом линейная

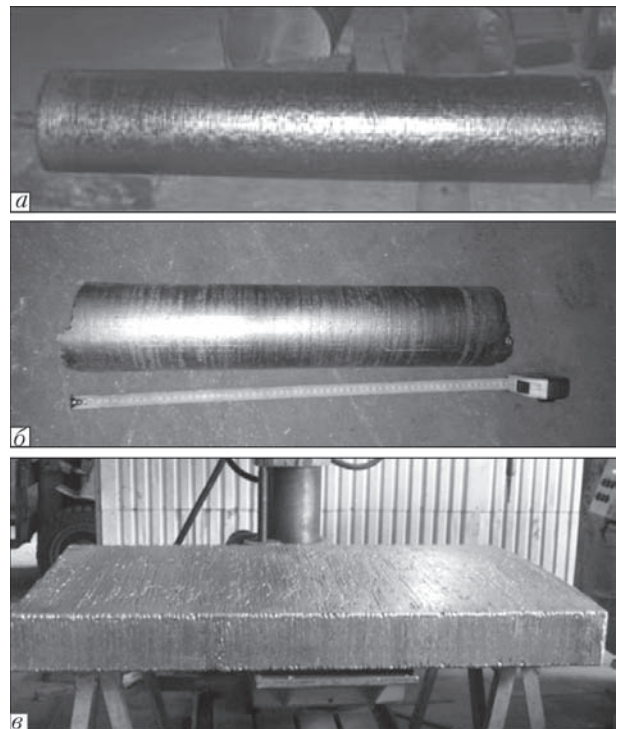


Рис. 3. Слитки сложнолегированных сплавов титана после ЭЛП: *а, б* — цилиндрические; *в* — прямоугольные

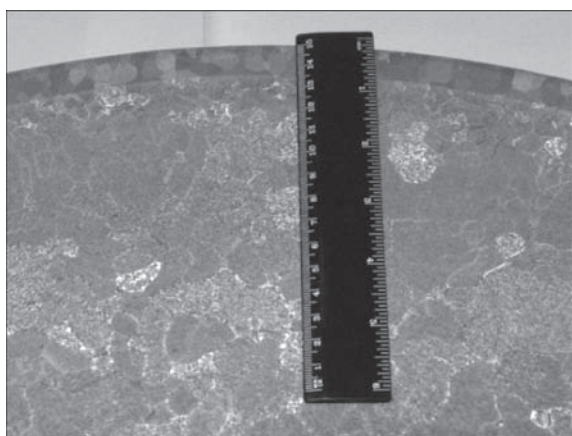


Рис. 4. Глубина проплавления поверхностного слоя
 скорость оплавления составляла 39 мм/мин для
 слитка диаметром 150 мм и 54 мм/мин для слитка
 диаметром 400 мм, а удельная мощность нагрева
 4,1 и 6,5 Вт/мм² соответственно. Оплавление слитков
 прямоугольного сечения 530×165 мм проводи-
 ли следующим образом: слиток неподвижно рас-
 полагали в технологической оснастке установки, а
 электронный луч перемещали по его поверхности.
 Линейная скорость оплавления при этом состав-
 ляла 19 мм/мин при удельной мощности нагрева
 6,4 Вт/мм².

Для исследования влияния технологических параметров ЭЛО на химический состав и глубину проплавления обрабатываемого слоя были отобраны пробы в виде стружки и отрезных образцов до и после оплавления.

Результаты исследований (табл. 1) массовой концентрации легирующих элементов в металле оплавленного слоя слитков показали, что их содержание соответствует марочному составу, наблюдается понижение содержания алюминия и

хрома, легирующих элементов с упругостью пара выше, чем у основы сплава, и, соответственно, повышение содержания ванадия, молибдена, циркония, ниобия, легирующих элементов с упругостью пара ниже, чем у основы сплава.

Экспериментальную оценку глубины проплавления поверхностного слоя слитков по указанным выше режимам проводили на поперечных темплетях и она составила 9...10 мм для слитков диаметром 400 и прямоугольного сечения 530×165 мм и 10...12 мм для слитков диаметром 150 мм (рис. 4). Боковая поверхность слитков имела ровный микрорельеф, зеркальный вид с характерным вакуумным травлением, без трещин, разрывов и неслитин (рис. 5).

По результатам экспериментальных плавов определены технико-экономические показатели электронно-лучевой обработки слитков титановых сплавов цилиндрического сечения 150, 400 и прямоугольного 530×165 мм.

При выплавке по стандартной технологии, образующиеся на поверхности слитков титановых сплавов дефекты, устраняются путем удаления поверхностного слоя механическими методами. Толщина удаляемого с поверхности слитков дефектного слоя составляет до 10 мм (рис. 6).

Показатели потерь металла в стружку при механической обработке слитков титановых сплавов, полученных способом ЭЛП и расхода электроэнергии определены по укрупненным статьям и соответствуют фактическим данным опытно-промышленного производства данных слитков.

Сравнение расхода электроэнергии по методам обработки и потерь металла в стружку показывают эффективность обработки поверхности слитков сложнолегированных титановых спла-

Т а б л и ц а 1. Содержание легирующих элементов в металле оплавленного слоя слитков титановых сплавов, мас. %

Сплав	Сечение слитка, мм		Al	Cr	V	Mo	Zr	Nb
BT20	ГОСТ 19807-91		5,5...7,0	–	0,8...2,3	0,5...1,8	1,4...2,5	–
	Ø 400	Исходный	6,9	–	2,05	1,57	1,81	–
		После ЭЛО	6,72	–	2,08	1,59	1,78	–
BT22	ГОСТ 19807-91		4,4...5,7	0,5...1,5	4,0...5,5	4,0...5,5	≤ 0,3	–
	Ø 150	Исходный	5,6	0,78	4,24	4,1	–	–
		После ЭЛО	5,49	0,68	4,42	4,22	–	–
	Ø 400	Исходный	5,24	1,45	4,73	4,04	–	–
		После ЭЛО	5,09	1,28	4,84	4,21	–	–
BT23	ОСТ 1-90013-81		4,0...6,3	0,8...1,4	4,0...5,0	1,5...2,5	≤ 0,3	–
	530×165	Исходный	4,7	0,9	5,0	1,9	0,01	–
		После ЭЛО	4,3	0,8	5,1	2,1	0,01	–
T110	ТУУ27.4-05416923-071:2005		5,0...6,0	–	0,8...2,0	0,8...1,8	0,3...0,8	3,5...4,8
	Ø 150	Исходный	5,35	–	1,17	1,01	0,37	5,08
		После ЭЛО	5,24	–	1,21	1,03	0,37	5,1
	Ø 400	Исходный	5,82	–	1,4	1,01	0,33	4,62
После ЭЛО		5,66	–	1,43	1,06	0,37	4,74	



Рис. 5. Внешний вид боковой поверхности слитков, оплавленных электронным лучом: а — 530×165; б — диаметр 400 мм

Таблица 2. Техничко-экономические показатели обработки поверхности слитков титановых сплавов

Слиток, мм	Масса слитка, кг	Глубина механической обработки, мм	Потери в стружку, кг	Потери от общей массы слитка, %	Расход электроэнергии при механической обработке, кВт·ч/кг	Расход электроэнергии при оплавлении, кВт·ч/кг
Ø 150	165	5...8	20...30	12...18	0,62	0,71
Ø 400	1130	7...10	50...70	4,5...6,0	0,20	0,39
530×165	810	5...8	60...80	7,5...10,0	0,25	0,72

вов на специализированной электронно-лучевой установке УЭ-185 по разработанной в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины технологии (табл. 2). В полученных данных учитывали удельный расход электроэнергии на оплавление и механическую обработку одного килограмма слитка различного сечения.

Согласно полученным данным технико-экономическая эффективность ЭЛО подтверждается при сравнении показателей удельного расхода электроэнергии на оплавление со статьями совместного учета удельного расхода электроэнергии и потерь металла в стружку при механической обработке.

Результаты выполненных работ показали, что технология и специализированное оборудование для ЭЛО боковой поверхности слитков сложнолегированных титановых сплавов позволяют увеличить выход годного металла до 15 % в зависимости от сечения слитка.

Таким образом, применение технологии ЭЛО поверхности позволяет с высокой степенью эффективности удалять дефекты со слитков сложнолегированных сплавов титана и получать высокое качество металла оплавленного слоя.

Выводы

1. Комплекс проведенных исследований показал, что химический состав металла оплавленного

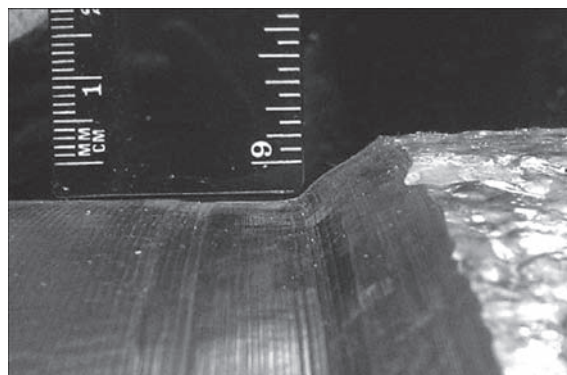


Рис. 6. Глубина обработки поверхности слитка титанового сплава на токарном станке

слоя сложнолегированных титановых сплавов соответствует марочному составу.

2. Показано, что слитки сложнолегированных титановых сплавов, обработанные по технологии ЭЛО, имеют высокое качество поверхности при глубине проплавления до 12 мм, достаточной для эффективного удаления поверхностных дефектов.

3. Экспериментальным путем доказана технико-экономическая эффективность промышленного применения технологии и оборудования ЭЛО титановых сплавов различного сечения.

1. *Титан* / В. А. Гармата, А. Н. Петрунько, Н. В. Галицкий [и др.]. — М.: Металлургия, 1983. — 559 с.
2. *Хореев А. И.* Титановые сплавы, их применение и перспективы развития. / А. И. Хореев, М. А. Хореев // Материаловедение. — 2005. — № 7. — С. 25–34.

3. Хорев А. И. Теория и практика создания титановых сплавов для перспективных конструкций / А. И. Хорев // Технология машиностроения. — 2007. — № 12. — С. 5–13.
4. Титановые сплавы для авиационной промышленности Украины / С. Л. Антонюк, А. Г. Моляр, А. Н. Калинюк [и др.] // Современная электрометаллургия. — 2003. — № 1. — С. 5–10.
5. Электронно-лучевая плавка титана / Б. Е. Патон, Н. П. Тригуб, С. В. Ахонин, Г. В. Жук]. — Киев: Наукова думка, 2006. — 250 с.
6. Шиллер З. Электронно-лучевая технология. / З. Шиллер, У. Гайзик, З. Панцер; пер. с нем. В. П. Цишевского. — М.: Энергия, 1980. — 527 с.
7. Корягин С. И. Способы обработки материалов: [учебное пособие] / С. И. Корягин, И. В. Пименов, В. К. Худяков. — Калининград: Калинингр. ун-т, 2000. — 448 с.
8. Кривоухов В. А. Обработка резанием титановых сплавов / В. А. Кривоухов, А. Д. Чубаров. — М.: Машиностроение, 1990. — 180 с.
9. Созинов А. И. Повышение эффективности черновой обработки заготовок из титановых сплавов / А. И. Созинов, А. Н. Строшков. — М.: Metallurgy, 1990. — 206 с.
10. Ахонин С. В. Моделирование процессов испарения легирующих элементов при электронно-лучевом оплавлении поверхности цилиндрических слитков из сплавов на основе титана / С. В. Ахонин, А. С. Миленин, А. Н. Пикулин // Современная электрометаллургия. — 2005. — № 1. — С. 21–25.
11. Ахонин С. В. Моделирование процессов испарения легирующих элементов при электронно-лучевом оплавлении поверхности слитков-слябов из сплавов на основе титана / С. В. Ахонин, А. С. Миленин, А. Н. Пикулин // Там же. — № 3. — С. 32–35.
12. 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. 12–14.

The integrated research works were carried out for melting of a batch of ingots of complexly-alloyed alloys VT20, VT22, T110 of 150 and 400 mm diameter and ingots of rectangular section of 530×165 mm of alloy VT23 of up to 2000 mm length, respectively. The surface of the produced ingots was subjected to the electron beam treatment in the UE-185 installation. It was shown that the chemical composition of metal of the fused layer of the complexly — alloyed titanium alloys is in compliance with the grade composition, the ingots have the high quality of surface at the depth of penetration of up to 12 mm, sufficient for the effective removal of the surface defects. Technical and economic characteristics of surface treatment of the complexly-alloyed titanium alloys are presented. It is shown that technical and economic efficiency of the electron beam fusion is confirmed when comparing the specific consumption electric energy for fusion with combined account for the specific consumption of energy and metal losses in mechanical treatment. Ref. 12, Tables 2, Figures 6.

Key words: *complexly-alloyed titanium alloy; ingot; electron beam melting; electron beam fusion; fused layer; depth of penetration; metal quality*

Поступила 04.07.2016

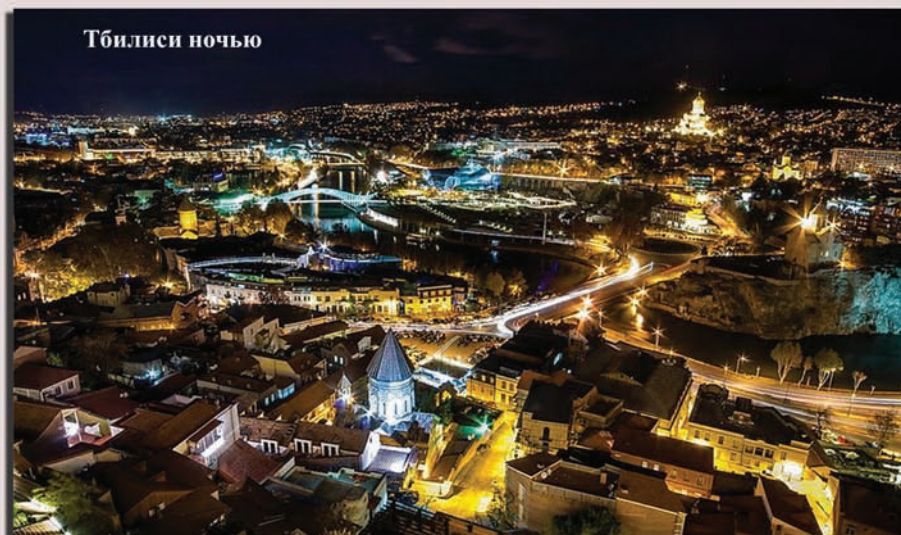


IV МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «НАНОТЕХНОЛОГИИ» (NANO – 2016)

24 – 27 октября 2016, Тбилиси, Грузия

Nano – 2016

<http://nano2016.gtu.ge>



Тбилиси ночью

Организатор: Грузинский технический университет

Тематика конференции:

- нанотехнологии
- нанофизика
- нанохимия
- нанобиология и наномедицина
- наноматериаловедение
- наноинженерия
- нанобезопасность
- нанообразование