

ВПЛИВ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ НА СТРУКТУРУ СПЛАВУ ВТ9

В.Ю. Білоус¹, Е.Л. Вржижевський¹, Р.В. Селін¹, Л.М. Радченко¹, С.Л. Антонюк²¹ІЕЗ ім. С.О. Патона НАН України. 03150, вул. Казимира Малевича, 11²ДП «АНТК ім. О.К. Антонова». 03062, м. Київ, вул. Мрії, 1

РЕФЕРАТ

Титанові жароміцні двофазні ($\alpha+\beta$)-сплави можуть мати високі експлуатаційні характеристики при використанні в авіаційних двигунах. Для розширення обсягів застосування або відновлення деталей, виготовлених з двофазного сплаву ВТ9, доцільно розглянути можливість застосування вакуумного відпалу для обробки заготовлі або деталей після механічної обробки чи зварювання. В роботі досліджували вплив вакуумного відпалу при температурі 950 °С на структуру листів титанового ($\alpha+\beta$)-сплаву ВТ9. Листи з титанового ($\alpha+\beta$)-сплаву ВТ9 товщиною 10 мм було піддано вакуумному відпалу при температурі 950 °С протягом 1 год та охолодженню з піччю. Мікроструктура металу зразків з жароміцного титанового двофазного ($\alpha+\beta$)-сплаву ВТ9 в вихідному стані однорідна, дрібнодисперсна та складається з частинок α -фази, товщина яких становить 2...4 мкм, довжина 2...20 мкм. Мікроструктура металу зразків після вакуумного відпалу з подальшим охолодженням з піччю однорідна та складається з частинок α -фази товщиною 2...6 мкм та довжиною до 20 мкм. Відзначається збільшення розмірів α -фази пов'язане з процесом її коагуляції. Вакуумний відпал при температурі 950 °С призвів до зниження кількості дисперсних частинок в структурі металу і росту в результаті коагуляції при уповільненому охолодженні частинок α -фази. Кількість β -фази в металі титанового жароміцного ($\alpha+\beta$)-сплаву ВТ9 знижується до 15...22 %. Такі структурні зміни можуть призвести до зниження показників міцності сплаву та збільшення показників ударної в'язкості, що сприяє збільшенню експлуатаційних показників деталей з сплаву ВТ9. Бібліогр. 19, табл. 3, рис. 8.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: титановий сплав, двофазні ($\alpha+\beta$)-сплави, мікроструктура, вакуумний відпал, α -фаза, β -фаза

ВСТУП

В конструкціях авіаційних двигунів при проектуванні деталей з титанових сплавів необхідно враховувати, що найбільшу жаростійкість мають псевдо- α -титанові сплави, з перевагою α -структури за рахунок збереження α -структури при підвищених температурах та підтриманні на максимально високому рівні температури поліморфного ($\alpha\leftrightarrow\beta$)-перетворення [1–3]. Але титанові двофазні ($\alpha+\beta$)-сплави також можуть мати високі експлуатаційні характеристики при використанні в авіаційних двигунах за рахунок високого вмісту алюмінію і легуванням кремнієм. Це такі високолеговані ($\alpha+\beta$)-сплави як ВТ3-1, ВТ8, ВТ9, ВТ25 і ВТ18В. До недоліків ($\alpha+\beta$)-сплавів мартенситного класу слід віднести їх підвищену чутливість до термічної дії, що ускладнює зварювання цих сплавів, гарячу деформацію та деякі інші технологічні операції, пов'язані з нагріванням та охолодженням [4, 5]. Як жароміцні титанові сплави, що використовуються у виробництві газотурбінних двигунів, найбільше застосування мають такі відомі двофазні і псевдо- α -сплави: ВТ3-1 (Ti–6Al–2,5Mo–2Cr–0,3Si–0,5Fe), ВТ5-1 (Ti–5Al–2,5Si), ВТ8 (Ti–6,5Al–3,3Mo–0,35Si), ВТ9 (Ti–6,5Al–1Zr–3,3Mo–0,3Si), ВТ25 (Ti–6,5Al–4Mo–1,8Sn–38Zr–1W–0,25Si) та ВТ18 (Ti–7Al–1Mo–11Zr–1Nb–0,2Si) [6].

Жароміцний титановий сплав ВТ9 системи легування Ti–Al–Mo–Zr–Si було розроблено наприкінці 20-го століття і він знайшов широке використання при серійному виробництві деталей газотурбінних двигунів (ГТД), які тривалий час працюють при температурі до 450 °С [6, 7]. Деформований жароміцний титановий сплав ВТ9 системи Ti–Al–Mo–Zr–Si відноситься до двофазних ($\alpha+\beta$)-сплавів мартенситного класу [6]. Високий вміст алюмінію і легування кремнієм забезпечують йому більш високі жароміцні властивості в порівнянні з найбільш розповсюдженим двофазним титановим сплавом ВТ6, його можливо зміцнювати за допомогою додаткової термічної обробки — гартування з наступним старінням. В роботі [8] досліджували якість деформованих напівфабрикатів титанового сплаву ВТ9, отриманого способом електронно-променевої плавки (табл. 1). Оптимальне поєднання механічних властивостей деталей з сплаву ВТ9 забезпечує подвійний відпал. З титанового сплаву ВТ9 виготовляють диски, лопатки та інші деталі компресорів ГТД [9, 10].

Таблиця 1. Механічні властивості зразків деформованого напівфабрикату титанового сплаву ВТ9 [8]

Темплет	σ_b , МПа	δ , %	ψ , %	KCU, Дж/см ²	Твердість, НВ
1	1129	3,2	9,0	23	341
2	1142	4,8	12,0	20	331
3	1101	6,0	20,6	30	321

Авторське право © Автор(и)

© Видавець ТОВ «ВИДАВНИЧИЙ ДІМ» ПАТОН», 2026

Ця стаття у відкритому доступі за ліцензією CC BY-NC-ND <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Відомо, що після відпалу сплаву VT9 при 950 °С з наступним охолодженням на повітрі кількість β -фази становить близько 9 %. Наступне нагрівання при 530 °С протягом 6 год практично не змінює характер мікроструктури металу, що спостерігається при збільшеннях характерних для оптичної мікроскопії [11]. Під час відпалу титанового сплаву VT9 при температурі 950 °С протягом 25 та 50 год пластинчастий характер вихідної мікроструктури не змінюється. Вважають, що стабільність пластинчастої мікроструктури сплаву VT9 і низький ефект від обробки пов'язані з більш низьким значенням міжфазної енергії границь зерен, ніж, наприклад, в сталях [11].

Для розширення обсягів застосування двофазного ($\alpha+\beta$)-сплаву VT9 або відновлення деталей з сплаву VT9 доцільно розглянути можливість застосування для термообробки оброблених деталей вакуумного відпалу при температурі 950 °С, що дозволить запобігти окисленню поверхні деталей при термообробці. В роботах [12–14] автори вивчали вплив дисперсності пластинчастої мікроструктури в ($\alpha+\beta$)-сплавах на інтенсивність подрібнення α -пластин при гарячій деформаційній обробці, було встановлено що вихідний структурний стан впливає на середній розмір дрібнозернистої структури, що формується.

Таким чином, особливості вихідної структури жароміцного титанового ($\alpha+\beta$)-сплаву VT9 впливають на його показники міцності та експлуатаційні характеристики кінцевого виробу [15]. Додаткова технологічна обробка, наприклад, вакуумний відпал, необхідна після зварювання і може, тому необхідно проведення досліджень впливу додаткової технологічної обробки на кінцеву структуру металу деталі яка обробляється.

Метою роботи є дослідження впливу вакуумного відпалу при температурі 950 °С на структуру титанового ($\alpha+\beta$)-сплаву VT9.

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

Листи з титанового ($\alpha+\beta$)-сплаву VT9 товщиною 10 мм було піддано вакуумному відпалу при температурі 950 °С протягом 1 год та охолодженню з піччю. Хімічний склад титанового сплаву VT9 наведено в табл. 2.

Металографічні дослідження структури та зміни в структурі металу досліджувалися за допомогою оптичного мікроскопа «NEOFOT-30», оснащеного приставкою для цифрового фотоапарата. Систему реєстрації зображень здійснювали комп'ютерною програмою «QuickPhoto». Цифрове зображення обробляли програмою «Atlas».

Заготовки під шліфи підлягали шліфуванню та поліруванню. Для виявлення мікроструктури проводили травлення мікрошліфів в водному розчині суміші плавикової та азотної кислот (10 мл 40 % HF, 5 мл 60 % HNO₃, 50 мл води).

Визначення кількості фаз в металі виконували на мікрошліфах. Виявлення мікроструктури та визначення фаз ґрунтоване на тому, що різні фази протравлюються і фарбуються неоднаково. Так, β -фаза має світлий колір на мікрошліфах, α -, α' , α'' — темний колір. Для комп'ютерної обробки отриманих мікроструктур використовували програмний пакет Image-ProPlus, який обчислює частку світлих частин на мікрошліфі відповідно до заданих параметрів.

СТРУКТУРА ТИТАНОВОГО ДВОФАЗНОГО ЖАРОМІЦНОГО ($\alpha+\beta$)-СПЛАВУ VT9 В СТАНІ ПІСЛЯ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ

Була досліджена структура прокатоного металу листів товщиною 10 мм титанового жароміцного ($\alpha+\beta$)-сплаву VT9 в стані після прокату (рис. 1).

В зв'язку з тим, що в процесі вакуумного відпалу титанового сплаву можливе розчинення адсорбованих на поверхні забруднень та утворення альфованого слою в поверхневих ділянках зразків, було досліджено структуру листів титанового жароміцного ($\alpha+\beta$)-сплаву VT9 на поверхні (метал поверхневої зони листів — ділянки *C* та *E*) в середині листа та на відстані 2 мм від поверхні (метал середньої зони листів — ділянки *A*, *B* та *D*) (рис. 2).

Мікроструктура металу листів середньої зони сплаву VT9 в поперечному перерізі в вихідному стані без термічної обробки в точці *A* показана на рис. 3. Мікроструктура металу сплаву VT9 в точці *A* однорідна, дрібнодисперсна та складається зі світлих (фото) частинок α -фази, товщина яких становить 2...4 мкм, довжина 2...20 мкм (рис. 3, *a*, *b*). У проміжках між світлими α -частинками розташовується

Таблиця 2. Хімічний склад титанового сплаву VT9 згідно ГОСТ 19807–91, мас. %

Основні компоненти						Домішки (не більше)					
Ti	Al	Mo	Zr	Mn	Si	Fe	C	O ₂	N ₂	H ₂	Сумма інших домішок
Основа	5,8...7,0	2,8...3,8	1,0...2,0	0,5...1,3	0,20...0,35	0,25	0,10	0,15	0,05	0,015	0,30

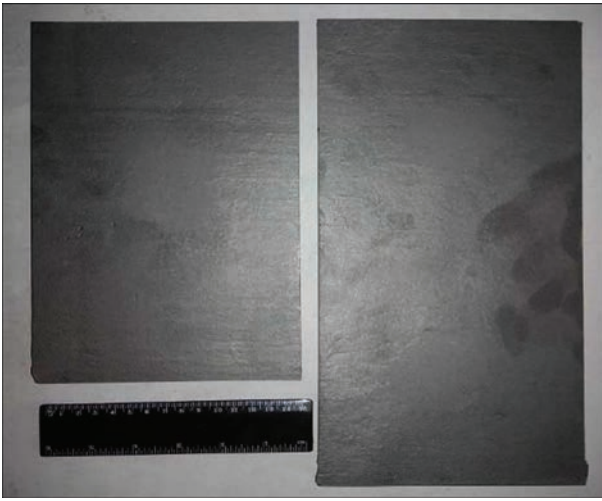


Рис. 1. Зовнішній вигляд листів титанового жароміцного ($\alpha+\beta$)-сплаву ВТ9 в стані після деформаційної обробки

суміш дисперсних частинок, добре видимих при великому збільшенні мікроскопа (рис. 3, *в, з*).

Мікроструктура металу листів середньої зони сплаву ВТ9 в вихідному стані без термічної обробки в точці *В* показана на рис. 4. Мікроструктура металу листів з сплаву ВТ9 в точках *А* і *В* є ідентичною. Вона однорідна, дрібнодисперсна та складається зі світлих частинок α -фази, товщина яких становить 2...4 мкм, довжина 2...20 мкм (рис. 4, *а, б*). У проміжках між світлими α -частинками розташовується суміш дисперсних частинок, добре видимих при великому збільшенні мікроскопа (рис. 4, *в, з*). Мікро-

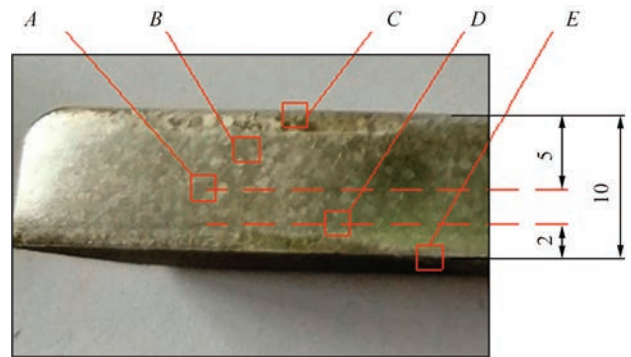


Рис. 2. Схема розташування ділянок при дослідженні структури металу листів з титанового жароміцного ($\alpha+\beta$)-сплаву ВТ9 в поперечному перерізі в вихідному стані

структура металу листів середньої зони в точці *Д* ідентична структурі металу в точці *А* та *В*.

Мікроструктура металу поверхневої зони листів сплаву ВТ9 в вихідному стані в ділянці *С* показана на рис. 5.

Мікроструктура металу зразка в ділянці *С* неоднорідна (рис. 5, *а, б*), складається з рівноосних і нерівноосних зерен, що переважає в структурі α -фази, товщина якої становить 2...10 мкм, довжина 2...30 мкм (рис. 5, *в, з*). У проміжках між частинками α -фази вздовж границь спостерігаються як протяжні цілісні фази, так і скупчення дисперсних частинок (рис. 5, *з*). В деяких ділянках структури в проміжках між первинною α -фазою спостерігаються тонкі пластинчасті частинки товщиною 1 мкм і менше (рис. 5, *з*), що може свідчити про розпад метастабільної β -фази на якомусь етапі виробництва цього

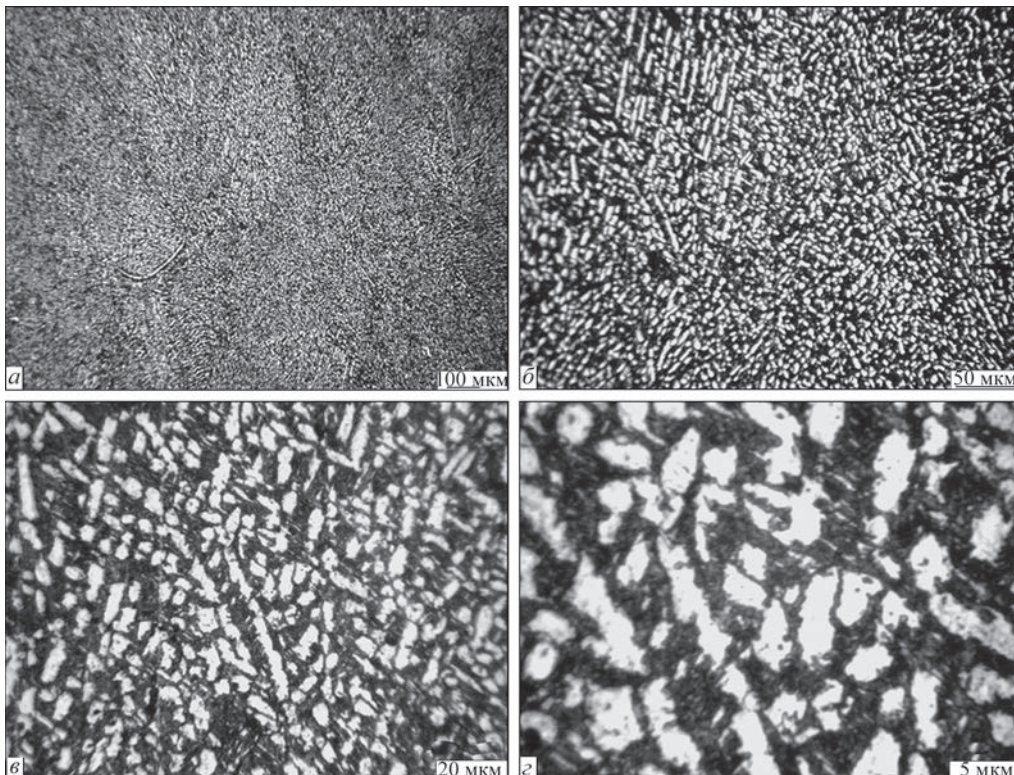


Рис. 3. Мікроструктура металу листів середньої зони титанового жароміцного ($\alpha+\beta$)-сплаву ВТ9 в вихідному стані в ділянці *А*

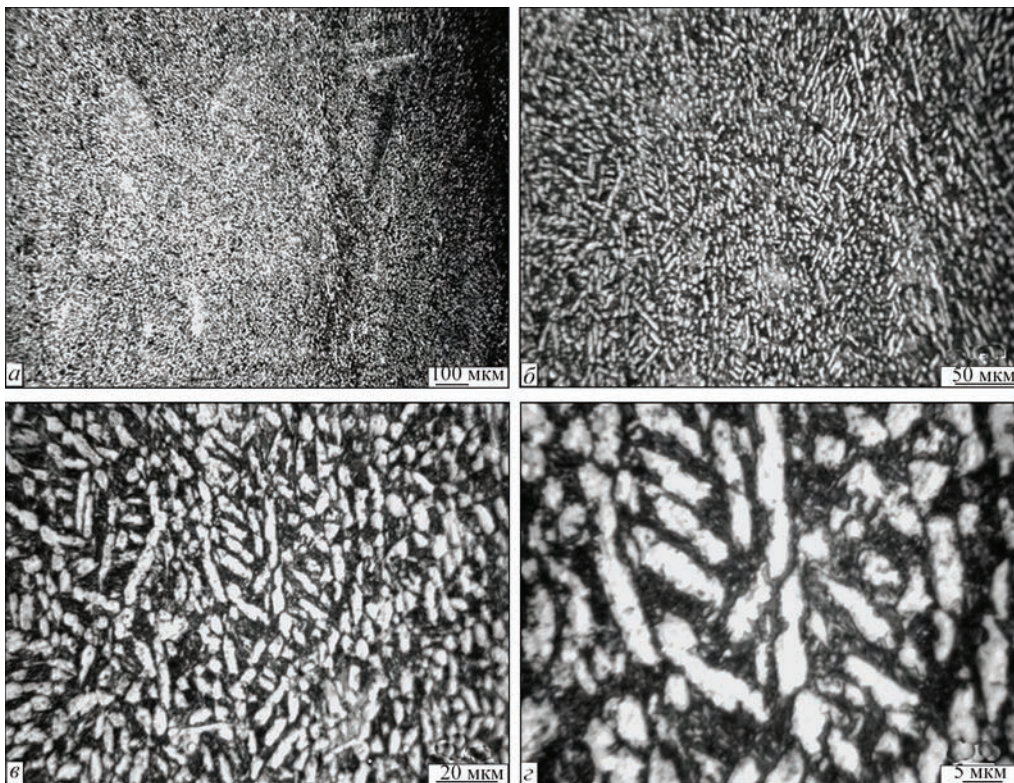


Рис. 4. Мікроструктура металу листів середньої зони титанового жароміцного ($\alpha+\beta$)-сплаву ВТ9 в вихідному стані в ділянці *B* зразка. Мікроструктура металу листів в точці *E* ідентична структурі металу в точці *C*.

Мікроструктуру металу листів з титанового жароміцного ($\alpha+\beta$)-сплаву ВТ9 в стані після вакуумного відпалу при температурі 950 °С протягом 1 год та охолодження з піччю досліджували в трьох ділянках *A*, *B* та *C* (рис. 2): метал середньої

зони листів — ділянки *A* та *B*; метал поверхневої зони листів — ділянка *C*.

Мікроструктура зразка 2, що пройшов вакуумний відпал при температурі 950 °С протягом 1 год і охолодження з піччю в ділянці *A* показана на рис. 6.

Мікроструктура металу зразка 2, що пройшов вакуумний відпал з подальшим охолодженням з

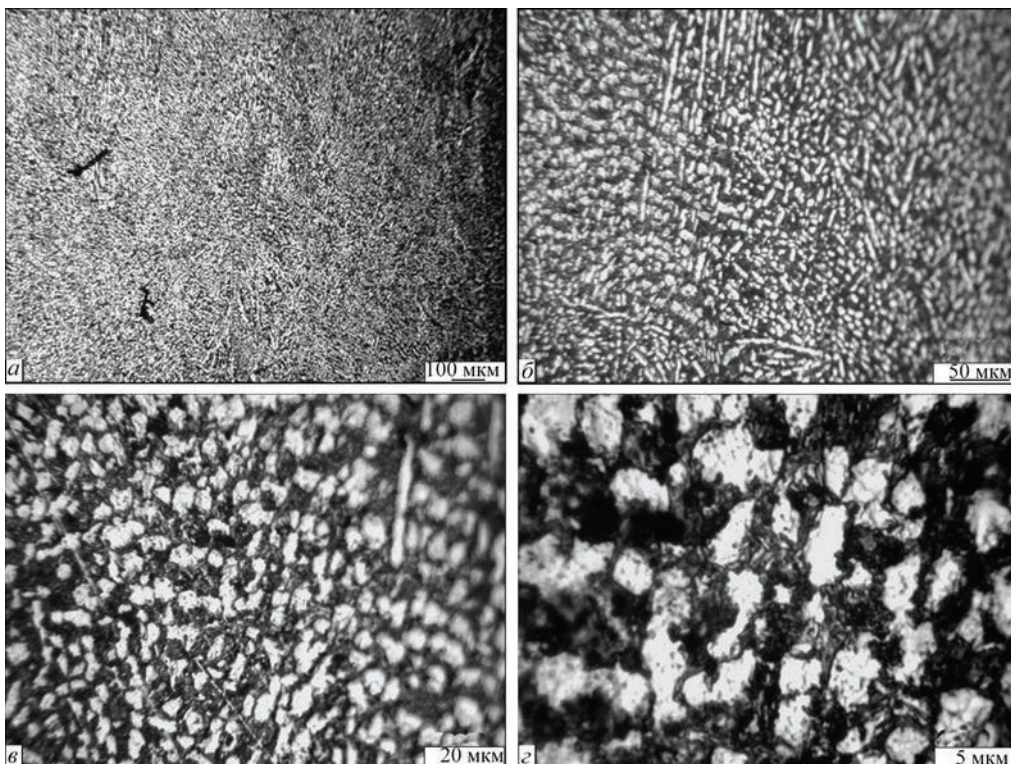


Рис. 5. Мікроструктура металу поверхневої зони листів титанового жароміцного ($\alpha+\beta$)-сплаву ВТ9 в вихідному стані в ділянці *C*

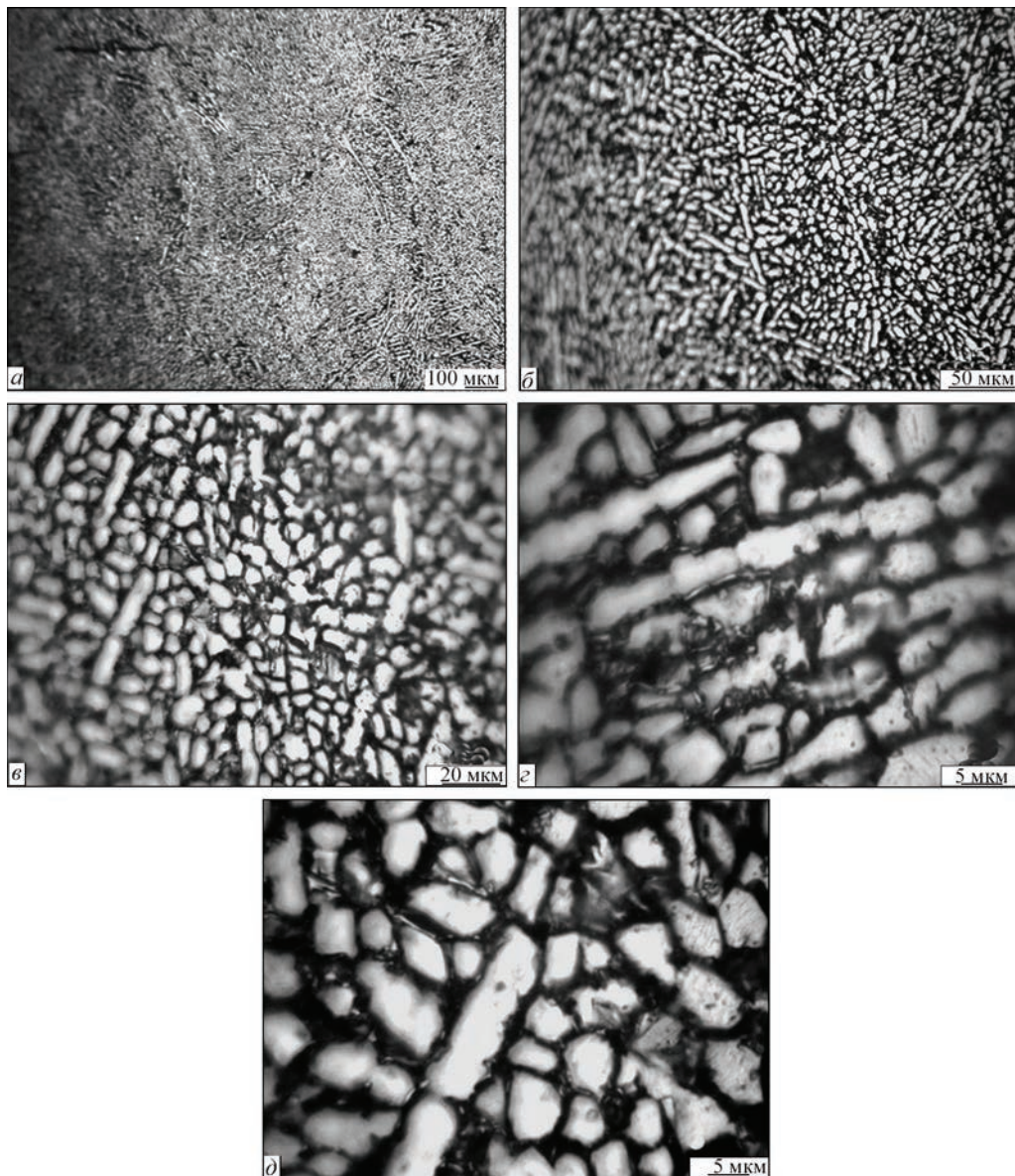


Рис. 6. Мікроструктура металу листів середньої зони з титанового жароміцного ($\alpha+\beta$)-сплаву ВТ9 в стані після вакуумного відпалу при температурі 950 °С протягом 1 год та охолодження з піччю в ділянці А

піччю в точці А однорідна (рис. 6, а, б) та складається з частинок α -фази товщиною 2...6 мкм та довжиною до 20 мкм (рис. 6, в-д).

Мікроструктура зразка 2, що пройшов вакуумний відпал при температурі 950 °С протягом 1 год і охолодження з піччю в ділянці В показана на рис. 7. Мікроструктура металу зразка 2, що пройшов вакуумний відпал з подальшим охолодженням з піччю, ідентична в точках А та В. Вона також однорідна (рис. 7, а, б) та складається з частинок α -фази товщиною 2...6 мкм та довжиною до 20 мкм (рис. 7, в, г). Деяке збільшення розмірів α -фази пов'язане з процесом її коагуляції. Крім того, при повільному охолодженні з піччю відбувається перерозподіл компонентів у α - та β -фазах. В результаті цього, в проміжках між частинками α -фази, місцями в структурі утворюється, найімовірніше, цілісний β -прошарок. Однак у структурі сплаву ВТ9 після

проведеної термічної обробки залишаються проміжки між α -фазою, заповнені дисперсними частинками, що видно при великому збільшенні.

Мікроструктура металу поверхневої зони листів з титанового жароміцного ($\alpha+\beta$)-сплаву ВТ9 в ділянці С після відпалу при температурі 950 °С неоднорідна (рис. 8, а, б), складається з рівноосних і нерівноосних зерен, що переважає в структурі α -фази, товщина якої становить 2...10 мкм, довжина 2...30 мкм (рис. 8, в, г). У проміжках між частинками α -фази вздовж границь спостерігаються як протяжні цілісні фази, так і скупчення дисперсних частинок (рис. 8, д).

В деяких ділянках структури в проміжках між первинною α -фазою спостерігаються тонкі пластинчасті частинки товщиною 1 мкм і менше (рис. 8, д), що свідчить про розпад метастабільної β -фази при вакуумному відпалі.

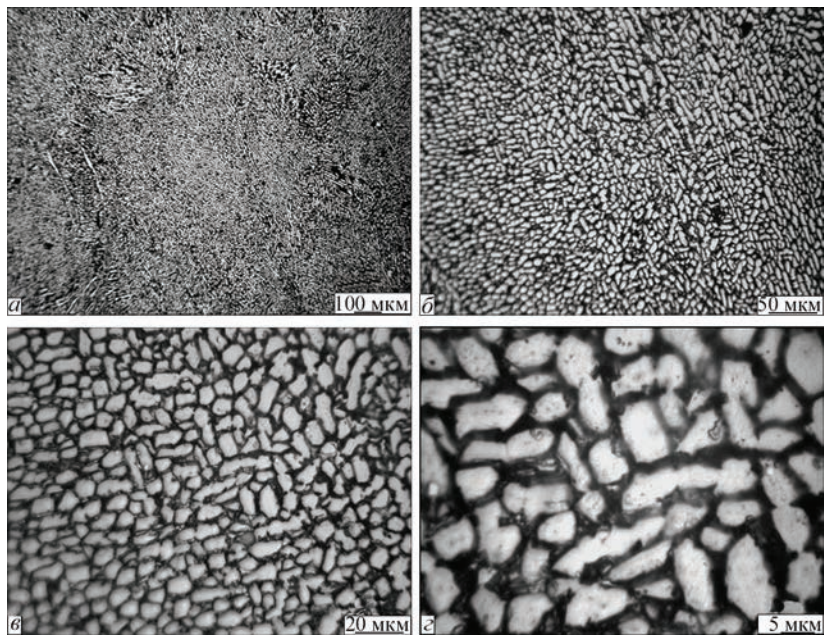


Рис. 7. Мікροструктура металу листів середньої зони з титанового жароміцного ($\alpha+\beta$)-сплаву ВТ9 в стані після вакуумного відпалу при температурі 950 °С протягом 1 год та охолодження з піччю в ділянці В

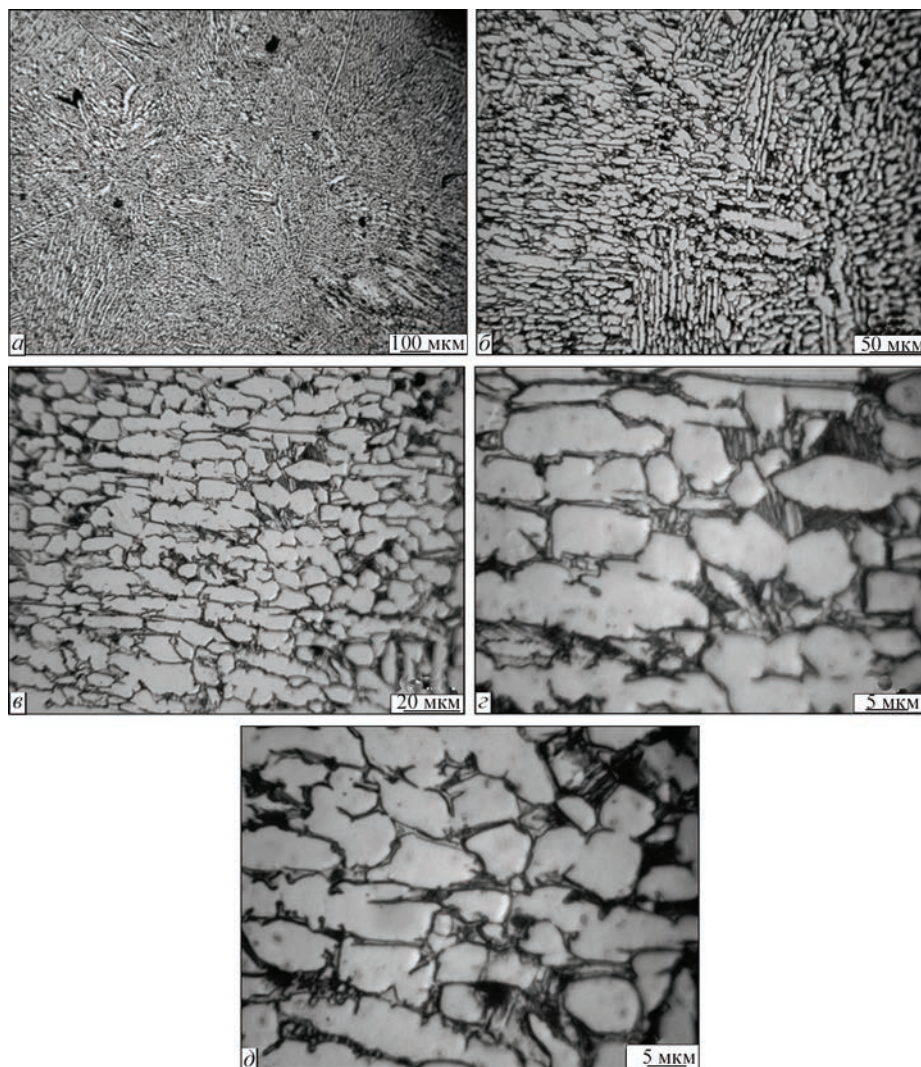


Рис. 8. Мікροструктура металу поверхневої зони листів з титанового жароміцного ($\alpha+\beta$)-сплаву ВТ9 в стані після вакуумного відпалу при температурі 950 °С протягом 1 год та охолодження з піччю в ділянці С

Таблиця 3. Кількість β -фази в металі листів з титанового жароміцного ($\alpha+\beta$)-сплаву VT9, %

Ділянка	В вихідному стані	Після відпалу 950 °C
A	29	22
B	28	15
C	25	17

Для ділянок A, B та C також виконували визначення кількості β -фази (табл. 3). Визначення кількості β -фази в металі зразків з титанового сплаву VT9 дозволило зробити висновок про зменшення кількості β -фази в металі листів в результаті проведеного вакуумного відпалу при температурі 950 °C.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

Особливості структури жароміцного титанового ($\alpha+\beta$)-сплаву VT9 впливають на його показники міцності та експлуатаційні характеристики. Мікроструктура дослідженого металу листів жароміцного титанового ($\alpha+\beta$)-сплаву VT9 однорідна, дрібнодисперсна та складається з частинок α -фази, товщина яких становить 2...4 мкм, довжина 2...20 мкм (рис. 8, а, б). Мікроструктура металу листів сплаву VT9 після вакуумного відпалу при температурі 950 °C складається з рівноосних і нерівноосних зерен, що переважає в структурі α -фази, товщина якої становить 2...10 мкм, довжина — 2...30 мкм, тобто до деякого збільшення розмірів частинок α -фази на відміну від вказаного зменшення [16]. Проведення вакуумного відпалу сплаву VT9 при 950 °C з наступним охолодженням з піччю призводить до помітної зміни фазового складу металу — кількість β -фази знижується з 27 до 17 %. Слід відзначити дещо більшу кількість β -фази в металі поверхневої зони листів. Додаткова технологічна обробка, в даному разі вакуумний відпал, необхідна після зварювання [17, 18], значно впливає на структуру напівфабрикатів і призведе до зміни показників міцності деталі, яка обробляється.

Порівняння мікроструктури металу листів з титанового двофазного ($\alpha+\beta$)-сплаву VT9 в вихідному стані та після вакуумного відпалу при температурі 950 °C дозволило зробити висновок, що відпал призвів до зниження кількості дисперсних частин в структурі металу і росту в результаті коагуляції при відпалі розміру частинок α -фази. Так, для двофазного титанового сплаву VT6 зі збільшенням розмірів пластин або глобулярних частинок α -фази спостерігається зниження межі міцності та зростання ударної в'язкості [19]. Тому для двофазного сплаву VT9 зростання розміру частинок α -фази може призвести до деякого зниження показників міцності та збільшення показників ударної в'язкості сплаву.

ВИСНОВКИ

1. Мікроструктура металу листів з жароміцного титанового двофазного ($\alpha+\beta$)-сплаву VT9 в вихідному стані однорідна, дрібнодисперсна та складається з частинок α -фази, товщина яких становить 2...4 мкм, довжина 2...20 мкм, кількість β -фази в металі листів становить 25...29 %.

2. Вакуумний відпал при температурі 950 °C протягом 1 год та охолодження з піччю призводить до зниження кількості дисперсних частинок в структурі металу і росту в результаті коагуляції при уповільненому охолодженні частинок α -фази, кількість β -фази в металі листів знижується до 15...22 %.

3. Зростання розміру частинок α -фази в результаті коагуляції при вакуумному відпалі деталей, виготовлених зі сплаву VT9, може призвести до деякого зниження показників міцності сплаву та збільшення показників ударної в'язкості.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ/REFERENCES

1. Firstov, S.O., Kulak, L.D., Kuzmenko, M.M., Shevchenko, O.M. (2018) Alloys of Ti–Al–Zr–Si system for high-temperature operation. *Fizyko-Khimichna Mehanika Materialiv*, 54(6), 30–35 [in Ukrainian]. <http://jnas.nbuv.gov.ua/article/UJRN-0000958917>
2. Shichen, Sun, Hongze, Fang, Yili, Li et al. (2023) Formation mechanism and effect on the mechanical properties of TiSi phase for Ti–5Al–5Mo–5Cr–3Nb–2Zr alloyed by silicon. *J. of Alloys and Compounds*, 938(25), 168510. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.168510>
3. Gomez-Gallegos, A., Mandal, P., Gonzalez, D. et al. (2018) Studies on titanium alloys for aerospace application. *Defect and Diffusion Forum*, 385, 419–423. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/DDF.385.419>
4. Williams, J.C., Boyer, R.R. (2020) Opportunities and issues in the application of titanium alloys for aerospace components. *Metals*, 10(6), 705. DOI: <https://doi.org/10.3390/met10060705>
5. Mantione, J., Garcia-Avila, M., Arnold, M. et al. (2020) Properties of novel high temperature titanium alloys for aerospace applications. In: *Proc. of the MATEC Web of Conf.*, 321, 04006. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/202032104006>
6. Solonina, O.P., Glazunov, S.G. (1973) *High-temperature titanium alloys*. Moscow, Metallurgiya.
7. Narushima, T., Sugizaki, Y. (2020) Recent activities of titanium research and development in Japan. In: *Proc. of the MATEC Web of Conf.*, 321, 01004. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/202032101004>
8. Akhonin, S.V., Severin, A.Yu., Berezos, V.O. et al. (2021) Investigations of the quality of wrought semi-finished products of VT9 titanium alloy produced by electron beam melting. *Suchasna Elektrometalurhiya*, 4, 20–24. DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2021.04.03>
9. Kaibyshev, O.A., Lutfullin, R.Ya., Salishchev, G.A. (1985) Microstructural changes in heat treatment and hot deformation of VT9 titanium alloy with lamellar microstructure. *Fizika Metallov i Metallovedenie*, 59(3), 578–583.
10. Skripalenko, M.M., Galkin, S.P., Karpov, B.V. et al. (2019) Forming features and properties of titanium alloy billets after radial-shear rolling. *Materials*, 12, 3179. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma12193179>
11. Yadav, P., Saxena, K.K. (2020) Effect of heat-treatment on microstructure and mechanical properties of Ti alloys: An overview. *Materials Today: Proceedings*, 26, 2546–2557. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.541>

12. Berdin, V.K., Karavaeva, M.V., Nurieva, S.K. (2002) Influence of dispersity of lamellar microstructure on fragmentation of α -plates during hot deformation of VT9 titanium alloy. *Materialovedenie*, **12**, 47–53.
13. Jian Zhou, Xia Li, Chaoyi Ding et al. (2025) Deformation response analysis of Ti–6.5Al–3.5Mo–1.5Zr–0.3Si alloy under electromagnetic shock treatment via nanoindentation. *Materials Characterization*, Pt A, **229**, 115551, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2025.115551>
14. Chai, Zaixian, Wang, William, Ren, Yong et al. (2024) Hot deformation behavior and microstructure evolution of TC11 dual-phase titanium alloy. *Materials Science and Engineering: A*, **898**, 146331. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2024.146331>
15. Akhonin, S.V., Pikulin, A.N., Klochai, V.V., Ryabtsev, A.D. (2019) Electron-beam surface treatment of titanium alloy ingots. Pt 1. *Metallurgist*, **63**(1–2), 183–191. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11015-019-00808-9>
16. Vodopyanova, O.V., Postylyakov, A.Yu., Shvarts, D.L. et al. (2022) Evaluation of VT6 and VT9 $\alpha+\beta$ titanium alloys spreading features during flat rolling. In: *Proc. of the AIP Conf.*, **2456**(1), 020039. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0074585>
17. Jia, X., Yang, Y., Di, R. (2025) Ti–6.5Al–3.5Mo–1.5Zr–0.3Si Alloy fabricated by laser melting deposition: Microstructure evolution and anisotropy. *J. of Materials Engineering and Performance*. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11665-025-12862-3>
18. Pushilina, N.S., Kashkarov, E.B., Syrtanov, M.S. et al. (2018) Microstructure and properties of Ti–6.5Al–3.5Mo–1.5Zr–0.3Si parts produced by electron beam melting. *J. of Physics: Conf. Series*, **1115**(4), 042057. IOP Publishing. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1115/4/042057>
19. Xiaohui, Shi, Weidong, Zeng, Yu, Sun et al. (2015) Microstructure-tensile properties correlation for the Ti–6Al–4V titanium alloy. *JMEPEG*, **24**(4), 1754–1762.

INFLUENCE OF HEAT TREATMENT ON THE STRUCTURE OF VT9 ALLOY

V.Yu. Bilous¹, E.L. Vrzhezhevskiy¹, R.V. Selin¹, L.M. Radchenko¹, S.L. Antoniuk²

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine

²SC «O.K. Antonov ANTK». 1 Mriya Str., 03062, Kyiv, Ukraine

ABSTRACT

High-temperature titanium two-phase ($\alpha+\beta$)-alloys can have high service properties when used in aircraft engines. In order to widen the scope of application or to restore the parts made from two-phase VT9 alloy, it is rational to consider the possibility of applying vacuum annealing for processing of the billets or parts after machining or welding. The influence of vacuum annealing at the temperature of 950 °C on the structure of sheets of VT9 titanium ($\alpha+\beta$)-alloy was studied in the work. Sheets of VT9 titanium ($\alpha+\beta$)-alloy 10 mm thick, were treated by vacuum annealing at the temperature of 950 °C for 1 h and were cooled with the furnace. Microstructure of the metal of samples of high-temperature two-phase titanium ($\alpha+\beta$)-alloy VT9 in the initial condition is homogeneous, finely dispersed and consists of α -phase particles, with a thickness of 2...4 μm , and length of 2...20 μm . Microstructure of the metal of samples after vacuum annealing with further cooling with the furnace is homogeneous, and it consists of α -phase particles with a thickness of 2...6 μm and a length of up to 20 μm . An increase in the dimensions of the α -phase is noted, which is related to the process of its coagulation. Vacuum annealing at the temperature of 950 °C led to reduction of the number of dispersed particles in the metal structure and growth as a result of coagulation, during slow cooling of the α -phase particles. The quantity of the β -phase in the metal of the high-temperature titanium ($\alpha+\beta$)-alloy VT9 decreases to 15...22 %. Such structural changes may lead to lowering of the alloy strength values and increase in the impact toughness values, which promotes an increase in service properties of parts from VT9 alloy. 19 Ref., 3 Tabl., 8 Fig.

KEYWORDS: titanium alloy, two-phase ($\alpha+\beta$)-alloys, microstructure, vacuum annealing, α -phase, β -phase

ORCID

V.Yu. Білоус — <https://orcid.org/0000-0002-0082-8030>, E.Л. Вржижевський — <https://orcid.org/0000-0001-8651-8510>, Р.В. Селін — <https://orcid.org/0000-0002-2990-1131>, Л.М. Радченко — <https://orcid.org/0009-0008-1097-7137>, С.Л. Антонюк — <https://orcid.org/0000-0001-5237-9030>

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів

АВТОР ДЛІЯ ЛИСТУВАННЯ

V.Yu. Bilous

ІЕЗ ім. С.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: belousvy@gmail.com

РЕКОМЕНДОВАНЕ ЦИТУВАННЯ

V.Yu. Bilous, E.L. Vrzhezhevskiy, R.V. Selin, L.M. Radchenko, S.L. Antoniuk (2026) Вплив термічної обробки на структуру сплава VT9. *Сучасна електрометалургія*, **02**, 57–64. DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2026.02.07>

ГОЛОВНА СТОРІНКА ЖУРНАЛУ

<https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/sem>

Отримано 10.04.2026

Отримано у переглянутому вигляді 11.05.2026

Затверджено до друку 20.05.2026

Оприлюднено 27.05.2026