

# СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ТИТАНОВОГО СПЛАВА VT19, ПОЛУЧЕННОГО СПОСОБОМ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ПЛАВКИ, ПОСЛЕ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

С. В. Ахонин<sup>1</sup>, А. Ю. Северин<sup>1</sup>, В. Ю. Белоус<sup>1</sup>, В. А. Березос<sup>1</sup>,  
А. Н. Пикулин<sup>1</sup>, А. Г. Ерохин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины.

03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>2</sup>ГП «НПЦ «Титан» ИЭС им. Е.О.Патона НАН Украины».

03028, г. Киев, ул. Ракетная, 26. E-mail: titan.paton@gmail.com

Проведены работы по получению деформированных листовых полуфабрикатов из слитков электронно-лучевой плавки диаметром 110 мм высоколегированного псевдо- $\beta$  титанового сплава VT19. После термомеханической обработки исследована микроструктура сплава. Определено, что структура титанового сплава VT19, полученного способом электронно-лучевой плавки, после прокатки состоит из равноосных полиэдрических первичных  $\beta$ -зерен, а внутривзеренная структура представлена дисперсной  $\alpha$ -фазой. Установлено, что после проведенной термомеханической обработки лист имеет неоднородную по толщине структуру. Прокатанные листы сплава VT19 электронно-лучевой плавки после отжига при температуре 750 °С показывают значение предела прочности 958 МПа при относительном удлинении  $\delta_s = 12\%$ . Библиогр. 9, табл. 3, ил. 7.

**Ключевые слова:** электронно-лучевая плавка; сплав; термомеханическая обработка; структура; фаза; зерно; свойства

Псевдо  $\beta$ -титановые сплавы (VT35, VT19, VT32 и др.) относятся к высоколегированным сплавам, в которых суммарное содержание легирующих элементов доходит до 25 % и более. К преимуществам этих сплавов относят высокую технологическую пластичность в закаленном состоянии, что позволяет осуществлять некоторые операции обработки давлением даже при комнатной температуре; глубину прокаливаемости; вязкость разрушения при значительных прочностных характеристиках; высокое сопротивление усталости [1–3]. В частности, сплав VT19 обладает хорошим комплексом механических и технологических свойств: в закаленном состоянии имеет удовлетворительную прочность и хорошую пластичность ( $\sigma_B \approx 1000$  МПа,  $\delta \approx 11\%$ ). Операция

старения вызывает сильное упрочнение материала — до 1550 МПа, при  $\delta \approx 4..5\%$ . Сплав VT19 обладает хорошей технологической пластичностью как при горячей, так и при холодной обработке давлением. Хорошо сваривается. По сравнению с другими  $\beta$ -сплавами имеет большую удельную прочность, меньшую плотность и стоимость (на 20..25 %) [4].

Достаточно важными элементами конструкций являются цилиндрические оболочки корпусов, двигателей и т.д., которые изготавливаются из листов различных титановых сплавов, в том числе и из сплава VT19. Листовые заготовки изгибают на специальных станах, а затем сваривают [3, 4]. В связи с этим изучение процессов деформационной обработки сплава VT19 для получения листовых

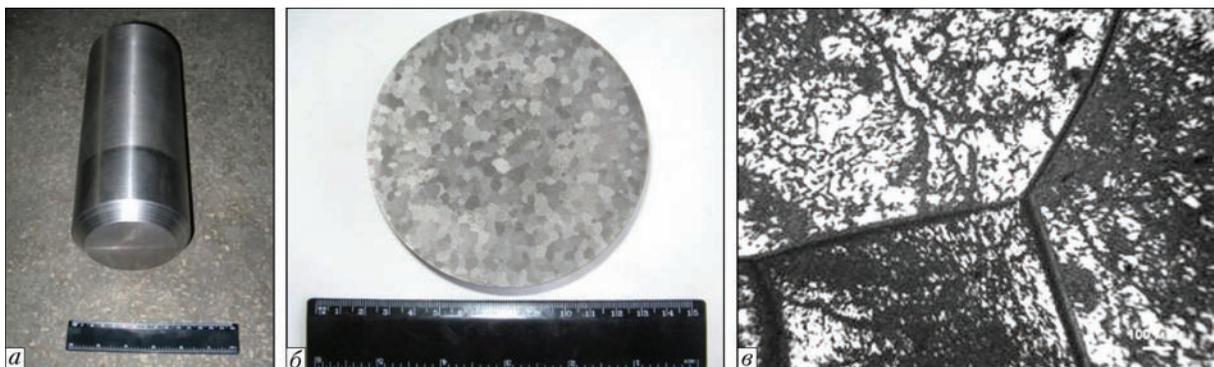


Рис. 1. Механически обработанный слиток-заготовка сплава VT19 (а), макроструктура (б) и микроструктура (в) литого металла ЭЛП сплава VT19

Т а б л и ц а 1. Химический состав слитка ЭЛП сплава ВТ19, мас. %

Сплав	Al	V	Mo	Cr	Zr	O	N	Ti
Слиток ЭЛП	3,4	3,5	5,3	4,2	0,9	0,08	0,005	Основа
Требования	2,5...3,5	3,0...4,0	5,0...6,0	4,0...5,0	0,5...1,5	0,15	0,015	->-

Т а б л и ц а 2. Технологический режим ТМО заготовок из сплава ВТ19

Операция	Время нагрева, мин	Температура нагрева, °С	Степень деформации, %
Нагрев под прокат	70	1150	0
Деформация заготовки (за один проход 2...3 мм)	30	1150	0...60
Разворот заготовки на 90°	20	1150	60
Докатка (деформация заготовки за один проход 1 мм)	15	750	90

полуфабрикатов, а затем и последующей их сварки является весьма важной задачей.

В качестве исходных заготовок использовали полученные способом электронно-лучевой плавки (ЭЛП) слитки диаметром 110 мм сплава ВТ19 (рис. 1) [5]. Химический состав полученных слитков приведен в табл. 1.

Литой металл слитка ЭЛП сплава ВТ19 состоит из равноосных полиэдрических зерен с коэффициентом формы зерна 1,5...3,0 и размерами 2...5 мм. Границы зерен в различных участках слитка утолщенные, декорированы фазовыми выделениями (рис. 1, в).

Механически обработанные слитки подвергали термической деформационной обработке (ТДО) на реверсивном прокатном ДУО-стане Skoda 355/500. Нагрев заготовок осуществляли в электропечи сопротивления без применения защитной атмосферы и защитных покрытий.

При производстве деформированных полуфабрикатов из псевдо β-сплавов хорошие результа-

ты получали при прокатке заготовок, нагретых до температур β-области и при этом заключительные операции ТДО необходимо было заканчивать при температуре несколько ниже точки  $T_{\text{мп}}$ . Это позволяет при последующей операции закалки из (α + β)-области получить материал с повышенными характеристиками прочности, пластичности и вязкости разрушения [6, 7].

Термомеханическую обработку (ТМО) заготовок из сплава ВТ19 осуществляли по технологическому режиму, представленному в табл. 2.

Температуру окончания проката контролировали визуально и на начальном этапе она составляла не менее 850 °С.

После проведения операции прокатки проводили рихтовку предварительно нагретого деформированного полуфабриката на гидравлическом прессе с целью устранения прогибов. Остывание полученных заготовок проходило на воздухе до температуры окружающей среды.

В результате проведенной ТМО слитков ЭЛП сплава ВТ19 получены листы размерами 300×350 мм, толщиной 6 мм (рис. 2). На поверхности листовых полуфабрикатов не обнаружено трещин и расслоений, что позволяет говорить о хорошей технологической пластичности материала и металлургическом качестве исходных слитков-заготовок.

Для снятия остаточных напряжений листовые деформированные полуфабрикаты отжигали при температуре 750 °С в течение 1 ч.

Исследования деформированного металла сплава ВТ19, полученного из слитка ЭЛП, показали, что после прокатки при температурах, со-

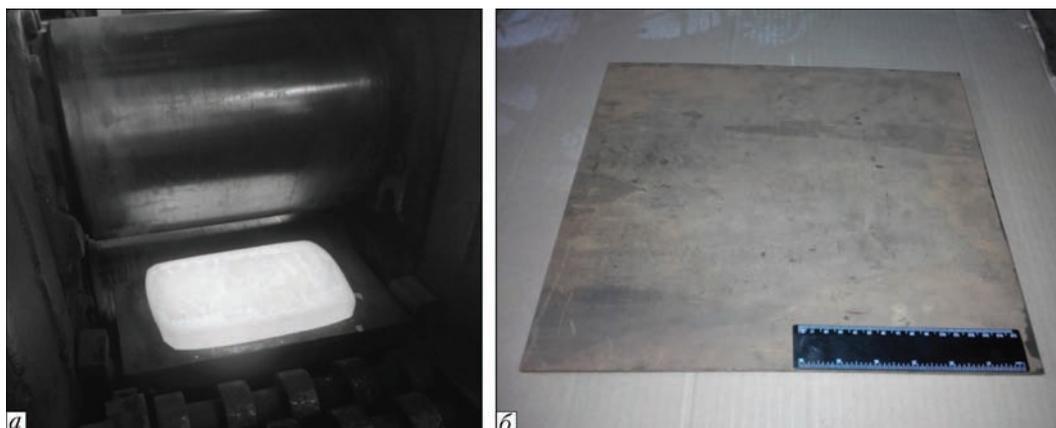


Рис. 2. Процесс проката (а) и полученные листы размерами 350×300×6 мм (б) сплава ВТ19

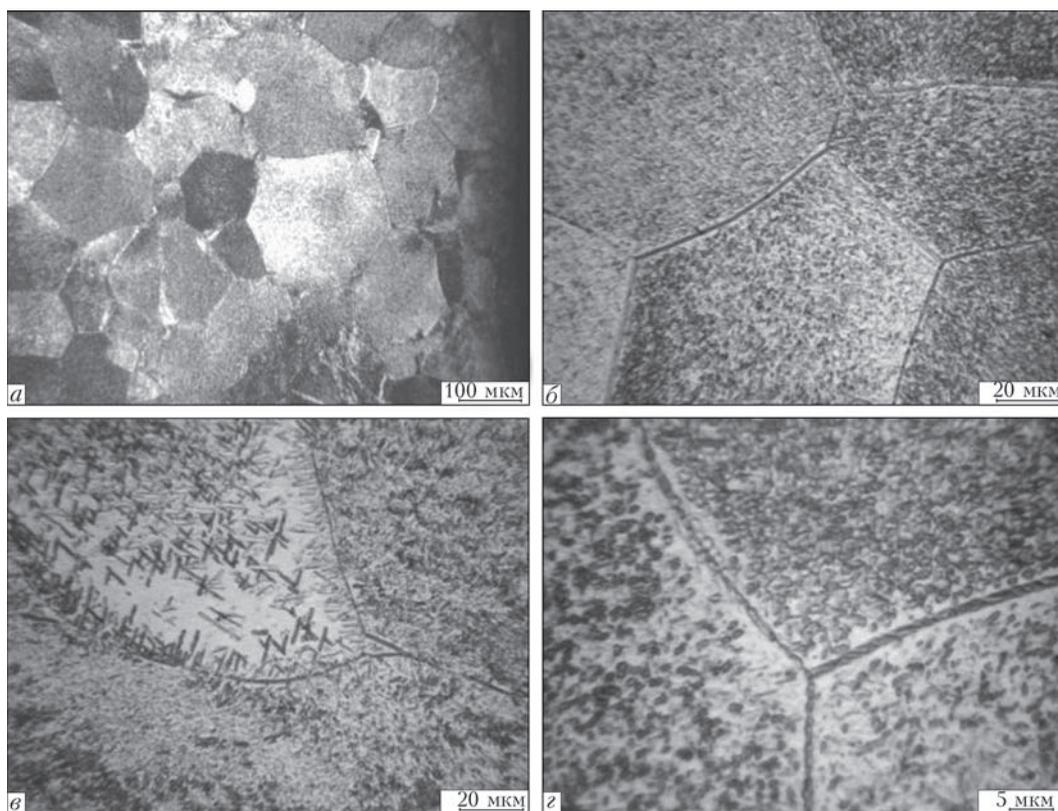


Рис. 3. Микроструктура приповерхностной зоны деформированного металла сплава ВТ19 ЭЛП: *a–z* — см. в тексте

ответствующих существованию  $\beta$ -области, структура состоит из равноосных полиэдрических первичных  $\beta$ -зерен размерами от 80 до 125 мкм. Установлено, что после проведенной термомеханической обработки образец имеет несколько неоднородную по толщине структуру. Так, приповерхностный слой металла толщиной 1,5...2,0 мм имеет полностью рекристаллизованную структуру. В равноосных полиэдрических зернах приповерхностной зоны наблюдаются равномерно распределенные по телу зерна дисперсные выделения  $\alpha$ -фазы (рис. 3, *в, z*). Размеры  $\alpha$ -частиц составляют 1...2 мкм и меньше. В некоторых зернах приповерхностной зоны деформированного металла встречаются участки с неравномерным распределением частиц  $\alpha$ -фазы в зерне (рис. 3, *в*) с размерами пластинок до 10 мкм.

Исследования микроструктуры глубинной зоны толщиной 2,0...2,5 мм показали, что в структуре встречаются полосы рекристаллизованных зерен, вытянутые в направлении проката (рис. 4, *a*), а также единичные рекристаллизованные зерна на фоне нерекристаллизованной структуры (рис. 4, *б*).

В глубинной зоне встречаются как дисперсные, так и достаточно крупные пластинчатые частицы  $\alpha$ -фазы (рис. 5, *a*). Кроме того, обнаружены обрывки границ деформированных зерен, вытянутые в направлении проката (рис. 5, *б*). В отдельных зернах как в приповерхностной, так и в глубинной зоне наблюдаются узоры из серий параллельных линий (рис. 5, *в, z*).

Проведенные исследования деформированного металла показывают, что в зерне преобладает дис-

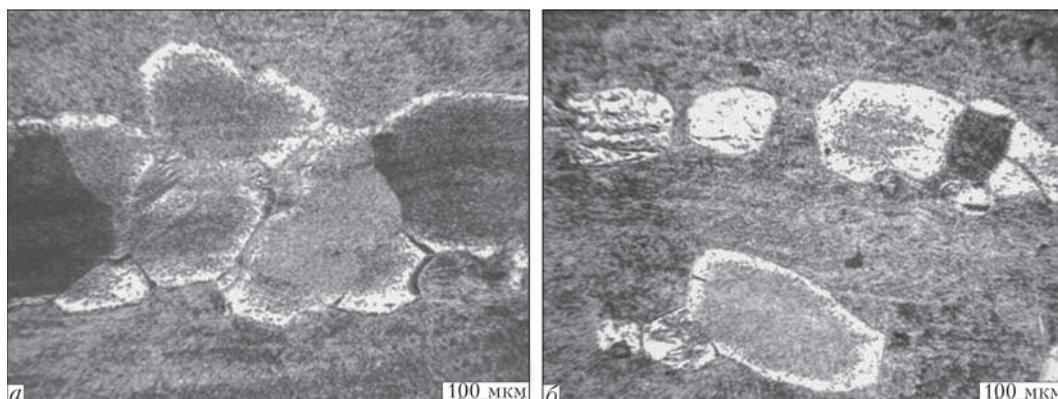


Рис. 4. Микроструктура глубинной зоны деформированного металла сплава ВТ19 ЭЛП: *a, б* — см. в тексте

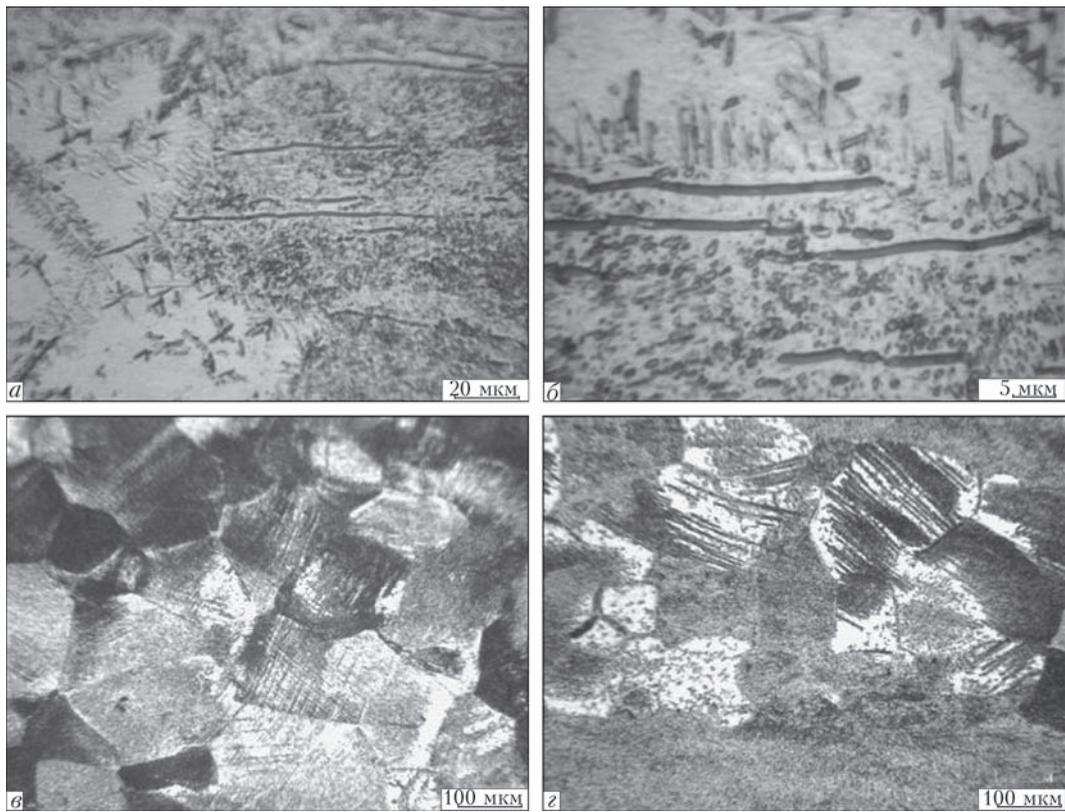


Рис. 5. Микроструктура деформированного металла сплава ВТ19 ЭЛП: а-г — см. в тексте

персная  $\alpha$ -фаза. Однако в некоторых участках образцов наблюдаются небольшие скопления более крупной пластинчатой  $\alpha$ -фазы: реже — в приповерхностной (рис. 6, а) — чаще в глубинной зоне (рис. 6, б). Существенных оторочек  $\alpha$ -зерен на границах не наблюдается, что говорит о правильности выбора режима ТМО.

Исследования приповерхностной зоны показали, что, благодаря оптимизации времени пребывания прокатываемых заготовок в печи при промежуточных нагревах, минимизирована толщина поверхностного окисленного и альфирированного слоев. Как видно из рис. 7, максимальная толщина поверхностного слоя составляет приблизительно 20 мкм. Окисный слой достаточно плотный, в нем не наблюдаются трещины и сколы.

Основными показателями механических свойств, которые характеризуют титановые сплавы, являются: предел прочности ( $\sigma_b$ , МПа), предел текучести ( $\sigma_T$ , МПа), относительное удлинение ( $\delta$ , %), относительное сужение ( $\psi$ , %) и ударная вязкость ( $KCV$ , Дж/см<sup>2</sup>) [8]. Механические свойства определяли при комнатной температуре на образцах, вырезанных из деформированного и отожженного металла. Некоторые механические свойства сплава ВТ19 после проведенных обработок приведены в табл. 3.

Несколько пониженные значения сопротивления разрыву и предела текучести, по-видимому, связаны с уменьшением размеров первичных  $\beta$ -зерен и существенным измельчением внутризеренной структуры, а также достаточно низким содер-

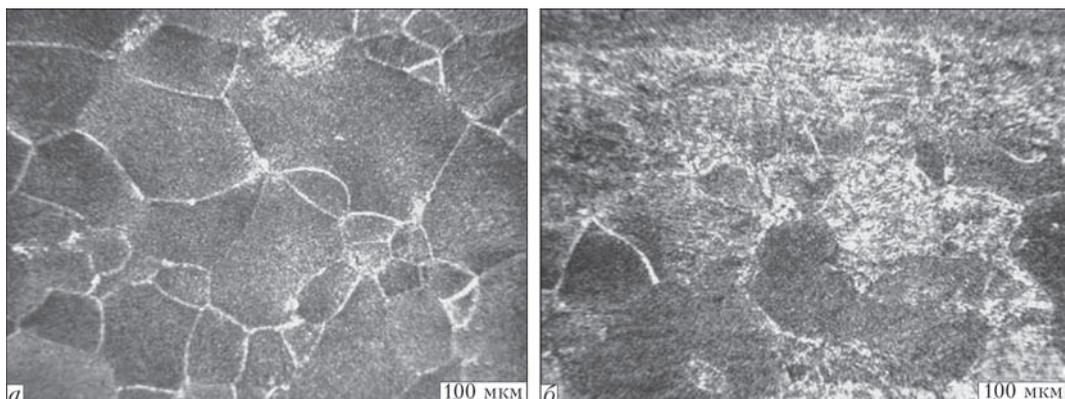


Рис. 6. Микроструктура деформированного металла сплава ВТ19 ЭЛП: а, б — см. в тексте

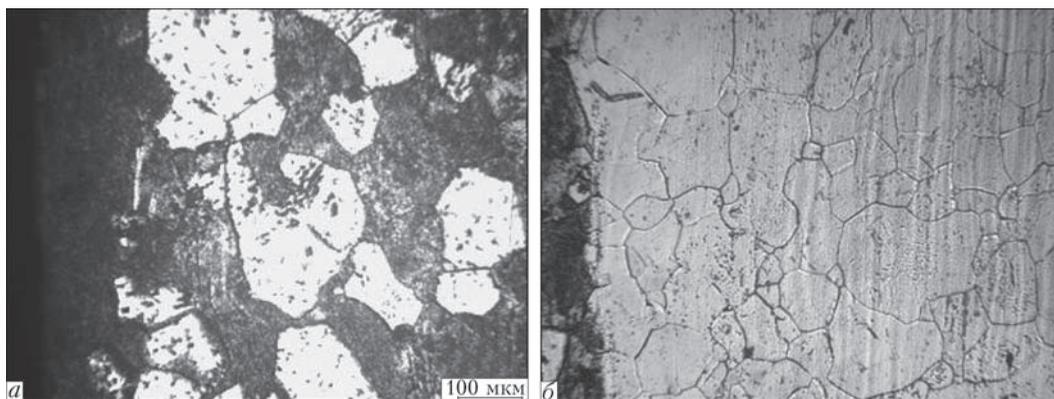


Рис. 7. Микршлифы поверхностной (а) и приповерхностной зон (б) деформированного металла сплава ВТ19 ЭЛП

Т а б л и ц а 3. Механические свойства деформированного металла сплава ВТ19 ЭЛП в состоянии после отжига

Сплав	Вид термообработки	$\sigma_v$ , МПа	$\sigma_r$ , МПа	$\delta_s$ , %	$\psi$ , %
ВТ19	Отжиг 750 °С, 1 ч	958	887	12	42
Требования [9]	Отжиг 750 °С	980...1029	–	11...14	55

жанием примесных газов в металле, полученном способом электронно-лучевой плавки.

Задачей данной работы было получение листов из слитков ЭЛП сплава ВТ19 для дальнейшего исследования новых процессов сварки, поэтому их последующую упрочняющую термообработку не проводили. Сплав ВТ19 упрочняется путем проведения операции закалки в воду и старения и после этого прочность материала может повышаться до 1550 МПа [7].

**Выводы**

1. Отработаны режимы горячей деформационной обработки псевдо  $\beta$ -титанового сплава ВТ19, полученного способом ЭЛП. Установлено, что на поверхности листовых полуфабрикатов нет трещин и расслоений, что говорит о хорошей технологической пластичности материала и металлургическом качестве исходных слитков-заготовок.

2. Установлено, что оптимизация по времени нахождения заготовок в печи позволила уменьшить окисленный поверхностный слой до 20 мкм. При этом в нем не наблюдаются трещины и сколы.

3. Определено, что структура псевдо  $\beta$ -титанового сплава ВТ19, полученного способом ЭЛП, после прокатки в основном состоит из равноосных полиэдрических первичных  $\beta$ -зерен размерами 80...125 мкм, а внутризеренная структура представлена дисперсной  $\alpha$ -фазой размерами 1...2 мкм и меньше.

4. Показано, что после ТМО и последующего отжига образцы сплава ВТ19 имеют значение предела прочности 958 МПа при относительном удлинении  $\delta_s = 12\%$ .

**Список литературы**

1. Глазунов С. Г., Моисеев В. Н. (1994) *Титановые сплавы. Конструкционные титановые сплавы*. Москва, Металлургия.
2. Хорев А. И. (2014) Фундаментальные и прикладные работы по конструкционным титановым сплавам и перспективные направления их развития. *Технология машиностроения*, **11**, 5–10.
3. Колачев Б. А., Елисеев Ю. С., Братухин А. Г. и др. (2001) *Титановые сплавы в сварных конструкциях и производстве авиадвигателей и авиационно-космической технике*. Москва, Издательство МАИ.
4. Хорев А. И. (2012) Сверхпрочный титановый сплав ВТ19. *Технология машиностроения*, **6**, 2–5.
5. Ахонин С. В., Северин А. Ю., Березос В. А. и др. (2016) Особенности выплавки слитков титанового сплава ВТ19 в электронно-лучевой установке с промежуточной емкостью. *Современная электрометаллургия*, **2**, 23–27.
6. Хорев А. И. (2012) Термическая, термомеханическая обработка и текстурное упрочнение свариваемых титановых сплавов. *Сварочное производство*, **10**, 11–20.
7. Ильин А. А., Колачев Б. А., Полькин И. С. (2009) *Титановые сплавы. Состав, структура, свойства*. Москва, ВИЛС–МАТИ.
8. *ГОСТ 1497–84: Металлы. Методы испытаний на растяжение*.
9. (1977) *Титановые сплавы. Легирование и термическая обработка титановых сплавов*. Москва, ВИАМ.

**References**

1. Glazunov, S.G., Moiseev, V.N. (1994) *Titanium alloys. Structural titanium alloys*. Moscow: Metallurgy [in Russian].
2. Khorev, A.I. (2014) Fundamental and applied works on structural titanium alloys and prospective trends of their development. *Tekhnologiya Mashinostroeniya*, **11**, 5–10 [in Russian].
3. Kolachev, B.A., Eliseev, Yu.S., Bratukhin, A.G. et al. (2001) *Titanium alloys in welded structures and production of aircraft engines and aerospace engineering*. Moscow: MAI [in Russian].
4. Khorev, A.I. (2012) Titanium superalloy VT19. *Tekhnologiya Mashinostroeniya*, **6**, 2–5 [in Russian].

5. Akhonin, S.V., Severin, A.Yu., Berezos, V.A. et al. (2016) Peculiarities of melting of titanium alloy VT19 ingots in electron beam cold hearth installation. *Sovremennaya Elektrometallurgiya*, **2**, 23–27 [in Russian].
6. Khorev, A.I. (2012) Thermal, thermomechanical treatment and texture hardening of welded titanium alloys. *Svarochn. Proizvodstvo*, **10**, 11–20 [in Russian].
7. Illiin, A.A., Kolachev, B.A., Polkin, I.S. (2009) *Titanium alloys. Composition, structure, properties*. Moscow: VILS-MATI [in Russian].
8. *GOST 1497–84: Metals. Tensile test methods* [in Russian].
9. (1977) *Titanium alloys. Alloying and heat treatment of titanium alloys*. Moscow: VIAM [in Russian].

**СТРУКТУРА ТА ВЛАСТИВОСТІ ТИТАНОВОГО СПЛАВУ VT19, ОТРИМАНОГО СПОСОБОМ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОЇ ПЛАВКИ, ПІСЛЯ ТЕРМОМЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ**  
**С. В. Ахонін<sup>1</sup>, А. Ю. Северин<sup>1</sup>, В. Ю. Белоус<sup>1</sup>, В. О. Березос<sup>1</sup>, О. Н. Пікулін<sup>1</sup>, О. Г. Єрохін<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Інститут електрозварювання ім. С. О. Патона НАН України.

03680, м. Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>2</sup>ДП «НПЦ «Титан» ІЕЗ ім. С. О. Патона НАН України.

03028, м. Київ, вул. Ракетна, 26. E-mail: titan.paton@gmail.com

Проведено роботи по отриманню деформованих листових напівфабрикатів із злитків ЕПП діаметром 110 мм високолегованого псевдо-β титанового сплаву VT19. Після термомеханічної обробки досліджена мікроструктура сплаву. Визначено, що структура титанового сплаву VT19, отриманого способом ЕПП, після прокатки складається з рівноосних поліедричних первинних β-зерен, а внутрізеренна структура представлена дисперсною α-фазою. Встановлено, що після проведеної термомеханічної обробки лист має неоднорідну по товщині структуру. Прокатані листи сплаву VT19 ЕПП після відпалу при температурі 750 °С показують значення межі міцності 958 МПа при відносному подовженні  $\delta_s = 12\%$ . Бібліогр. 9, табл. 3, іл. 7.

**Ключові слова:** електронно-променева плавка; сплав; термомеханічна обробка; структура; фаза; зерно; властивості

**STRUCTURE AND PROPERTIES OF TITANIUM ALLOY VT19, PRODUCED BY THE ELECTRON BEAM MELTING, AFTER THERMOMECHANICAL TREATMENT**

**S.V. Akhonin<sup>1</sup>, A.Yu. Severin<sup>1</sup>, V.Yu. Belous<sup>1</sup>, V.A. Berezos<sup>1</sup>, A.N. Pikulin<sup>1</sup>, A.G. Erokhin<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>E.O. Paton Electric Welding Institute, NASU.

11 Kazimir Malevich Str., 03680, Kiev, Ukraine. E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>2</sup>SE «SPC» of the E.O.Paton Electric Welding Institute of NASU».

26 Raketnaya str., 03028, Kiev, Ukraine. E-mail: titan.paton@gmail.com

Works were carried out for producing deformed sheet semi-products from 110 mm diameter ingots of high-alloy pseudo β-titanium alloy VT19 of electron beam melting. After the thermomechanical treatment the alloy microstructure was examined. It was determined that the structure of titanium alloy VT19, produced by the electron beam melting method, consists after rolling of equiaxial polyhedral primary β-grains, and the intergranular structure is presented by a dispersed α-phase. It was found that the sheet after thermomechanical treatment has a heterogeneous structure in thickness. The rolled sheets of alloy VT19 of electron beam melting show the value of 958 MPa tensile strength at elongation  $\delta_s = 12\%$  after annealing at 750 °C temperature. Ref. 9, Tables 3, Figures 7.

**Key words:** electron beam melting; alloy; thermomechanical treatment; structure; phase; grain; properties

Поступила 28.07.2017

Науково-практична конференція

«СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ ЗВАРЮВАЛЬНОГО ВИРОБНИЦТВА»

22–23 листопада 2017 р.

Міжнародний виставковий центр, Київ

Тематика конференції

- розвиток прогресивних зварювальних процесів;
- нові зварювальні матеріали та обладнання;
- проблеми і тенденції автоматизації зварювальних та споріднених процесів;
- впровадження прогресивних технологій при виготовленні та ремонті металоконструкцій;
- стандартизація та сертифікація в зварювальному виробництві;
- підготовка кадрів та організація конкурсів професійної майстерності;
- проблеми екології;
- розвиток міжнародного співробітництва.

Тел./факс: (38044) 200-82-77; E-mail: maksimov@paton.kiev.ua