

**М. М. Ворон**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., e-mail: mihail.voron@gmail.com

**Е. А. Дрозд**, мл. науч. сотр.

**Е. А. Матвиец**, гл. технолог

**В. Ю. Сухенко\***, канд. техн. наук, доцент

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

\*Национальный технический университет Украины «КПИ им. Игоря Сикорского», Киев

## Влияние температуры литейной формы на структуру и свойства отливок титанового сплава ВТ6 электронно-лучевой выплавки

*Показаны особенности дефектности, структурных параметров и механических свойств отливок титанового сплава ВТ6, получаемых в условиях электронно-лучевой литейной технологии. Исследовано влияние нагрева литейной формы на уменьшение дефектности отливок, изменение их структурных параметров и механических свойств.*

**Ключевые слова:** титановые сплавы, электронно-лучевая плавка, электронно-лучевая литейная технология, титановое литье, сплав ВТ6.

Титановые сплавы относятся к одним из наиболее перспективных материалов современности. Постоянно растущее их потребление требует развития эффективных технологий производства и обработки [1–3]. Классические технологические цепочки производства готовой продукции из титановых сплавов весьма затратны и многостадийны, поэтому все чаще внимание уделяется литейным технологиям, способным обеспечить получение качественной готовой продукции в виде отливок и полуфабрикатов [3, 4].

Электронно-лучевая литейная технология относится к ряду решений, предназначенных для получения широкой номенклатуры готовых изделий и полуфабрикатов из титана и его сплавов. Этот метод является гибким и практичным с точки зрения многозадачности в вопросах получения мелкосерийного и маловесного литья (массой до 50 кг), позволяет осуществлять выплавку сложнелегированных и многокомпонентных сплавов, дает возможность использовать до 100 % отходов производства в качестве шихты. Электронно-лучевая литейная технология имеет некоторые особенности ведения процесса плавки, которые обеспечивают контроль времени существования расплава, изменение его температуры и рафинирование, что в совокупности реализует своеобразную обработку жидкого металла [1, 5]. Технологические особенности метода позволяют также получать литой металл с некоторыми свойствами, характерными для деформированного металла, что обуславливает некоторое дополнительное преимущество технологии [5–8].

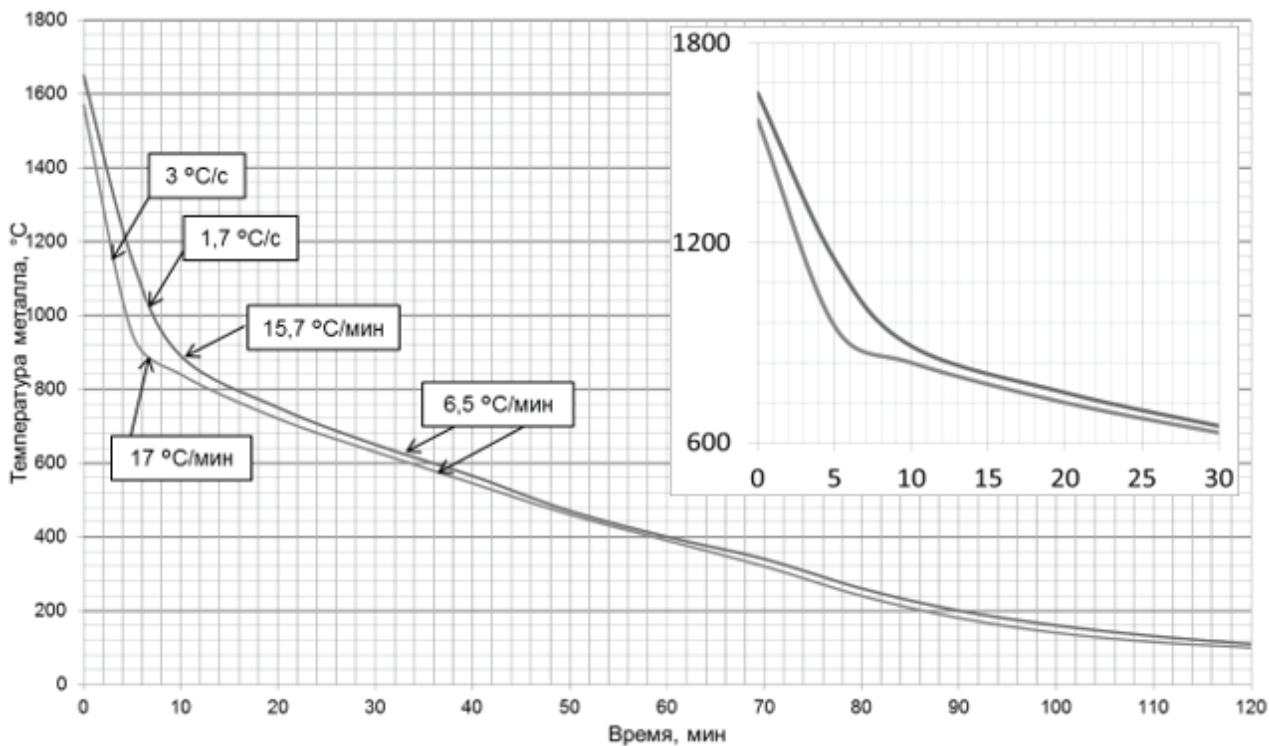
Тем не менее, вместе с преимуществами существуют и недостатки метода, основными из которых являются усадочные дефекты в виде осевой пористости и низкая пластичность многих сплавов в литом состоянии. Пожалуй, одним из определяющих факто-

ров, влияющих на дефектность, структуру, фазовый состав и свойства отливки, является скорость охлаждения металла в литейной форме. Для электронно-лучевой литейной технологии используется всего несколько материалов форм, что и определяет скорость кристаллизации, дальнейшее охлаждение металла и формирование связи «структура-свойства».

Для двухфазных титановых сплавов существует ряд особо важных нерешенных вопросов, связанных с факторами, влияющими на формирование структуры, фазового состава и свойств металла при получении отливок, в том числе в условиях электронно-лучевой литейной технологии [9, 10]. Для этого класса материалов важным является понимание не только процесса кристаллизации, но и фазовой перекристаллизации в зависимости от технологических условий плавки и литья. Поскольку в условиях электронно-лучевой технологии невозможно осуществить существенный перегрев расплава [1], то роль решающего фактора в процессе структуро- и фазообразования будет играть литейная форма и процесс теплоотвода, который она обеспечит.

Для исследований вопроса использовали самый распространенный титановый сплав ВТ6 (Grade 5), который относится к двухфазным ( $\alpha+\beta$ )-сплавам. Было проведено две экспериментальные плавки, в ходе которых применялись одинаковые технологические режимы и, литьем в стальную цилиндрическую форму, были получены отливки одинаковой массы. Разница заключалась в том, что одна из отливок была получена заливкой в предварительно подогретую до 300 °С форму. Скорость охлаждения металла в форме показана на рис. 1.

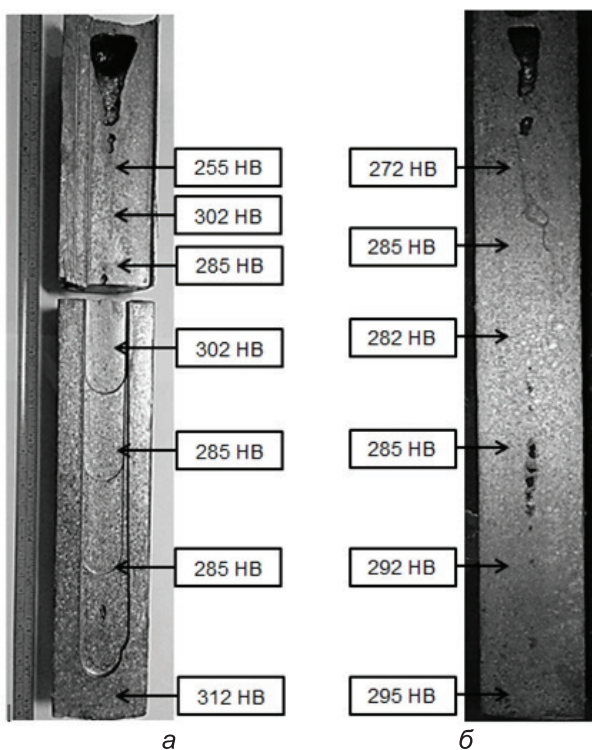
Графики показывают, что скорости охлаждения металла в формах с разными температурами не сильно отличаются и постепенно выравниваются,



**Рис. 1.** Графики скоростей охлаждения металла после заливки в форму: кривая сверху – охлаждение металла в подогретой форме; кривая снизу – охлаждение металла в форме без подогрева

начиная с температур в области 800–900 °С, что несколько ниже температуры полиморфного превращения. Именно эта незначительная разница может определять характерные отличия структуры, фазового состава и свойств опытных отливок.

Полученные цилиндрические отливки распиливали на две части по вертикальной плоскости. Исследовали дефектность отливки, макроструктуру и твердость по сечению, что показано на рис. 2.



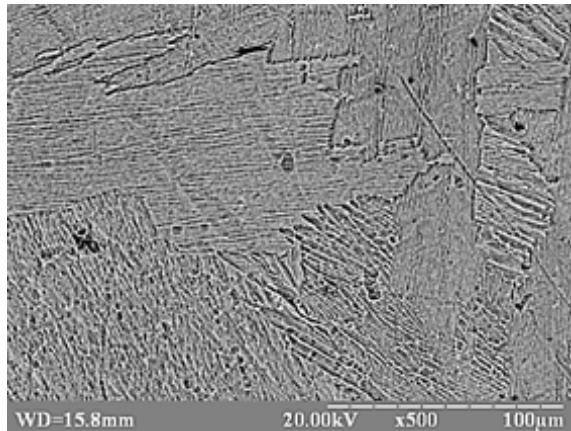
**Рис. 2.** Отливки сплава ВТ6 в разрезе: а – литые в холодную форму; б – литые в подогретую форму

На рисунке видно, что в обоих случаях макроструктура отливок представлена мелкими равноосными зернами без столбчатых и крупных глобулярных кристаллов, что указывает на быстрое протекание процесса кристаллизации. Слиток, полученный литьем в форму без подогрева, имеет рассредоточенную усадочную пористость, в то время как другой образец характеризуется локализованным скоплением дефектов в виде объемной усадки. Оба варианта, с точки зрения дефектности, нельзя считать благоприятными. ДюрOMETрические испытания показывают, что отливка, показанная на рис. 2 (б) имеет более гомогенную структуру и равномерность свойств по сечению.

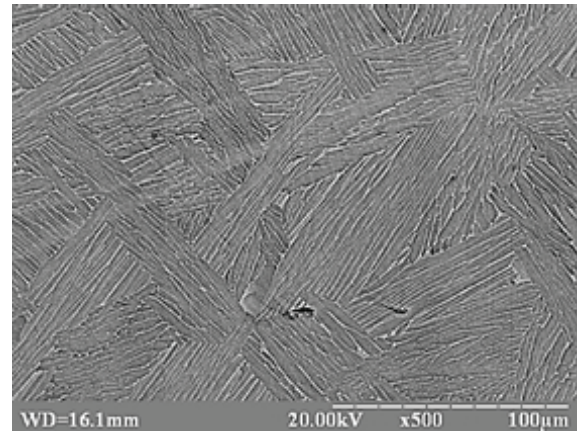
Обычно литые титановые сплавы не поддаются эффективной термообработке из-за неоднородной структуры, поэтому их сперва подвергают деформации [9]. Однородность и дисперсность макроструктуры полученных отливок сплава ВТ6 позволяют предположить, что они могут быть подвергнуты термической обработке без предварительной деформации. Ввиду этого, был проведен сравнительный микроструктурный анализ металла отливок в литом и термообработанном состояниях. Результаты представлены на рис. 3–5.

Металл отливки, залитой в холодную форму, имеет слабые признаки видманштетовой структуры, неравномерные колонии пластин  $\alpha$ -фазы неодинаковых размеров. Структура металла отливки, полученной литьем в подогретую форму, имеет значительно более равномерную микроструктуру при общих намного более крупных структурных составляющих.

После закалки и старения в обоих случаях наблюдается некоторая наследственность литой структуры в отношении сохранения границ бывших колоний

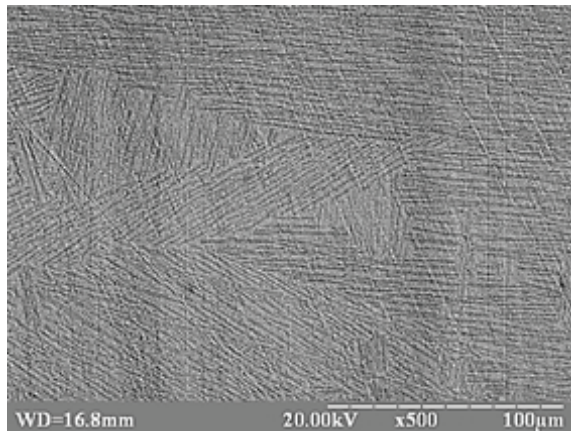


а

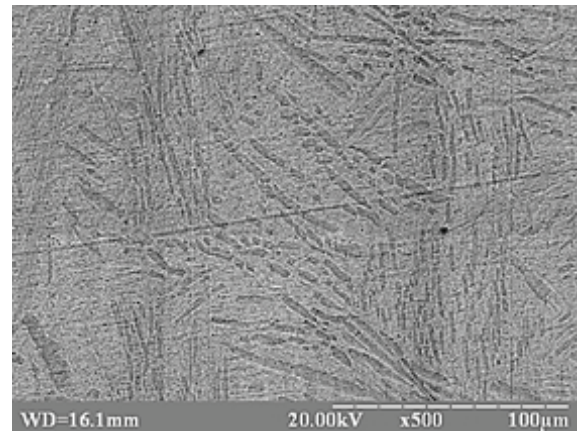


б

**Рис. 3.** Микроструктура сплава BT6 в литом состоянии: а – холодная форма; б – подогретая форма

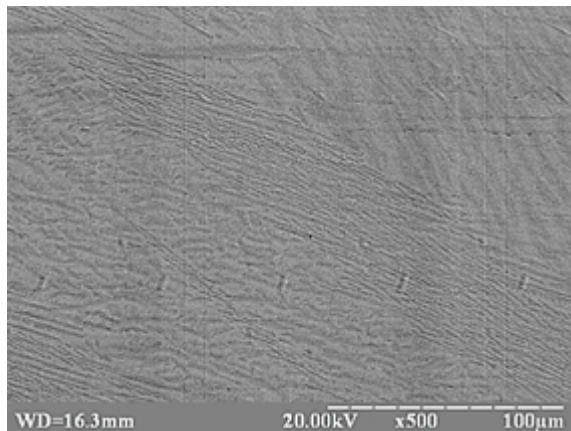


а

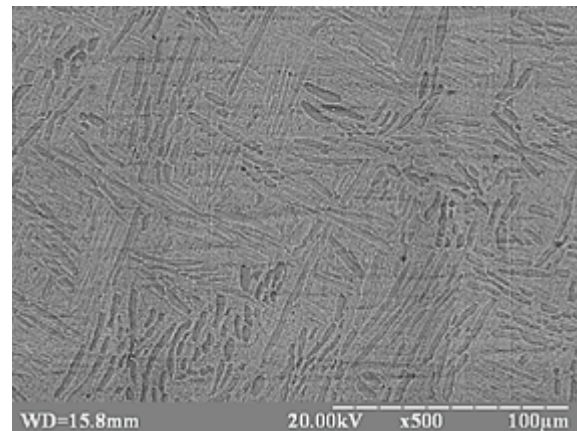


б

**Рис. 4.** Микроструктура сплава BT6 после закалки и старения на прочность: а – холодная форма; б – подогретая форма



а



б

**Рис. 5.** Микроструктура сплава BT6 после закалки и отпуска на пластичность: а – холодная форма; б – подогретая форма

пластин  $\alpha$ -фазы. Исходная крупнозернистость металла отливки, полученного литьем в форму с подогревом, оказывает негативное влияние на равномерность распределения фаз и легирующих элементов. Это выступает причиной образования крупных и неоднородных частиц упрочняющей фазы. Структура металла, залитого в холодную форму, в этом случае имеет более благоприятное исходное состояние для последующей термообработки, но все-таки является недостаточно дисперсной и однородной, для достижения эффекта подобного термической обработке дефор-

мированного металла, о чем свидетельствуют данные механических свойств, приведенные в таблице.

### Выводы

Электронно-лучевую литейную технологию можно по праву считать перспективным методом получения титанового литья с высоким уровнем механических свойств в литом состоянии. Существенным недостатком технологии является сложность устранения литейных дефектов. Подогрев литейной формы не

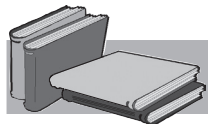
## Механические свойства полученных отливок сплава ВТ6 в разных состояниях и их сравнения со стандартными аналогами

Сплав	Состояние	НВ	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %
Форма без подогрева	литой	295	910	982	3,5	8
	полный отжиг	282	885	932	5	7
	литой+*	345	982	1147	–	–
	литой+**	317	932	1092	4	2
Форма с подогревом	литой	285	918	975	5	7
	полный отжиг	272	845	932–1015	3–4,5	8–9,3
	литой+*	312	1057	1320	–	–
	литой+**	302	947	1147	3	–
Стандарт	деф.+отжиг	255–341	720	835–885	6–8	15–20
	повыш. качества	255–341	730–810	835–1050	6–10	20–30

\* – закалка 980 °С + старение 530 °С, \*\* – закалка 980 °С + старение 530 °С

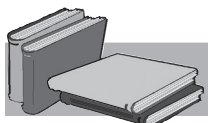
устраняет дефектность отливок и способствует изменению структурных составляющих сплава в негативную сторону. Это выражается в образовании крупных структурных составляющих, которые не способны обеспечить необходимый комплекс механических свойств на уровне деформированного металла. Термическая обработка не устраняет неблагоприятные особенности исходной структуры и не позволяет повысить пластичность металла, хотя существенно повышает его прочность. Металл отливки, полученной

литьем в холодную форму, имеет лучшие показатели структуры и свойств, но не лишен недостатков, причина которых заключаются в неравномерности морфологии и размеров колоний пластин  $\alpha$ -фазы. Интенсификация охлаждения металла в диапазоне температур около температуры полиморфного превращения, предположительно, может позволить устранить описанные недостатки.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Электронно-лучевая плавка в литейном производстве / Под ред. С. В. Ладохина – Киев: «Сталь», 2007. – 626 с.
2. *Полькин И. С.* Перспективные направления науки о титане // Ti-2008 в СНГ. Сборник трудов международной конференции. Россия, Санкт-Петербург, 18-21 мая 2008 г. – С. 33–40.
3. *Волков А. Е.* Новые металлургические процессы и оборудование для производства титановых сплавов. – Екатеринбург: УрО РАН, 2006. – 193 с.
4. *Аношкин Н. Ф., Глазунов С. Г., Морозов Е. И., Тетюхин В. В.* Плавка и литье титановых сплавов. – М.: Металлургия, 1978. – 385 с.
5. *Ворон М. М.* Оценка технологических факторов электронно-лучевой плавки, влияющих на структуру и свойства литых титановых сплавов // Вісник СевНТУ. Серія: Механіка, енергетика, екологія. – 2013. – № 137. – С. 244–250.
6. *Ворон М. М., Дрозд Е. А., Сухенко В. Ю., Сулева В. М.* Вплив параметрів технологічного процесу на формування титанового сплаву електронно-променевої виплавки // XV ВНПК «Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра», Київ, НТУУ «КПІ», 11.04.17. – С. 287–295.
7. *Voron M., Doniy A.* Structure and properties management of cast  $\alpha$ -titanium alloys, produced by electron beam skull melting with electromagnetic stirring. *Electrotechnika & elektronika E+E*. – 2014. – vol. 49. – № 5/6. – P. 144–150.
8. *Ворон М. М., Левицький М. І., Лалшук Т. В.* Структура та властивості литих сплавів системи Ti-Al-V електронно-променевої виплавки // Металознавство та обробка металів. – 2015. – № 2 (74). – С. 29–37.
9. *Колачев Б. А., Елагин В. И., Ливанов В. А.* Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов. – М.: МИСиС, 2005. – 432 с.
10. *Ильин А. А., Колачев Б. А., Полькин И. С.* Титановые сплавы: состав, структура, свойства. Справочник. – М.: ВИЛС-МАТИ, 2009. – 520 с.



## REFERENCES

1. *Ladokhin S. V. (ed.) (2007).* Elektronno-luchevaia plavka v liteinom proizvodstve [*Electron beam melting in foundry*]. Kiev: Stal', 626 p. [in Russian].
2. *Pol'kin I. S. (2008).* Perspektivnye napravleniia nauki o titane [*Perspective directions of the science of titanium*]. Ti-2008 v SNG. Sbornik trudov mezhdunarodnoi konferentsii. Rossiia, Sankt-Peterburg, 18-21 maia 2008 g., pp. 33–40 [in Russian].

3. Volkov A. E. (2006). *Novye metallurgicheskie protsessy i oborudovanie dlia proizvodstva titanovykh splavov* [New metallurgical processes and equipment for the production of titanium alloys]. Ekaterinburg: UrO RAN, 193 p. [in Russian].
4. Anoshkin N. F., Glazunov S. G., Morozov E. I., Tetiukhin V. V. (1978). *Plavka i lit'e titanovykh splavov* [Melting and casting of titanium alloys]. Moscow: Metallurgiya, 385 p. [in Russian].
5. Voron M. M. (2013). Otsenka tekhnologicheskikh faktorov elektronno-luchevoi plavki, vliiaushchikh na strukturu i svoistva litykh titanovykh splavov [Estimation of technological factors of electron beam melting, affecting the structure and properties of cast titanium alloys]. *Visnik SevNTU. Seriya: Mekhanika, energetyka, ekologiya*, no. 137, pp. 244–250 [in Russian].
6. Voron M. M., Drozd E. A., Sukhenko V. Yu., Suleva V. M. (2017). Vplyv parametriv tekhnologichnogo protsesu na formuvannia tytanovogo splavu elektronno-promenevoi vyplavky [The influence of the parameters of the technological process on the formation of the titanium alloy of electron-beam smelting]. *XV VNPК «Spetsial'na metallurgiya: vchora, s'ogodni, zavtra»*, Kyiv, NTUU «KPI», 11.04.17, pp. 287–295 [in Ukrainian].
7. Voron M., Doniy A. (2014). [Structure and properties management of cast  $\alpha$ -titanium alloys, produced by electron beam skull melting with electromagnetic stirring]. *Electrotekhnika & elektronika E+E*, vol. 49, no. 5/6, pp. 144–150 [in English].
8. Voron M. M., Levits'kiy M. I., Lapshuk T. V. (2015). Struktura ta vlastyvoli litykh splaviv systemy Ti-Al-V elektronno-promenevoi vyplavky [The structure and properties of cast-iron alloys of the Ti-Al-V system of electron-beam smelting]. *Metaloznavstvo ta obrobka metaliv*, no. 2 (74), pp. 29–37 [in Ukrainian].
9. Kolachev B. A., Elagin V. I., Livanov V. A. (2005). *Metallovedenie i termicheskaia obrabotka tsvetnykh metallov i splavov* [Metallurgy and heat treatment of non-ferrous metals and alloys]. Moscow: MISiS, 432 p. [in Russian].
10. Il'in A. A., Kolachev B. A., Pol'kin I. S. (2009). *Titanovye splavy: sostav, struktura, svoistva. Spravochnik* [Titanium alloys: composition, structure, properties. Directory]. Moscow: VILS-MATI, 520 p. [in Russian].

### Анотація

*Voron M. M., Drozd E. O., Matviets' E. O., Sukhenko V. Yu.*

Вплив температури ливарної форми на структуру і властивості виливків титанового сплаву VT6 електронно-променевої виплавки

*Показано особливості дефектності, структурних параметрів і механічних властивостей виливків титанового сплаву VT6, одержуваних в умовах електронно-променевої ливарної технології. Досліджено вплив нагріву ливарної форми на зменшення дефектності виливків, зміну їх структурних параметрів і механічних властивостей.*

### Ключові слова

*Титанові сплави, електронно-променева плавка, електронно-променева ливарна технологія, титанове лиття, сплав VT6.*

### Summary

*Voron M., Drozd E., Matviets E., Sukhenko V.*

Effect of mold temperature on the structure and properties of castings of a titanium alloy VT6, obtained by electron-beam melting

*Specific features of defectiveness, structural parameters and mechanical properties of titanium alloy VT6 (Grade 5), obtained in the conditions of electron-beam casting technology, are shown. The influence of casting mold heating on castings defectiveness decrease, change of their structural parameters and mechanical properties were studied.*

### Keywords

*Titanium alloys, electron-beam melting, electron-beam casting technology, titanium casting, VT6 alloy (Grade 5).*

Поступила 12.01.18