

М. М. Ворон, Е. А. Дрозд, Т. В. Лапшук

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРНО-ФАЗОВОГО СОСТОЯНИЯ ЛИТЫХ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ Grade5 и Timet-10-2-3 ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ВЫПЛАВКИ

Исследовано влияние технологических параметров электронно-лучевой литейной технологии и скорости охлаждения металла в литейной форме на структурно-фазовое состояние и механические свойства титановых сплавов Grade5 и Timet-10-2-3. Показано, что избавиться от структурных недостатков литых титановых сплавов можно за счёт использования контролируемого теплоотбора, термической, деформационной обработки, а также их сочетания.

Ключевые слова: электронно-лучевая плавка, структура, фазовое состояние, механические свойства, титановый сплав.

Досліджено вплив технологічних параметрів електронно-променевої ливарної технології та швидкості охолодження металу у ливарній формі на структурно-фазовий стан та механічні властивості титанових сплавів Grade5 і Timet-10-2-3. Показано, що позбутися структурних недоліків литих титанових сплавів можна за рахунок використання контрольованого тепловідбору, термічної, деформаційної обробки, а також їх поєднання.

Ключові слова: електронно-променева плавка, структура, фазовий стан, механічні властивості, титановий сплав.

The influence of technological parameters of electron beam casting technology and metal cooling rates speeds in form on structural-phase state and mechanical properties of titanium alloys Grade5 and Timet-10-2-3 have been investigated. It was shown that to release of structure defects of cast titanium alloys is possible with controllable heat cooling, thermal and deformation treatment, so as well as their combination.

Keywords: electron-beam melting, structure, phase state, mechanical properties, titanium alloy.

Получение фасонных титановых отливок с высоким уровнем механических свойств и регламентированной структурой является едва ли не важнейшей задачей для современной титановой промышленности [1, 2], которую возможно решить благодаря технологии электронно-лучевой гарнисажной плавки (ЭЛГП) с электромагнитным перемешиванием (ЭМП) расплава. Важным преимуществом именно этой технологии является возможность получения широкого спектра литых изделий и полуфабрикатов, которые могут иметь структурные параметры и механические свойства близкие к свойствам деформированного металла. Бесспорное преимущество метода перед похожими технологиями в вопросах получения качественного литья с мелкозернистой структурой и высокими механическими свойствами подтверждает опыт отечественных и зарубежных производственных предприятий и научно-исследовательских институтов [3].

Анализ областей применения титана и его сплавов показывает, что с учётом жёсткой конкуренции с другими материалами, большое значение, наряду с механическими свойствами, имеет стоимость конечных изделий. Поэтому снижение себестоимости полуфабрикатов из титановых сплавов является критически важным заданием, а получение качественных литых изделий – тем более. Так как стоимость губчатого титана и легирующих элементов составляет до 75 % стоимости слитков [4], использование новых технологий, которые дают возможность переделывать

менее качественное, а соответственно, и менее дорогое сырьё, может стать важным резервом для уменьшения стоимости конечной продукции.

В работах [5-9] показана эффективность использования электронно-лучевой технологии для получения разнообразной литой продукции с применением широкого ряда титановых сплавов. В первую очередь отмечаются чистота металла, бездефектность изделий и структурно-фазовые характеристики.

Заслуживает внимания анализ возможностей технологии ЭЛГП с ЭМП расплава реализовать разнообразные виды физического влияния на жидкий металл. Каждое из таких влияний в отдельности проявляется в виде специфического эффекта, но в случае сочетания нескольких из них – характер воздействия на структуру и свойства литого металла оказывается существенно иным [10-13]. Эти особенности указанной технологии изучены частично и требуют проведения исследований, которые бы расширили представление о влиянии технологических факторов метода ЭЛГП с ЭМП расплава на свойства литого металла.

Особенный интерес в качестве объектов исследований представляют двухфазные титановые сплавы, для которых условия плавки и литья оказывают существенное влияние из-за чувствительности фазовых составляющих к термодинамическим условиям процесса. Такими сплавами для исследований были выбраны: наиболее популярный в мире коммерческий сплав VT6 (Grade5) и сплав Timet-10-2-3. Если VT6 является стандартным двухфазным $\alpha+\beta$ -сплавом с содержанием β -фазы 12-20 %, то сплав Timet-10-2-3 относится к псевдо- β -сплавам с содержанием β -фазы около 30 %.

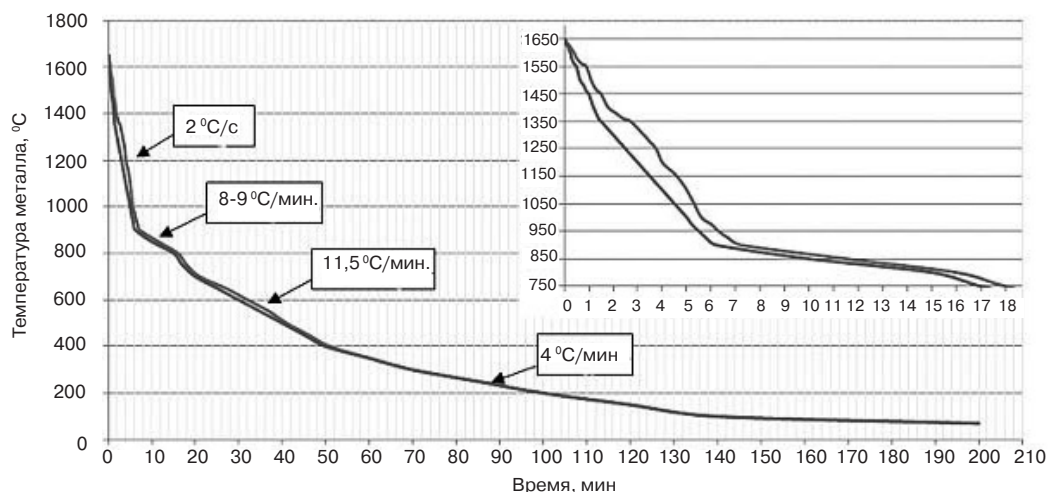
Именно соотношение фаз, размеры и распределение β -фазы и наличие «фазовых производных» определяют комплекс механических свойств изделия. Обычно эти параметры регулируются деформационной и термической обработками, или их сочетанием. В случае получения литых изделий, важным является понимание исходного состояния отливок и особенности влияния на это состояние технологических параметров плавки и литья.

Для проведения опытных плавки использовали полупромышленную электронно-лучевую литейную установку ЭЛЛУ-4, оснащённую медным водоохлаждаемым гарнисажным тиглем с системой электромагнитного перемешивания расплава. Исследуемые сплавы плавил по разным режимам и заливали в стальные и графитовые литейные формы, в результате чего получали цилиндрические отливки диаметрами 55, 65 и 75 мм, массой 4,2-9,6 кг.

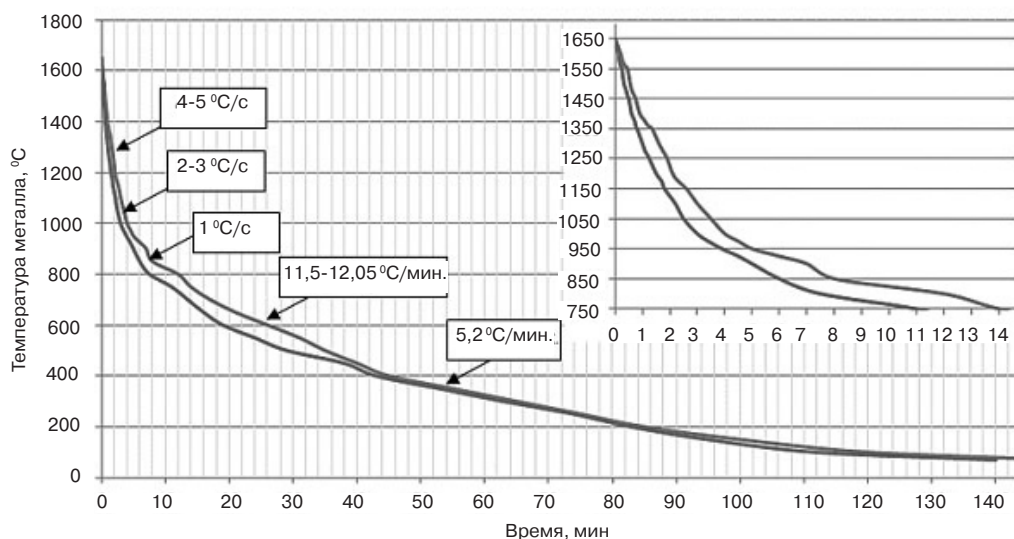
С целью оценки влияния размеров и материала литейных форм на скорость охлаждения металла измеряли изменение температуры залитого металла во времени. Ниже центра формы размещали термомпару в керамической трубке таким образом, чтобы спай термомпары контактировал с металлом в месте равноудалённом от стенок формы. Сигнал термомпары поступал на аналого-цифровой преобразователь и дальше на персональный компьютер. Обработанные цифровые данные в программе Excel MS Office 2010 представлены на рис. 1 в виде графиков скоростей охлаждения металла в формах. Анализ полученных данных показал, что скорость охлаждения металла в формах из одинакового материала мало зависит от размеров самой формы и массы слитого металла. Заметная разница скоростей исчезает при 900 °С для графитовых форм и при 400 °С для стальных.

Из центральной части каждой отливки вырезали образцы для последующих исследований структуры и механических свойств по стандартным методикам. Для каждого сплава исследовали необходимые характеристики в литом и термообработанном состояниях. В качестве термообработки использовали отжиг для снятия напряжений, что давало возможность оценить свойства металла в литом состоянии без кардинальных изменений структурно-фазового состава.

Исследуемые образцы характеризовались существенными отличиями макро- и микроструктуры, которые являются свидетельством влияния на технологичность литого металла для последующих деформационной и механической обработок и меньшей мерой на фазовый состав и механические свойства. Оценка механических свойств была проведена методом испытания на временное сопротивление нагрузке для каждого сплава. Результаты испытаний приведены в табл. 1.



а



б

Рис. 1. Скорость охлаждения металла в разных литейных формах: а – графитовая форма (верхняя линия – форма Ø 75 мм, масса слитого металла 7,85 кг; нижняя линия – форма Ø 55 мм, масса слитого металла 4,24 кг); б – стальная форма (верхняя линия – форма Ø 75 мм, масса слитого металла 9,6 кг; нижняя линия – форма Ø 55 мм, масса слитого металла 3,4 кг)

α + β -сплав ВТ6 характеризуется несколько низкой пластичностью в литом состоянии, которая повышается после отжига для снятия напряжений. Прочность этого сплава в обоих случаях находится на достаточно высоком уровне. Сплав Timet-10-2-3 при достаточной прочности в литом состоянии имеет слишком низкую пластичность. После отжига для снятия напряжений его прочность снижается.

Для расширения представлений о причинах формирования комплекса механических свойств титановых сплавов, полученных по технологии ЭЛГП с ЭМП расплава, был проведён фазовый анализ опытных образцов (табл. 2).

Фазовый анализ не объясняет заниженную пластичность опытных сплавов, поэтому было использовано исследование микроструктуры с помощью электронной микроскопии, что позволило оценить химический состав фаз, границ зёрен и включений. Результаты исследований показаны на рис. 2.

Микроструктурный анализ с локальным анализом химического состава показали, что относительно низкую пластичность отливок сплава ВТ6 можно объяснить

Таблица 1. Сравнение механических свойств литых опытных титановых сплавов со свойствами аналогичных сплавов в других состояниях

Сплав	Состояние	НВ	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_b , МПа	δ , %	Ψ , %
ВТ6 ($\alpha+\beta$ -сплав)	ЭЛГП	315-325	910	982	3,5	8,0
	ЭЛГП + ТО	285-305	918	975	6,0	12,0
	Литой (ВИП)	275-345	640	790	6-9	15
	деформированный	255-341	720	835-885	6-8	15-20
	повышенного качества	255-341	730-810	835-1050	6-10	20-30
Timet-10-2-3 (псевдо- β -сплав)	ЭЛГП	285-321	995	1047	1,0	2,0
	ЭЛГП + ТО	285-302	860	873	1,0	1,0
	Литой (ВИП)	302-380	920-1000	975-1100	4-6	6-10
	деформированный	302-340	860-895	942-965	5-8	14-20
	закалка+старение	315-360	985-1100	1050-1193	10-12	4-6

Таблица 2. Фазовый состав опытных серийных сплавов

Сплав	ВТ6	ВТ6*	Timet-10-2-3	Timet-10-2-3*
Содержание α -фазы, %	84,7	87,9	69,7	58,6
Содержание β -фазы, %	14,3	12,1	30,3	41,4

* литой после отжига для снятия напряжений

характерными для литого состояния микроструктурными особенностями – неоднородными разориентированными колониями пластин β -фазы. Также были обнаружены области в колониях β -фазы, имеющие повышенное содержание ванадия. Это предопределяет уменьшение количества β -фазы на границах зёрен и появление на её месте пограничной α -фазы, что снижает пластичность металла. После термической обработки можно заметить незначительное увеличение размеров пластин α -фазы и выравнивание границ их колоний. Уменьшение степени легирования тонких α -пластин ванадием свидетельствует об усилении стабилизации β -фазы на границах зёрен, однако пограничная α -фаза при этом не исчезает.

В β -сплаве Timet-10-2-3 наблюдается развитая пограничная α -фаза на границах первичного β -зерна (макрозерно). Это является основной причиной низкой пластичности литых образцов. После термической обработки этого сплава наблюдается измельчение α -фазы, но её более равномерное распределение внутри β -фазы. Однако, существующая до термообработки α -фаза на границах первичного β -зерна не исчезает, поэтому с повышением общего количества β -фазы пластичность всё равно не увеличивается.

Уменьшение количества β -фазы в литых титановых сплавах связано в первую очередь с низкой скоростью охлаждения металла в литейных формах. Существующие технологические условия ЭЛГП с ЭМП расплава способствуют получению фазового состояния, приближённого к равновесному. Избавиться от структурных недостатков литого состояния титановых сплавов, полученных методом ЭЛГП с ЭМП расплава, возможно с использованием контролируемого теплоотбора, термической, деформационной обработки, а также их сочетания.

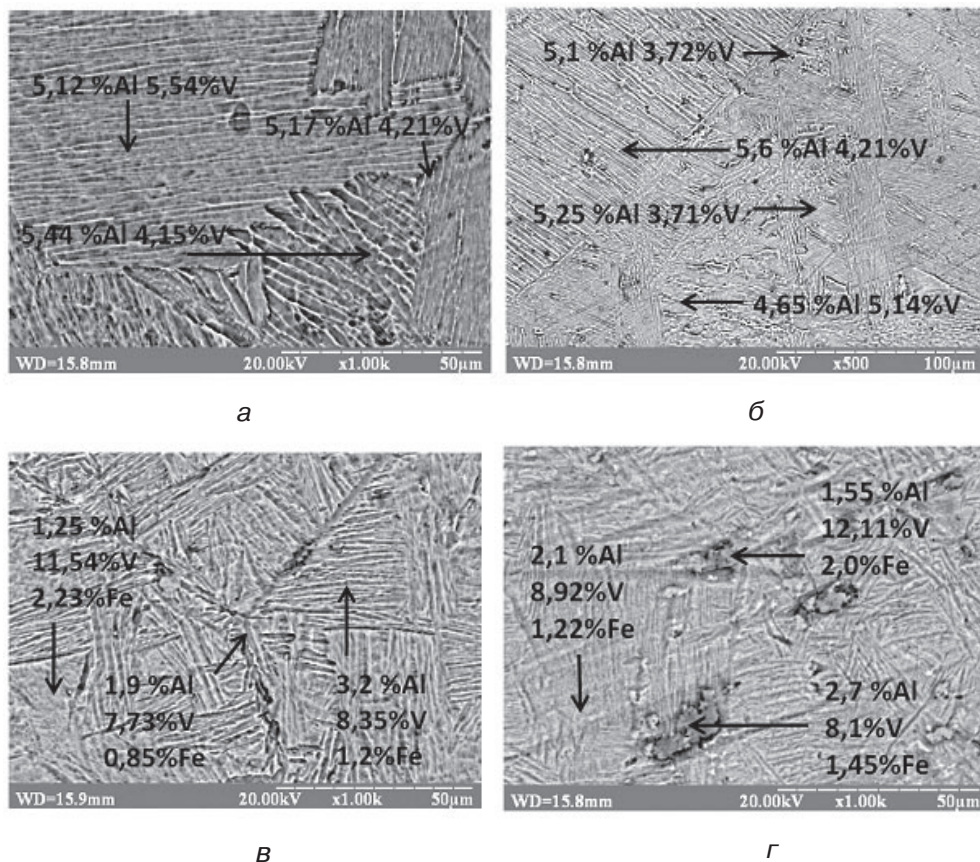


Рис. 2. Микроструктуры отливок серийных опытных сплавов: а – сплав ВТ6 литой, б – сплав ВТ6 литой после отжига, в – сплав Timet-10-2-3 литой, г – сплав Timet-10-2-3 литой после отжига



Список литературы

1. Анташев В. Г., Ночовная Н. А. Современное состояние и тенденции развития исследований в области титановых сплавов // Все матер. Энциклопедич. справочник. – 2008. – № 3. – С. 24-27.
2. Ermachenko A. G., Kashaev R. M. Production of aircraft engine compressor rotor discs with desired service life in titanium alloys // Material physics and mechanics. – 2011. – № 11. – P. 118-125.
3. Волков А. Е. Новые металлургические процессы и оборудование для производства титановых сплавов / А. Е. Волков. – Екатеринбург: УрО РАН, 2006. – 193 с.
4. Аношкин Н. Ф. Проблема использования отходов в шихте при производстве слитков титановых сплавов / Н. Ф. Аношкин, В. А. Фролов // Титан. – 1993. – № 4. – С. 25-29.
5. Ковальчук Д. В. Электронно-лучевой переплав титана – проблемы и перспективы развития / Д. В. Ковальчук, Н. П. Кондратий // Ti-2008 в СНГ. Сборник трудов международной конференции, Россия, г. Санкт-Петербург, 18-21 мая 2008. – С. 25-32.
6. Гладков А. С. Особенности выплавки сложнoleгированных сплавов на основе титана и циркония в электронно-лучевых литейных гарнисажных установках / А. С. Гладков, Н. И. Левицкий, В. Б. Чернявский и др // Ti-2008 в СНГ. Сборник трудов международной конференции, Россия, г. Санкт-Петербург, 18-21 мая 2008. – С. 50-53.
7. Вахрушева В. С. Использование литых заготовок нового типа для производства труб из титана / В. С. Вахрушева, Т. Н. Буряк // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2001. – № 1. – С. 60-63.

8. Александров В. К. Полуфабрикаты из титановых сплавов / В. К. Александров, Н. Ф. Аношкин, Г. А. Бочвар и др. – М.: Metallurgiya, 1979. – 512 с.
9. Ladokhin S.V., Levitsky N.I., Chernyavsky V.B. et al. Titanium and zirconium tube billets production in the electron-beam casting instalations // Proceedings of 7th International conference on electron beam technologies, Bulgaria, Varna, 1-6 June, 2003. – P. 241-246.
10. Ефимов В. А. Технологии современной металлургии / В. А. Ефимов, А. С. Эльдарханов – М.: Новые технологии, 2004. – 784 с.
11. Повх Т. Л. Магнитная гидродинамика в металлургии / Т. Л. Повх, А. Б. Капуста, Б. В. Генкин, – М.: Metallurgiya, 1971. – 240 с.
12. Дубоделов В. И. Состояние и перспективы развития исследований и разработок в области металлургической магнитной гидродинамики / В. И. Дубоделов // Процессы литья. – 1998. – № 3-4. – С. 36-43.
13. Ефимов В. А. Современные технологии разливки и кристаллизации сплавов / В. А. Ефимов, А. С. Эльдарханов. – М.: Машиностроение, 1998. – 360 с.



References

1. Antashev V. G., Nochovnaia N. A. (2008). Sovremennoe sostoiianie i tendentsii razvitiia issledovani v oblasti titanovykh spлавov. [*Current status and trends of research in the field of titanium alloys*]. Vse materialy. Enciklopedicheskii spravochnik, № 3, pp. 24-27. [in Russian]
2. Ermachenko A. G., Kashaev R. M. (2011). Production of aircraft engine compressor rotor discs with desired service life in titanium alloys. Material physics and mechanics, № 11, pp. 118-125. [in English].
3. Volkov A. E. (2006). Novyye metallurgicheskie protsessy i oborudovaniie dlia proizvodstva titanovykh spлавov. [*New metallurgical processes and equipment for the production of titanium alloys*]. Ekaterinburg: UrO RAN, 193 p. [in Russian].
4. Anoshkin N. F., Frolov V. A. (1993). Problema ispol'zovaniia otkhodov v shihite pri proizvodstve slitkov titanovykh spлавov. [*The problem of waste management in the charge in the production of ingots of titanium alloys*]. Titan, № 4, pp. 25-29. [in Russian].
5. Koval'chuk D. V., Kondratii N. P. Elektronno-luchevoi pereplav titana – problemy i perspektivy razvitiia. [*Electron beam melting of titanium – problems and prospects of development*]. Ti-2008 v SNG. Sbornik trudov mezhdunarodnoi konferencii, Russia, Sankt-Peterburg, 18-21 of may, 2008. pp. 25-32. [in Russian].
6. Gladkov A. S., Levickii N. I., Cherniavskii V. B. et al. Osobennosti vyplavki slozhnolegirovannykh spлавov na osnove titana i cirkoniia v elektronno-luchevykh liteinykh garnisazhnykh ustanovkakh. [*Features smelting complex alloys based on titanium and zirconium in the cathode-ray of skull casting plants*]. Ti-2008 v SNG. Sbornik trudov mezhdunarodnoi konferencii, Russia, Sankt-Peterburg, 18-21 of may, 2008. pp. 50-53. [in Russian].
7. Vahrusheva V. S., Burjak T. N. (2001). Ispol'zovanie litykh zagotovok novogo tipa dlia proizvodstva trub iz titana. [*Using a new type of cast blanks for the production of titanium tubing*]. Metallurgicheskaiia i gornorudnaia promyshlennost', № 1. pp. 60-63. [in Russian].
8. Aleksandrov V. K., Anoshkin N. F., Bochvar G. A. et al. (1979). Polufabrikaty iz titanovykh spлавov. [*Semi-finished products made of titanium alloys*]. Moscow: Metallurgiiia, 512 p. [in Russian].
9. Ladokhin S. V., Levitsky N. I., Chernyavsky V. B. et al. Titanium and zirconium tube billets production in the electron-beam casting installations. Proceedings of 7th International conference on electron beam technologies, Bulgaria, Varna, 1-6 June, 2003, pp. 241-246. [in English].
10. Efimov V. A., El'darkhanov A. S. (2004). Tekhnologii sovremennoi metallurgii. Technology of modern metallurgy. Moscow: Novyye tekhnologii, 784 p. [in Russian].
11. Povkh T. L., Kapusta A. B., Genkin B. V. (1971). Magnitnaia gidrodinamika v metallurgii. [*Magnetic Hydrodynamics in metallurgy*]. Moscow: Metallurgiiia, 240 p. [in Russian].
12. Dubodelov V. I. (1998). Sostoiianie i perspektivy razvitiia issledovaniia i razrabotok v oblasti metallurgicheskoi magnitnoi gidrodinamiki. [*State and prospects of research and development in the field of metallurgy magnetohydrodynamics*]. Protsessy lit'ia, № 3-4, pp. 36-43. [in Russian].
13. Efimov V. A., El'darhanov A. S. (1998). Sovremennyye tehnologii razlivki i kristallizatsii spлавov. [*Current technology of casting and crystallization alloys*]. Moscow: Mashinostroeniie, 360 p.

Поступила 07.04.2016