

ДОСЛІДЖЕННЯ ЯКОСТІ ДЕФОРМОВАНИХ НАПІВФАБРИКАТІВ ТИТАНОВОГО СПЛАВУ ВТ9, ОТРИМАНОГО СПОСОБОМ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОЇ ПЛАВКИ

С.В. Ахонін¹, А.Ю. Северин¹, В.О. Березос¹, О.М. Пікулін¹, В.А. Крижановський², О.Г. Єрохін³

¹ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України.

03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²ТОВ «НВО Хвиля».

49094, м. Дніпро, Набережна Перемоги, 44/1. E-mail: nprovolna@ukr.net

³ДП «НВЦ «Титан» ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України».

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

Проведено комплексні роботи по дослідженню якості деформованих напівфабрикатів, отриманих зі зливка титанового сплаву ВТ9. За технологією електронно-променевого переплаву отримані зливки діаметром 600 мм і довжиною 1,5 м, з яких виготовляли напівфабрикати у вигляді гарячепресованих прутків діаметром 315 мм. Представлено результати досліджень структури і механічних властивостей напівфабрикатів у вигляді гарячепресованих прутків. Показано, що метал отриманих зливок і деформованих напівфабрикатів після відповідної термічної обробки відповідає вимогам стандартів. Бібліогр. 10, табл. 4, рис. 3.

Ключові слова: електронно-променева плавка; високоміцний титановий сплав; зливки; хімічний склад; структура; деформація; механічні властивості

Жароміцний титановий сплав ВТ9 системи легування Ti–Al–Mo–Zr–Si було розроблено в середині минулого століття і він знайшов широке використання при серійному виробництві деталей газотурбінних двигунів (ГТД), які тривалий час працюють при температурі до 450 °С [1]. Сплав ВТ9 є двофазним ($\alpha+\beta$)-сплавом. Високий вміст алюмінію і легування кремнієм забезпечують йому більш високі жароміцні властивості в порівнянні з найбільш розповсюдженим титановим сплавом ВТ6. Титановий сплав ВТ9 є сплавом, що деформується, і відноситься до матеріалів з високою жароміцністю та стійкістю до корозії. Сплав ВТ9 зміцнюють за допомогою термічної обробки — гартування і старіння. Оптимальне поєднання механічних властивостей забезпечує подвійний відпал. З нього виготовляють диски, лопатки та інші деталі компресорів ГТД [2, 3].

До експлуатаційних характеристик деталей відповідального призначення пред'являються високі вимоги, які постійно підвищуються і стають більш жорсткими. Це значною мірою відноситься і до якості вихідних матеріалів [4]. Тому з метою широкого застосування титанових сплавів в різних конструкціях необхідно не тільки створювати нові матеріали на основі титану з більш високими експлуатаційними характеристиками, але і в подальшому вдосконалювати виробництво

напівфабрикатів з цих сплавів. Слід зазначити, що будь-які недосконалості хімічної та структурної однорідності в титанових сплавах призводять до зниження міцності і довговічності виробів. Отримання титанових сплавів пов'язано з труднощами, зумовленими високою чутливістю титану до домішок втілення, особливо до кисню, азоту, водню, вуглецю, а також взаємодією з багатьма хімічними елементами, в результаті чого утворюються тверді розчини або хімічні сполуки. Крім того, одним з основних структурних недосконалостей титанових сплавів є наявність тугоплавких неметалевих включень. Висока активність титану призводить до протікання фізико-хімічних процесів взаємодії з газами навіть в твердому стані. Тому неметалеві включення, зокрема нітриди і оксиди, можуть утворюватися як в процесі виплавки зливок, так і на різних етапах технологічного переділу в готову продукцію. Неметалеві включення в готовий виріб можуть бути внесені з шихтових матеріалів в процесі плавки, а також сформовані при термометалургійній обробці металу. Титан активно взаємодіє не тільки з газами, але і з іншими елементами, в тому числі з легуючими компонентами сплавів, тому локальне збагачення окремих об'ємів зливок легуючими елементами може призводити до утворення інтерметалідних включень, наприклад, Ti_3Al , $TiAl$, $TiCr_2$ та інших [5].

С.В. Ахонін — <https://orcid.org/0000-0002-7746-2946>, А.Ю. Северин — <https://orcid.org/0000-0003-4768-2363>,

В.О. Березос — <https://orcid.org/0000-0002-5026-7366>, О.М. Пікулін — <https://orcid.org/0000-0001-6327-3448>,

В.А. Крижановський — <https://orcid.org/0000-0002-0917-8687>, О.Г. Єрохін — <https://orcid.org/0000-0003-2105-5783>

© С.В. Ахонін, А.Ю. Северин, В.О. Березос, О.М. Пікулін, В.А. Крижановський, О.Г. Єрохін, 2021

В даний час не всі способи виробництва зливоків титанових сплавів дозволяють отримати якісний метал, а при порушенні технологічного процесу виробництва сплавів титану в зливках виявляються дефекти, які знижують якість металу. Електронно-променева плавка (ЕПП) є найбільш ефективним способом вакуумної металургії для отримання сплавів, в тому числі тугоплавких і хімічно активних, з наднизьким вмістом газів, легких домішок і неметалевих включень. При ЕПП можливо в широких межах регулювання швидкості плавки, завдяки незалежному джерелу нагріву, що, в свою чергу, дозволяє регулювати тривалість перебування металу в рідкому стані. ЕПП є технологією, що дозволяє практично повністю забезпечити видалення тугоплавких включень високої і низької щільності. Таким чином, ЕПП дозволяє підвищити якість зливоків з титанових сплавів [6].

Більшість титанових сплавів містять в складі високу кількість легуючих елементів, що дещо ускладнює їх виробництво способом електронно-променевої плавки. При виплавці зливоків високоміцних титанових сплавів способом ЕПП виникає проблема забезпечення заданого хімічного складу зливка, так як плавка в вакуумі сприяє виборчому випаровуванню легуючих елементів з високою пружністю пари [7]. В даному випадку до таких елементів відноситься алюміній. А концентрація в зливку елементів з пружністю пари нижче пружності пари титану, в даному випадку Mo, Zr і Si, може навіть кілька підвищуватися. На основі раніше проведених в ІЕЗ ім. С.О. Патона НАН України фундаментальних досліджень процесів випаровування компонентів сплавів з розплаву у вакуумі [6] проводилися розрахунки прогнозованого хімічного складу зливоків, за результатами яких здійснювалося коригування складових шихтової заготовки. Легуючий компонент з високою пружністю пари, а саме алюміній, шихтувався з урахуванням компенсації втрат на випаровування. Шихтову заготовку для виплавки зливоків формували в невитратний короб. Для проведення плавки використовувалася електронно-променева установка УЕ5810 [6].

Були проведені роботи по виплавці зливка з титанового сплаву ВТ9 і отримано зливко круглого перетину діаметром 600 мм та довжиною 1500 мм



Рис. 1. Зливко сплаву ВТ9, отриманий способом ЕПП (рис. 1). Зливки отримували за технологією ЕПП з проміжною ємністю і порційною подачею рідкого металу в водоохолоджуваній кристалізатор.

Бокова поверхня виплавлених зливоків після охолодження в вакуумі до температури нижче 300 °С чиста, підвищена концентрація домішкових елементів на поверхні у вигляді окисленого або альфованого шару відсутня. Глибина поверхневих дефектів типу «гофр» становила 2...3 мм, дефекти у вигляді розривів, тріщин або несплавлень відсутні.

Для оцінки якості металу отриманих зливоків проводили дослідження хімічного складу зразків, відібраних по довжині зливка з верхньої, середньої та нижньої частин. Результати аналізу хімічного складу металу отриманих зливоків показали, що розподіл легуючих елементів по довжині зливоків рівномірний, а їх вміст відповідає марочному складу (табл. 1).

Для дослідження наявності або відсутності в титанових зливках внутрішніх дефектів у вигляді неметалевих включень, а також пор використувався метод ультразвукової дефектоскопії. Дослідження проводили з використанням дефектоскопа ультразвукового УД4-76 ехоімпульсним способом при контактному варіанті контролю. При дослідженні зливоків спостерігалися множинні відображення малої амплітуди, що типово для литого металу і є результатом відображення сигналу від границь зерен (дендритів). В зливку не було виявлено ні усадкових раковин, ні пористості, а також одиничних відображень, які можна було б інтерпретувати як великі неметалеві включення.

З метою визначення впливу технології електронно-променевої плавки на якість напівфабри-

Таблиця 1. Розподіл легуючих елементів по довжині зливка титанового сплаву ВТ9, мас. %

Марка сплаву	Частина зливка	Al	Mo	Fe	Zr	Si	O	N
ВТ9	Верхня	6,06	3,63	0,21	1,69	0,32	0,11	0,012
	Середня	6,13	3,68	0,14	1,64	→→		
	Нижня	6,64	3,21	0,22	1,67	0,31		
ОСТ1 90013–81 для сплаву ВТ-9		5,8...7,0	2,8...3,8	≤0,25	1,0...2,0	0,20...0,35	<0,15	<0,05

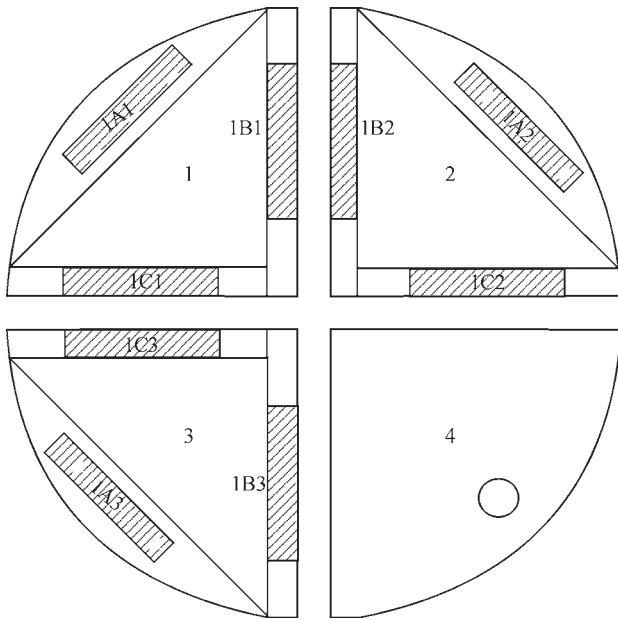


Рис. 2. Схема різання темплету на зразки для подальших механічних випробувань

катів з жароміцних титанових сплавів було проведено роботи по виготовленню гарячепресованих прутків діаметром 300 мм з раніше отриманого зливка діаметром 600 мм сплаву ВТ9 (див. рис. 1).

Кування проводили за технологічною схемою, яка складалась з трьох етапів.

Перший етап — нагрів зливка діаметром 600 мм до температури 1180 °С; витримка заготовки на протязі 8-ми годин; кування на плоских бійках в квадрат 450×450 мм.

Другий етап — підігрів заготовки розмірами 450×450 мм до температури 1100 °С; кування в круглий пруток діаметром 360 мм та розрізання його на три частини.

Третій етап — підігрів заготовки діаметром 360 мм до температури 1100 °С; кування заготовок через квадрат в готовий розмір діаметром 315 мм; рихтування.

Температура кінця кування була не нижче 850 °С. Отримано три деформованих прутки і з

кожного відрізано теплет завтовшки 15 мм для подальших досліджень.

З метою вивчення якості отриманих напівфабрикатів з титанового сплаву ВТ9 були проведені комплексні дослідження, які включали в себе наступні роботи: отримання темплетів з деформованих напівфабрикатів; термічна обробка темплетів; підготовка поверхні темплетів; хімічне травлення темплетів; контроль макроструктури металу; порізка на зразки; визначення температури поліморфного перетворення ($T_{\text{пп}}$), механічних властивостей при 20 °С, рівня тривалої міцності при 500 °С; контроль мікроструктури.

Термічну обробку отриманих поковок та вирізаних з них темплетів виконували за наступним режимом:

нагрів до температури 950 °С, витримка 60 хв, охолодження на повітрі;

нагрів до температури 550 °С, витримка 360 хв, охолодження на повітрі.

Після механічної обробки та травлення поверхні темплетів було досліджено їх макроструктуру та встановлено, що в макроструктурі металу отриманих прутків відсутні тріщини, розшарування, пористості, а металевих і неметалевих включень не виявлено.

Для подальших досліджень з трьох темплетів способом електроіскрового різання по наведеній нижче схемі (рис. 2) було виготовлено зразки для визначення механічних характеристик та температури поліморфного перетворення титанового сплаву ВТ9.

Експериментально визначена температура поліморфного перетворення ($T_{\text{пп}}$) для даних зразків титанового сплаву ВТ9 складала 950 °С.

Механічні властивості визначали при температурах 20 та 500 °С після проведення вищевказаної термічної обробки. Випробування на відповідність вимогам стандартів включали в себе випробування на розтяг, ударну в'язкість, твердість і тривалу міцність (табл. 2, 3).

Таблиця 2. Механічні властивості зразків деформованого напівфабрикату титанового сплаву ВТ9

Номер темплету	Номер зразка	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	δ , %	ψ , %	KCU, Дж/см ²	Твердість, НВ
1	1C1	1129	3,2	9,0	23	341
	1C2	1116	4,8	17,0	25	
	1C3	1120	4,0	12,0	20	
2	2C1	1142	4,8	14,5	23	331
	2C2	1139	—»—	12,6	28	
	2C3	1127	3,2	11,8	—»—	
3	3C1	1089	4,0	13,4	35	321
	3C2	1078	—»—	18,5	—»—	
	3C3	1101	6,0	20,6	30	
ОСТ1.90107-73		932...1177	>6	>14	>29	269...363

Таблиця 3. Тривала міцність зразків з деформованих напівфабрикатів титанового сплаву ВТ9 при температурі 500 °С

Номер темплету	Номер зразка	σ , МПа	τ , год	Примітка
1	1А1	60	132	без руйнування
	1А2		—»—	—»—
	1А3		96	з руйнуванням
2	2А1	—»—	126	без руйнування
	2А2		137	—»—
	2А3		113	—»—
3	3А1	—»—	96	з руйнуванням
	3А2		126	без руйнування
	3А3		137	—»—
ОСТ1.90107-73		—»—	≥ 100	—

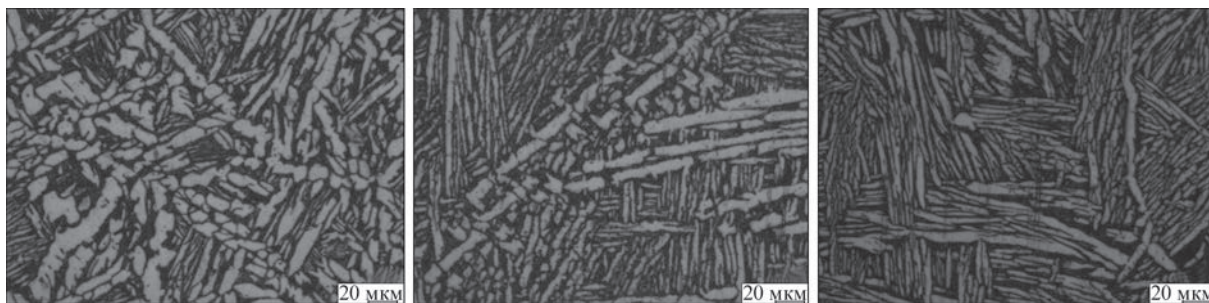


Рис. 3. Мікроструктура прутків діаметром 315 мм, отриманих деформаційною обробкою зливка діаметром 600 мм з титанового сплаву ВТ9: а — 1; б — 2; в — 3

Таблиця 4. Механічні властивості зразків деформованого напівфабрикату титанового сплаву ВТ9 після додаткової термообробки

Номер темплету	Номер зразка	σ_b , МПа	δ , %	ψ , %	KCU, Дж/см ²	Твердість, НВ
1	1	1068	11	29	29	321
	2	1092	10	14	30	311
2	1	1092	7	16	29	321
	2	1067	10	42	30	—»—
3	1	1078	11	29	33	—»—
	2	1118	14	32	32	—»—
ОСТ1.90107-73		932...1177	>6	>14	>29	269...363

Ці дані дозволяють зробити висновок, що більшість механічних властивостей напівфабрикатів із сплаву ВТ9, отриманого способом ЕПП, відповідають вимогам стандартів, але пластичні властивості виявилися нижчими ніж стандартні. Це може бути пов'язано з тим, що температура деформації знаходилась в області існування β -фази і в металі сформувалася повністю пластинчаста структура з досить великим розміром пластин. Відомо, що від типу структури та розміру кристалітів дуже сильно залежать показники пластичності матеріалу. Зниження поперечного звуження при пластинчастій структурі, в порівнянні з глобулярною, може досягати 70...80 мас. %, а відносне подовження може зменшуватися на 40...50 % [8, 9]. Також досить низькою була температура відпау на нижній межі поліморфного перетворення.

Більшість зразків титанового сплаву ВТ9 пройшли випробування на тривалу міцність при температурі 500 °С та $\sigma = 60$ МПа без руйнування, середній час випробувань склав 122 год.

Аналіз мікроструктури отриманих напівфабрикатів титанового сплаву ВТ9 у вигляді гарячедеформованих прутків діаметром 315 мм показав, що мікроструктура всіх зразків відповідає 4а...6а типу 9-типової шкали мікроструктур інструкції № 1054-76 (рис. 3) [10].

Для підвищення характеристик пластичності проведена додаткова термічна обробка зразків з титанового сплаву ВТ9. Температуру першого нагріву підвищили до 980 °С, а час витримки в печі зразків — до 120 хв. Проведені механічні іспити зразків після додаткової термічної обробки (табл. 4) показали повну відповідність механічних характеристик

напівфабрикатів з титанового сплаву ВТ9, отриманого способом ЕПП, вимогам стандартів.

Висновки

1. Показано, що зливки титанового сплаву ВТ9, отримані за технологією електронно-променевої плавки з проміжною ємністю, характеризуються високою однорідністю як за хімічним складом, так і за структурою, відсутністю дефектів у вигляді пор та неметалевих включень.

2. Запропоновано технологічну схему термомоделювання обробки злиwkів діаметром 600 мм з титанового сплаву ВТ9, яка забезпечує отримання прутків діаметром 315 мм з однорідною структурою.

3. Встановлено режими термічної обробки прутків діаметром 315 мм з титанового сплаву ВТ9, що забезпечують повну відповідність механічних характеристик напівфабрикатів вимогам стандартів.

Список літератури

1. Павлова Т.В., Кашапов О.С., Ночовная Н.А. (2012) Титановые сплавы для газотурбинных двигателей. *Все материалы. Энциклопедический справочник*.
2. Хореев А.И., Хореев М.А. (2005) Титановые сплавы, их применение и перспективы развития. *Материаловедение*, 7, 25–34.
3. Александров В.К., Аношкин Н.Ф., Бочвар Г.А. и др. (1979) *Полуфабрикаты из титановых сплавов*. Москва, Металлургия.
4. Антоныук С.Л., Моляр А.Г., Калинюк А.Н., и др. (2003) Титановые сплавы для авиационной промышленности Украины. *Современная электрометаллургия*, 1, 10–14.
5. Бабенко Е.П., Долженкова Е.В. (2014) Исследование причин разрушения крупногабаритного изделия из сплава ВТ23. *Металлургическая и горнорудная промышленность*, 3, 82–85.
6. Патон Б.Е., Тригуб Н.П., Ахонин С.В., Жук Г.В. (2006) *Электронно-лучевая плавка титана*. Киев, Наукова думка.
7. Ахонин С.В., Северин А.Ю., Березос В.А. и др. (2016) Особенности выплавки слитков титанового сплава ВТ19

8. Ильин А.А., Колачев Б.А., Польшин И.С. (2009) *Титановые сплавы. Состав, структура, свойства*: Справочник. Москва, ВИЛС-МАТИ.
9. Елагина Л.А., Гордиенко А.И., Ивашко В.В. и др. (1978) Влияние структуры на механические свойства сплавов ВТ9 и ВТ18. *Технология легких сплавов*, 12, 33–38.
10. (1974) Инструкция № 1054–76. *Металлографический анализ титановых сплавов*. ВИАМ.

References

1. Pavlova, T.V., Kashapov, O.S., Nochovnyaya, N.A. (2012) Titanium alloys for gas turbine engines. *All materials. Encyclopedic reference book* [in Russian].
2. Khoreev, A.I., Khoreev, M.A. (2005) Titanium alloys, their application and prospects of development. *Materialovedenie*, 7, 25–34 [in Russian].
3. Aleksandrov, V.K., Anoshkin, N.F., Bochvar, G.A. et al. (1979) *Semiproducts from titanium alloys*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
4. Antonyuk, S.L., Molyar, A.G., Kalinyuk, A.N., Zamkov, V.N. (2003) Titanium alloys for aircraft industry of Ukraine. *Advances in Electrometallurgy*, 1, 9–12.
5. Babenko, E.P., Dolzhenkova, E.V. (2014) Examination of destruction causes of large-sized product from VT23 alloy. *Metallurgicheskaya i Gornorudnaya Promyshlennost*, 3, 82–85 [in Russian].
6. Paton, B.E., Trigub, N.P., Akhonin, S.V., Zhuk G.V. (2006) *Electron beam melting of titanium*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
7. 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. *Sovrem. Elektrometall.*, 2, 23–27 [in Russian].
8. Iliin, A.A., Kolachev, B.A., Polkin, I.S. (2009) *Titanium alloys. Composition, structure, properties*: Refer. Book. Moscow, VILS-MATI [in Russian].
9. Elagina, L.A., Gordienko, A.I., Ivashko, V.V. et al. (1978) Influence of structure on mechanical properties of VT9 and VT18 alloys. *Tekhnologiya Lyogkikh Splavov*, 13, 33–38 [in Russian].
10. (1974) Instruction No. 1054–76: *Metallographic analysis of titanium alloys*. Moscow, VIAM [in Russian].

INVESTIGATIONS OF THE QUALITY OF WROUGHT SEMI-FINISHED PRODUCTS OF VT9 TITANIUM ALLOY PRODUCED BY ELECTRON BEAM MELTING

S.V. Akhonin¹, A.Yu. Severin¹, V.O. Berezos¹, O.M. Pikulin¹, V.A. Kryzhanovskiy², O.G. Yerokhin³

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: office@paton.kiev.ua

²«NVO Khvyliya» Company.

44/1 Naberezhnaja Peremohi, 49094, Dnipro, Ukraine. E-mail: npovolna@ukr.net

³SC «SPC «Titan» of the E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine».

26, Raketna Str., 03028, Kyiv, Ukraine. E-mail: titan.paton@gmail.com

Complex works were performed to study the quality of wrought semi-finished products, manufactured from an ingot of VT9 titanium alloy. Electron beam remelting technology was used to produce ingots of 600 mm diameter and 1.5 m length, from which semi-finished products were manufactured in the form of hot-pressed rods of 315 mm diameter. Results of investigations of structure and mechanical properties of semi-finished products in the form of hot-pressed rods are given. It is shown that the metal of the produced ingots and wrought semi-finished products meets the requirements of the standards after the respective heat treatment. Ref. 10, Tabl. 4, Fig. 3.

Key words: electron beam melting; high-strength titanium alloy; ingot; chemical composition; structure; deformation; mechanical properties

Надійшла до редакції 06.10.2021