

# СТРУКТУРА І МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ДЕФОРМОВАНИХ НАПІВФАБРИКАТІВ ЗІ СПЛАВУ ВТ8, ОТРИМАНОВОГО СПОСОБОМ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОЇ ПЛАВКИ

С.В. Ахонін<sup>1</sup>, В.О. Березос<sup>1</sup>, О.Г. Єрохін<sup>1</sup>, А.Ю. Северин<sup>1</sup>, Т.О. Мітіна<sup>1</sup>, В.А. Крижановський<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: titan.paton@gmail.com

<sup>2</sup>ТОВ «НВО Хвиля». 49094, м. Дніпро, вул. Набережна Перемоги, 44/1. E-mail: npovolna@ukr.net

Проведено комплексні роботи по дослідженню якості деформованих напівфабрикатів, отриманих зі зливка титанового сплаву ВТ8. За технологією електронно-променевого переплаву отримані зливки діаметром 400 мм, з яких виготовлялися напівфабрикати у вигляді гарячекованих прутків діаметром 200 мм та дисків діаметром 440×145 мм. Представлено результати досліджень структури і механічних властивостей одержаних напівфабрикатів. Показано, що метал отриманих зливок і деформованих напівфабрикатів відповідає вимогам стандартів. Бібліогр. 9, табл. 5, рис. 6.

*Ключові слова:* електронно-променева плавка, жароміцний титановий сплав, зливок, хімічний склад, структура, деформація, механічні властивості

**Вступ.** Сучасний розвиток наукомістких галузей промисловості, насамперед, авіаційної, аерокосмічної та енергетичної висуває підвищені вимоги до конструкційних матеріалів, що використовуються. Для цих умов важливими є такі характеристики, як висока питома міцність, термічна і корозійна стійкість, технологічність при обробці та стійкість до тривалого навантаження при підвищених температурах. Серед різноманіття легких конструкційних сплавів особливе місце посідають титанові сплави, що успішно поєднують перелічені вище якості [1].

**Актуальність і мета проведених досліджень.** Сплав ВТ8 відноситься до групи двофазних ( $\alpha+\beta$ ) титанових сплавів мартенситного типу [2, 3] і є композицією титану з легуванням алюмінієм і молібденом. Сплав виготовляється у вигляді поковок, штамповок, прутків і плит та використовується для відповідальних конструкцій, які працюють при підвищених температурах і навантаженнях. У відпаленому стані ВТ8 може тривало (понад 6000 год) експлуатуватися при температурах до 500 °С. У термічно зміцненому стані (гартування з наступним старінням) сплав витримує роботу при температурах до 450 °С, а за короткочасного впливу до 100 год — при температурі 500 °С [3]. Він характеризується гарною зварюваністю, стійкістю до корозії та високими механічними властивостями при температурах до 450 °С. Завдяки збалансованому фазовому складу і можливості отримувати стабільну структуру при різних режимах деформа-

ції та термічної обробки сплав ВТ8 знайшов широке застосування в авіабудуванні, енергетичному машинобудуванні та виробництві трубопровідної арматури [4].

Ключовим фактором, що визначає якісні характеристики металу, є спосіб його виплавки. Висока хімічна активність титану при підвищених температурах унеможливорює його виробництво у звичайних умовах навколишнього середовища, де титан насичується газами (O, N, H), утворює хімічні сполуки і набуває крихкості. Тому промислове виробництво титанових сплавів здійснюється з використанням способів спеціальної електрометалургії: вакуумно-дугової плавки (ВДП), індукційної плавки у вакуумі (ІПВ), плазмової та електронно-променевої плавки (ЕПП) [5].

Найбільш поширеною практично залишається ВДП, яка дозволяє отримувати зливки великих розмірів задовільної якості. Однак ВДП має ряд недоліків: наявність зон ліквідації, нерівномірний розподіл легуючих елементів, пористість у центральних областях зливка. Всі ці фактори обумовлюють необхідність потрійного переплаву, що прописані в авіаційних стандартах. Ці обмеження є особливо критичними при виробництві відповідальних виробів, де мікродфекти можуть суттєво вплинути на експлуатаційні характеристики [6].

Електронно-променева плавка, навпаки, забезпечує більш високий рівень чистоти та структурної однорідності металу. При цьому способом використовується електронний пучок високої

С.В. Ахонін — <https://orcid.org/0000-0002-7746-2946>, В.О. Березос — <https://orcid.org/0000-0002-5026-7366>,

О.Г. Єрохін — <https://orcid.org/0000-0003-2105-5783>, А.Ю. Северин — <https://orcid.org/0000-0003-4768-2363>,

Т.О. Мітіна — <https://orcid.org/0009-0005-3254-826X>, В.А. Крижановський — <https://orcid.org/0000-0002-0917-8687>

щільності енергії, сфокусований на поверхні металу, що знаходиться в умовах вакууму. Плавлення відбувається без контакту з вогнетривкими матеріалами, у результаті виключається забруднення розплаву. Завдяки можливості застосовувати проміжну ємність стає змога видалення щільних неметалевих включень за рахунок седиментації і повнішої гомогенізації розплаву [7].

Зливки, отримані способом ЕПП з проміжною ємністю, відрізняються спрямованою макроструктурою та мінімальним вмістом залишкових домішок. Це значно підвищує відтворюваність властивостей готових виробів, збільшує ресурс деталей та знижує ймовірність їх раптових відмов. Дослідження показують, що титанові сплави, отримані за цією технологією, демонструють поліпшену міцність втоми, особливо в умовах циклічного навантаження при підвищених температурах [8].

Таким чином, вибір способу плавки надає вирішальний вплив на якість кінцевого напівфабрикату. Електронно-променева плавка з проміжною ємністю останніми роками все частіше розглядається як найбільш перспективна технологія для отримання титанових сплавів, призначених для відповідальних сфер застосування.

Враховуючи потребу у підвищенні надійності конструкцій та конкурентоспроможності вітчизняних матеріалів на міжнародному ринку, дослідження особливостей технології ЕПП та властивостей сплаву ВТ8, отриманого цим способом, є актуальним та значущим.

Таким чином, мета даної роботи полягала в дослідженні структури і властивостей зливок зі сплаву ВТ8, отриманих способом ЕПП, і деформованих напівфабрикатів, виготовлених із них, для підтвердження відповідності якості матеріалу вимогам стандартів.

**Обладнання та методики проведення досліджень.** З метою вдосконалення технології виробництва зливок жароміцних сплавів титану в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України проведені роботи з виплавлення партії зливок сплаву ВТ8 діаметром 400 мм. Зливки отримували за технологією ЕПП з проміжною ємністю і порційною подачею рідкого металу у водоохолоджувальний кристалізатор.



Рис. 1. Партія зливок діаметром 400 мм титанового сплаву ВТ8, отриманих способом ЕПП

У якості шихтових матеріалів було використано титанову губку марки ТГ-120 та легуючі елементи у вигляді алюмінієвої стружки, молібденового штабіку і металічного кремнію.

З використанням раніше визначених і відпрацьованих режимів електронно-променевого нагріву зливка в кристалізаторі на електронно-променевій установці УЕ-5812 [9] проведені дослідні плавки з отримання зливок з титанового сплаву ВТ8. В ході експериментальних плавок, відповідно до оптимальних режимів плавки, підтримували постійними наступні технологічні параметри: швидкість плавки; час між заливкою порцій; висоту порцій, що одночасно заливаються в кристалізатор (див. технічні характеристики).

**Технічні характеристики режимів електронно-променевої плавки зливка діаметром 400 мм сплаву ВТ8**

Швидкість плавки, кг/год.....	270
Час між заливкою порцій, с.....	60
Висота порцій, що одночасно заливаються в кристалізатор, мм.....	8
Потужність першої гармати (центрального нагрів), кВт... ..	50
Потужність другої гармати (периферійний нагрів), кВт... ..	70

В результаті дослідних плавок виготовлена партія зливок діаметром 400 мм сплаву ВТ8 (рис. 1).

Було визначено розподіл легуючих елементів і домішок у виплавлених зливках (табл. 1). Контроль хімічного складу виплавлених зливок проводився оптичним емісійним спектрометром «SPECTROPORT». Вміст газів визначали на га-

**Таблиця 1.** Розподіл легуючих елементів і домішок по довжині зливка діаметром 400 мм із титанового сплаву ВТ8, отриманого способом ЕПП, мас. %

Місце відбору проб	Al	Mo	Fe	Si	C	O	N	H
Верх	6,3	3,0	0,07	0,21	0,016	0,10	0,02	0,002
Середина	6,4	3,2	0,08	0,22	—»—	—»—	—»—	—»—
Низ	6,1	—»—	—»—	0,21	0,015	0,11	—»—	—»—
ГОСТ 19807–91	5,8...7,0	2,8...3,8	<0,30	0,2...0,4	<0,10	<0,15	<0,05	<0,015

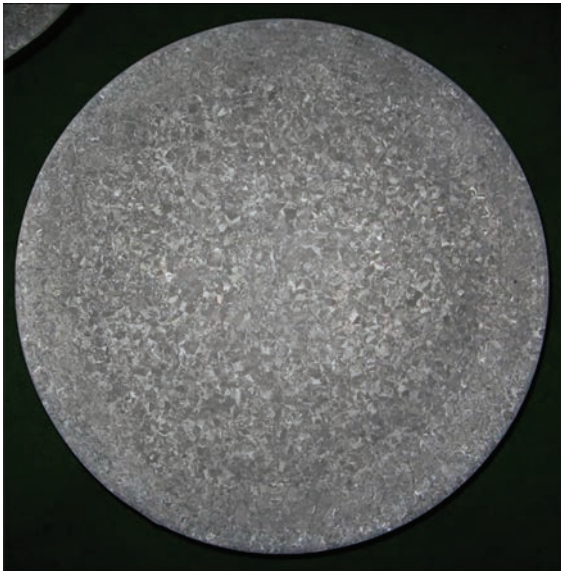


Рис. 2. Макроструктура зливка діаметром 400 мм титанового сплаву BT8 у поперечному перерізі

зових аналізаторах ТС-436, RH-2 фірми «LECO». Встановлено, що хімічний склад зливка відповідав марочному складу сплаву BT8.

Визначення неоднорідностей в металі проводили методом неруйнівного ультразвукового контролю з використанням дефектоскопа УД4-76. Ультразвуковий контроль зливоків титанового сплаву BT8 показав, що дефекти у вигляді пор, раковин, неоднорідностей і неметалевих включень у металі зливка відсутні.

Макроструктуру зливка досліджували на темплеті, виготовленому в поперечному перерізі зливка (рис. 2).

Візуальний огляд показав, що макроструктура зливка не мала тріщин, пухкості, металевих і неметалевих включень та інших дефектів. Макроструктура середньої частини зливка діаметром 400 мм на поперечному темплеті щільна, однорідна, з відсутністю зон, що різняться. Істотної різниці у структурі центральної зони зливка та периферійної не спостерігалось. Величина макро-



Рис. 4. Ковані диски діаметром 440×145 мм титанового сплаву BT8

зерна, що визначалася за стандартною 10-бальною шкалою макроструктур, відповідала 8, 9 балам.

Зливки сплаву BT8, виплавлені способами ЕПП, підлягали куванню. Прутки діаметром 200 мм кували безпосередньо зі зливка діаметром 400 мм, отриманого способом ЕПП. Кування зливоків сплаву BT8 здійснювали за промисловою технологією (табл. 2) і починали при температурі 1100 °С в β-області та закінчували при 900 °С в α+β-області. В результаті деформаційної обробки виготовлено прутки діаметром 200 мм.

Прутки в обточеному стані при візуальному огляді не мали на поверхні тріщин, розшарування, включень, ділянок ліквідаційного характеру або інших дефектів (рис. 3).

Також проводили роботи по виготовленню кованих дисків діаметром 440 мм із дослідних зливоків. При цьому зливок діаметром 400 мм проковували на проміжний розмір, далі проводили його осадження і кування на заготовку у формі диска діаметром 440×145 мм (рис. 4).

З метою дослідження структури кованих заготовок із прутка діаметром 200 мм титанового сплаву BT8 виготовлено поперечний темплет товщиною 10 мм. Макроструктура темплету перевірена в двох контрольних зонах (рис. 5).

Візуальний огляд травлених макротемплетів показав, що дефекти металургійного та деформаці-



Рис. 3. Кований пруток діаметром 200 мм із титанового сплаву BT8

Таблиця 2. Температурний інтервал ковки жароміцного титанового сплаву BT8

Сплав	Температура перетворення, °С	Температура ковки зливка, початку (не вище)/кінця (не нижче), °С		Температура ковки заготовки, початку (не вище)/кінця (не нижче), °С	
BT8	990	1100	900	1020	850

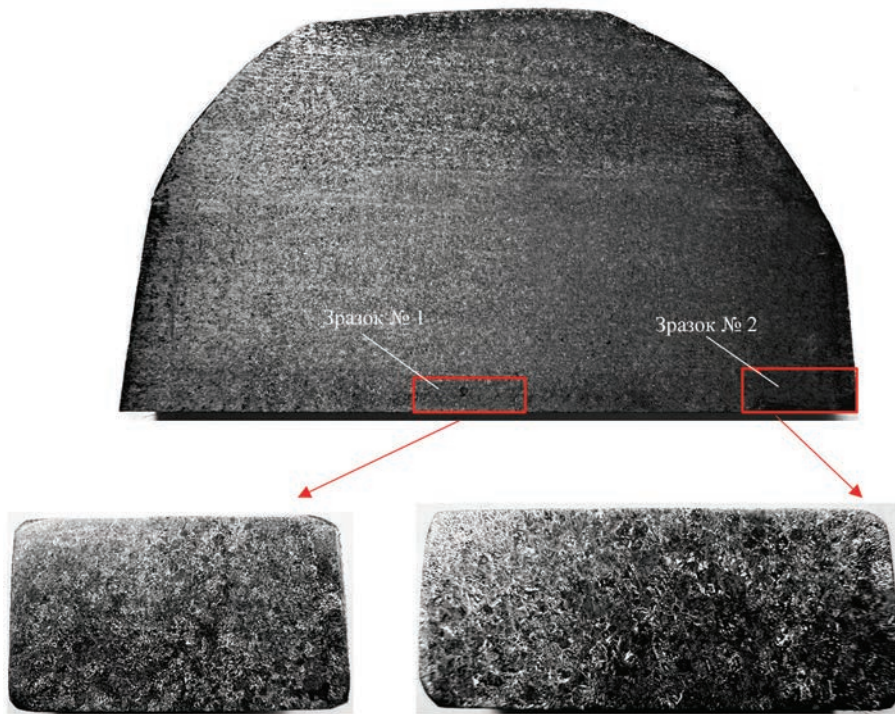


Рис. 5. Макроструктура кованого прутка діаметром 200 мм титанового сплаву VT8

йного походження в макроструктурі досліджених темплетів відсутні. Такий стан макроструктури узгоджується з вимогами авіаційного стандарту, згідно якому не допускаються тріщини, розшарування, пористості, плівки (плени), металеві і неметалеві включення, що виявляються неозброєним оком.

Макроструктура кованого прутка характеризувалася блискучим фоном травління та макрозернами з чіткими межами (див. рис. 5). Розмір макрозерен по стандартній 10-бальній шкалі макроструктур титанових сплавів можна віднести до 5, 6 балів.

Металографічне дослідження структури проводили за допомогою оптичного мікроскопа «NEOFOT-30». Мікроаналіз виконано на шліфах, виготовлених в поперечному перетині темплета, в різних зонах по його товщині.

Мікроструктури в різних зонах мають аналогічний характер: мікроструктура складається з

$\beta$ -перетворених зерен, що мають пластинчасту внутрішньозеренну будову  $\alpha$ - і  $\beta$ -фаз, по границям яких розташована оторочка із  $\alpha$ -фази. Форма  $\beta$ -перетворених зерен поліедрична, розміри яких знаходяться в діапазоні 250...600 мкм, товщина пластинок  $\alpha$ - $\beta$ -фаз складала 1...4 мкм, довжина — 45...150 мкм. Згідно шкали допустимих мікроструктур деформованих напівфабрикатів із  $\alpha$ + $\beta$ -титанових сплавів окремі масиви  $\alpha$ -фази є допустимими і зазвичай представляють собою  $\alpha$ -фазу, що потрапила в площину шліфа.

В окремих ділянках мікроструктуру можна віднести до типу кошикового плетіння без  $\alpha$ -оторочки по межах зерен, де пластинки  $\alpha$ / $\beta$ -фаз зібрані в пачки, що взаємно перетинаються.

Мікроструктури в різних зонах дослідженого темплета прутка діаметром 200 мм представлені на рис. 6.

Таблиця 3. Механічні властивості прутків діаметром 200 мм сплаву VT8 після кування

Номер проби	Межа міцності, кгс/мм <sup>2</sup>	Відносне видовження, $\epsilon$ , %	Відносне звуження, $\psi$ , %	Ударна в'язкість, кгс/мм <sup>2</sup>	Діаметр відбитку, мм
1	113,0	11,6	37,0	6,0	3,45
2	→—	13,6	36,0	6,3	→—
ОСТ 1 90107-73	95...120	$\geq 8,0$	$\geq 21,0$	$\geq 3,0$	3,2...3,7

Таблиця 4. Механічні властивості диска діаметром 440 мм сплаву VT8 після кування

Номер проби	Межа міцності, кгс/мм <sup>2</sup>	Відносне видовження, $\epsilon$ , %	Відносне звуження, $\psi$ , %	Ударна в'язкість, кгс/мм <sup>2</sup>	Діаметр відбитку, мм	Твердість HB
1	114,5	12,0	27,5	5,7	3,40	321
2	111,0	10,0	26,0	6,0	→—	331
ОСТ 90000-70	100...120	$\geq 9,0$	$\geq 25,0$	$\geq 3,0$	3,2...3,7	—

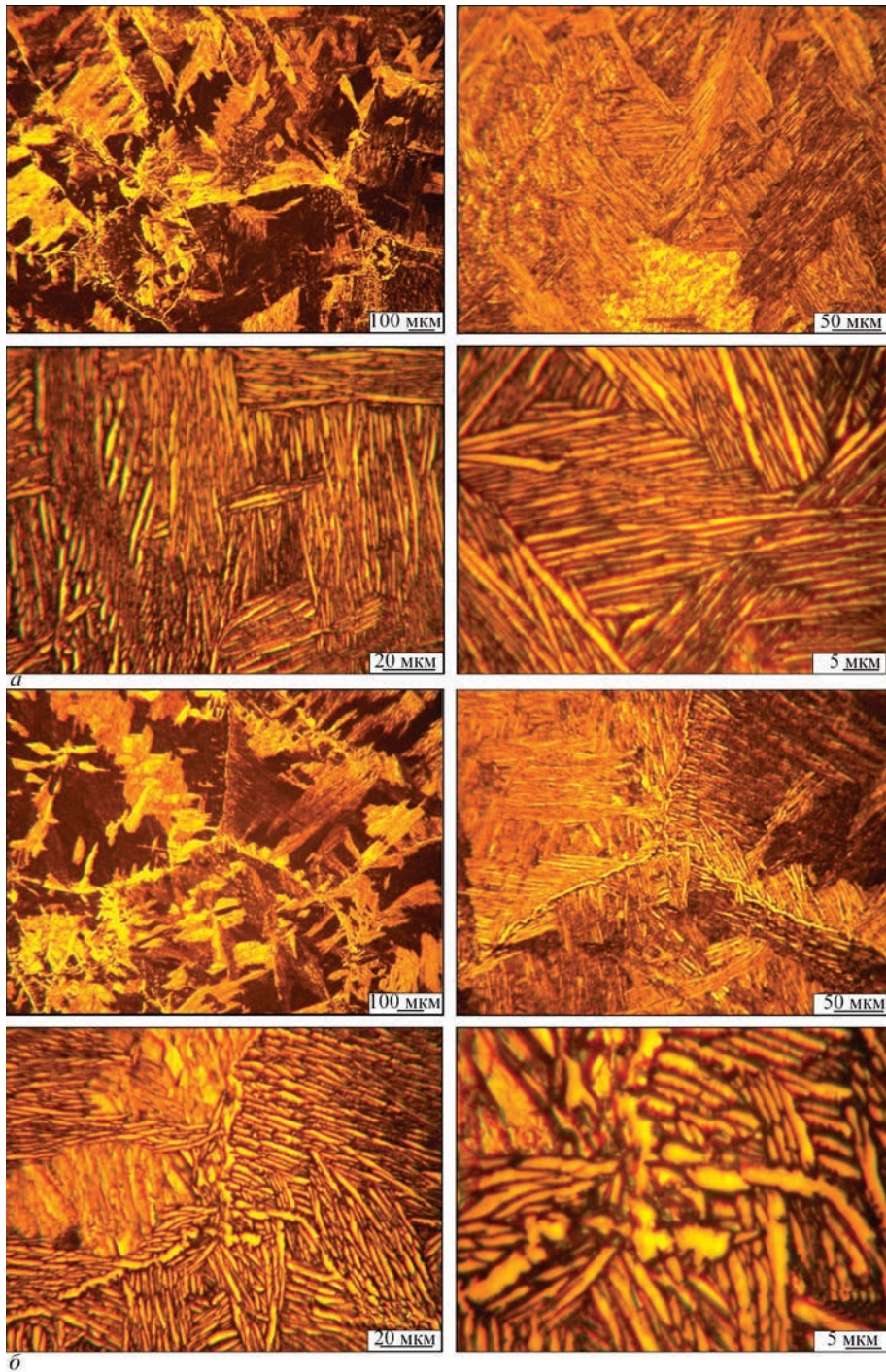


Рис. 6. Характерні мікроструктури зі сплаву VT8 в зоні № 1 (а) і зоні № 2 (б)

Таблиця 5. Результати випробувань на тривалу жароміцність сплаву VT8

Температура випробувань, °C	Межа міцності, кгс/мм <sup>2</sup>	Довготривала міцність	
		Навантаження, кгс/мм <sup>2</sup>	Тривалість випробувань, год
500	63	54	52,5
→—	60	52	50,0

Механічні випробування проводили на стандартних зразках, вирізаних із темплетів прутків діаметром 200 мм (табл. 3). Зразки для випробувань вирізали ближче до центральної зони за перетином прутка (на відстані 1/4 від центру),

які підлягали термообробці за стандартним режимом.

Крім того, проведені дослідження механічних властивостей диска діаметром 440×145 мм сплаву VT8 після кування (табл. 4).

Для контролю механічних властивостей при підвищеній температурі від партії відбирали прутки, із яких вирізали зразки для визначення тимчасового опору і тривалої міцності (табл. 5).

### Висновки

1. Комплекс проведених досліджень показав, що хімічний склад зливків сплаву VT8, отриманих способом ЕПП, і механічні властивості напівфабрикатів у вигляді кованих прутків і дисків відповідають вимогам стандартів (ОСТ 1 90107–73, ОСТ 90000–70).

2. Електронно-променева плавка є ефективним способом одержання якісних зливків жароміцних сплавів титану із первинної шихти.

### Список літератури/References

1. Froes, F.H. (2015) *Titanium: Physical metallurgy, processing, and applications*. ASM International.
2. Arzamasov, B.N., Brostrom, V.A., Buche, N.A. et al. (1990) *Structural materials: Refer. Book*. Ed. by B.N. Arzamasov. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
3. Maslenkov, S.V., Maslenkova, E.A. (1991) *Steels and alloys for high temperatures: Refer. Book*. Book 2. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
4. Lutjering, G., Williams, J. C. (2007) *Titanium*. Springer.
5. Leyens, C., Peters, M. (2003) *Titanium and titanium alloys: Fundamentals and applications*. Wiley-VCH.
6. Boyer, R., Welsch, G., Collings, E.W. (1994) *Materials properties handbook: Titanium alloys*. ASM International.
7. Gerdemann, S.J., White, J.C. (2002) Electron beam melting of titanium alloys. *J. of Materials Engineering and Performance*, 11(3), 303–309.
8. Semiatin, S.L., Bieler, T.R. (2001) The effect of  $\alpha/\beta$  processing on the microstructure and texture of titanium alloys. *Metallurgical and Materials Transact. A*, 32(5), 1045–1057.
9. Trigub N.P., Zhuk G.V., Kornejchuk V.D. et al. (2007) Commercial electron beam installation UE-5812. *Advances in Electrometallurgy*, 1, 9–11.

## STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF DEFORMED SEMIFINISHED PRODUCTS MADE FROM VT8 ALLOY PRODUCED BY ELECTRON BEAM MELTING

S.V. Akhonin<sup>1</sup>, V.O. Berezos<sup>1</sup>, O.G. Yerokhin<sup>1</sup>, A.Yu. Severin<sup>1</sup>, T.O. Mitina<sup>1</sup>, V.A. Kryzhanovskiy<sup>2</sup>

<sup>1</sup>E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: titan.paton@gmail.com

<sup>2</sup>«NVO Khvyliya» Company. 44/1 Naberezhnaja Peremohi, 49094, Dnipro, Ukraine. E-mail: npovolna@ukr.net

A comprehensive study was conducted on the quality of deformed semifinished products produced from VT8 titanium alloy ingot. Using electron beam remelting technology, ingots with a diameter of 400 mm were produced and subsequently used to manufacture semifinished products in the form of hot-rolled bars ( $\varnothing 200$  mm) and discs ( $\varnothing 440 \times 145$  mm). This paper presents the results of investigations into the structure and mechanical properties of the obtained semifinished products. It has been shown that the metal in both the produced ingots and the deformed semifinished products meets the requirements of the applicable standards. 9 Ref., 5 Tabl., 6 Fig.

*Keywords: electron beam melting, heat-resistant titanium alloy, ingot, chemical composition, structure, deformation, mechanical properties*

Отримано 10.07.2025

Отримано у переглянутому вигляді 28.07.2025

Прийнято 07.10.2025

