

ПІДВИЦЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ З ДВОФАЗНИХ ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ

Олексій Федосов

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6269-5288>

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

Вступ

Стратегічним напрямком розвитку авіаційного та ракетно-космічного двигунобудування є розробка та серійне виробництво газотурбінних двигунів (ГТД) нового покоління, з підвищеним ресурсом та надійністю. Одним із шляхів зниження маси літальних апаратів є застосування в їх конструкціях нових перспективних матеріалів, нестандартних конструкторських і технологічних рішень, прогресивного промислового обладнання.

Одними з найбільш відповідних і навантажених деталей ГТД є деталі роторної частини компресора, за якими визначається загальний ресурс двигуна. Збільшення ресурсу двигуна безпосередньо пов'язано з можливістю ремонту основних вузлів і деталей. Деякі деталі, наприклад, барабани компресора, мають зварну конструкцію. При створенні таких конструкцій велику увагу необхідно приділити способам з'єднання їх елементів між собою. Основною вимогою, що пред'являється до процесу з'єднання заготовок, є забезпечення високої міцності та надійності без втрати стійкості з'єднаних заготовок [1, 2].

Однак відомо, що двофазні титанові сплави є обмежено зварюваними. Вплив термічного циклу поширених методів зварювання плавленням, таких як аргонодугове (АДЗ) та електронно-променево зварювання (ЕПЗ), призводить до значних структурних змін та зниження механічних властивостей зварних з'єднань. Для забезпечення надійної роботи деталей протягом ресурсу потрібно збільшення запасу міцності зварних з'єднань [3, 4].

МЕТА ТА ЗАДАЧІ

Мета роботи – забезпечення необхідного рівня механічних властивостей зварних з'єднань авіаційних та ракетно-космічних деталей із складнолегованих двофазних титанових сплавів. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

– проаналізувати механізми формування структури для

забезпечення необхідного рівня механічних властивостей зварних з'єднань з титанових сплавів;

– дослідити вплив зварювання плавленням на структуру та механічні властивості складнолегованих титанових сплавів.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Об'єктом досліджень є зварні з'єднання з складнолегованого високоміцного титанового сплаву ВТЗ-1. Зразки виготовляли з прутків, поковок та смуг. Зварні з'єднання виконували із застосуванням різних методів зварювання: електронним променем, аргонною дугою.

Проводився аналіз поверхні руйнування зразків після механічних випробувань та оцінювалась достовірність експериментальних результатів. Апробацію результатів дослідження проводили в лабораторних умовах. При дослідженні зварних з'єднань з високоміцних сплавів були використані такі методи:

– металографічний метод. Отримані зразки розрізали вздовж осі на сегменти. З боку перетину розрізу готувалися шліфи для металографічних досліджень;

– методи вимірювання мікротвердості. Для виміру мікротвердості основного металу і зони термічного впливу, виготовляли поперечні мікрошліфи, що піддавалися механічному поліруванню;

– механічні випробування на розтяг та ударну в'язкість.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

При аналізі хімічного складу дослідних зразків з різною вихідною структурою, виготовлених із прутків, поковок, встановлено, що вміст легуючих елементів усіх дослідних зразків відповідають вимогам нормативної документації. Аналіз механічних властивостей дослідних зразків із різною вихідною структурою показав, що значення межі міцності та відносного подовження відповідають вимогам нормативної документації.

Таким чином, хімічний склад, мікроструктура та механічні властивості дослідних зразків, виготовлених з прутків, поковок та отриманих прокаткою та порізкою смуг відповідають вимогам, що пред'являються до основного матеріалу деталей. На цій підставі дослідні зразки були використані для вивчення впливу процесів зварювання на механічні властивості зварних з'єднань зі сплаву ВТЗ-1 (табл. 1).

З вимірів твердості визначено межі зони термічного впливу (ЗТВ). Зона термічного впливу умовно розташована між зварним швом (ділянка з підвищеною твердістю) та основним металом

(ділянка зі зниженою твердістю). При цьому встановлено такі значення протяжності ЗТВ від 1 до 2 мм при ЕПЗ, та 4-6 мм при АДЗ.

У зварних швах виконаних методом ЕПЗ, також як і при зварюванні методом АДЗ утворилися великі первинні β -зерна розміром до 300 мкм із пластинчастою внутрішньозеренною структурою.

Таблиця 1 – Механічні властивості зварних з'єднань зі сплаву ВТ3-1

Вид зварювання	Межа міцності σ_b , МПа	Ударна в'язкість КСУ, Дж/см ²
Аргонодугове зварювання	1000-1040	47-50
	1080-1110	25-50
Електронно-променеве зварювання	1090-1110	33-38
	1170-1250	15-25

Внутрішньозеренна структура була пересиченим розчином α -фази з β -стабілізуючими елементами і за типом та розмірами не відповідала структурі основного металу. Незалежно від типу вихідних структур зварних з'єднань – рівновісної, бімодальної, чи їх комбінації, типи структур, отримані у зварних швах подібні.

Зміна розмірів структурних складових, а також фазові перетворення зі зміною типу структури від двофазної рівновісної до пластинчастої крупнозернистої структури стала однією з основних причин незначної зміни механічних властивостей.

Результати досліджень показали, що в різних ділянках зварної ванни, виконаної методом ЕПЗ, спостерігається розкид значень вмісту основних легуючих елементів. Так, мінімальний вміст алюмінію у шві становить 5%, максимальний вміст у ЗТВ становить 6%. Для молібдену мінімальний вміст у шві становить 2,1%, максимальний вміст у ЗТВ становить 3%. При аналізі результатів вимірів встановлено, що вміст легуючих елементів знаходиться в межах технічних вимог на сплав ВТ3-1.

Аналіз результатів показує, що мікротвердість зварних швів, основного металу і ЗТВ, незалежно від способу зварювання і режиму термообробки, за винятком ЗТВ на зразках, виконаних АДЗ, коливається приблизно в однакових межах, (3040-4120 МПа) що на перший погляд, пояснюється неоднорідністю структури. Мікротвердість ЗТВ на зразках, виконаних ЕПЗ, значно вище (4120-4920 МПа), що пов'язано, вочевидь, з високими швидкостями охолодження (табл. 2).

ЗТВ має крупнозернисту будову з виділенням всередині зерен голочок або пластинок, форма, розміри і орієнтація яких змінюється в залежності від режиму термообробки.

Таблиця 2 – Мікротвердість зварних з'єднань МПа

Режим зміцнення	Вид зварювання	Шов, МПа	ЗТВ, МПа	Основний метал, МПа
Відпал	ЕПЗ	3520-3800	3650-4120	3650-4120
	ЕПЗ з присадкою	3380-3650	3650-3800	3380-3800
	АДЗ з присадкою	3260-4120	3380-4120	3150-4120
Гартування	ЕПЗ	3520-3960	4120-4920	3520-3800
	ЕПЗ з присадкою	3650-3800	4310-4920	3800-3960
	АДЗ з присадкою	3040-3960	3520-4120	3380-3960
	АДЗ	3380-3800	3260-3800	3380-3800

На підставі проведених досліджень встановлено наступні результати:

- структура та властивості вихідного матеріалу зразків ідентичні основному матеріалу деталей;

- у зварних швах виконаних методом ЕПЗ, утворилися великі первинні β -зерна розміром до 300 мкм з пластинчастою внутрішньозеренною структурою;

- у наволошовій зоні та прилеглих до неї ділянках ЗТВ мікроструктура являє собою α' -фазу, що має пластинчато-гольчасту будову. Товщина пластин α -фази у зоні термічного впливу була дещо меншою, що може свідчити про менш тривале знаходження матеріалу цієї зони при температурах верхньої частини ($\alpha+\beta$) зони порівняно з матеріалом шва;

- при віддаленні від зварного шва максимальні температури падали, і мікроструктура поверталася до бімодального типу, тобто тут температура не перевищувала температуру α -перетворення, та залишилися частини первинної α -фази;

- для зварних з'єднань ЕПЗ матеріалу ВТЗ-1 характерні зміни типу та розмірів структурних складових від двофазної рівноважної до пластинчастої крупнозернистої структури. Цей фактор, а також пластинчаста будова α' -фази визначили високу міцність і низьку пластичність ділянок з цією структурою і стали однією з основних причин зміни механічних властивостей;

- механічні властивості зварних з'єднань виконаних ЕПЗ для різних комбінацій структур склали до 1000-1100 МПа;

- вміст основних легуючих елементів у різних зонах зварних з'єднань, виконаних ЕПЗ, знаходиться в допустимих межах для даного сплаву. Протяжність ЗТВ при цьому коливається в межах 1-4 мм.

ВИСНОВКИ

На підставі досліджень структуроутворення зварних з'єднань з комбінаціями різних вихідних структур, виконаних методами зварювання плавленням (АДЗ та ЕПЗ) встановлено, що в зварних швах формується нерегламентована, крупнозерниста пластинчаста структура, при цьому розмір первинної β -фази становить в межах 180...300 мкм. При цьому розміри зони термічного впливу для аргонодугового зварювання становить 5 мм, для електронно-променевого зварювання - 2 мм.

Дослідженнями механічних властивостей та характеру руйнування зварних з'єднань встановлено, що структурні зміни при зварюванні плавленням призводять до зниження механічних властивостей, при цьому міцність отриманих зварних з'єднань становить не більше 80-85% по відношенню до міцності основного металу. Відсутність структурних змін при зварюванні електронним променем призводить до збереження рівня механічних властивостей, при цьому міцність отриманих зварних з'єднань становить більше 90% по відношенню до основного металу. Дослідженнями характеру руйнування встановлено, що механізми руйнування для різних видів зварювання мали різні характери, що пов'язано з типом та розмірами сформованої мікроструктури у зварному шві.

ПОСИЛАННЯ

1. Fedosov, O., & Karpovych, O. (2023). Determining the technological parameters of electron-beam welding of high-strength titanium alloys. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(12 (125)), 47–53. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.287679>.

2. Li, F. S., Wu, L. H., Zhao, H. B., Xue, P., Ni, D. R., Xiao, B. L., Ma, Z. Y. (2023). Realizing deep penetration and superior mechanical properties in a titanium alloy thick plate joint via vacuum laser beam welding. *Journal of Materials Research and Technology*, 26, 2254–2264. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.08.059>.

3. Kabasakaloglu, T. S., & Erdogan, M. (2020). Characterisation of figure-eight shaped oscillation laser welding behaviour of 5083 aluminium alloy. *Science and Technology of Welding and Joining*, 25 (7), 609–616. <https://doi.org/10.1080/13621718.2020.1794652>.

4. Zhao, X., Lu, X., Wang, K., & He, F. (2023). Microstructure and mechanical properties of electron beam welded TC4 titanium alloy structure with backing plate. *Materials Today Communications*, 35, 106160. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.106160>.