

Міністерство освіти і науки України
Запорізький національний технічний університет

СЕЛІВЕРСТОВ ОЛЕКСАНДР ГЕОРГІЙОВИЧ



УДК: 669.295:621.791

ПІДВИЩЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ РОТОРНИХ
ДЕТАЛЕЙ ГТД З ТИТАНОВОГО СПЛАВУ ВТ8

05.02.01 – Матеріалознавство

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата
технічних наук

Запоріжжя – 2016

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Запорізькому національному технічному університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор **Овчинников Олександр Володимирович**, Запорізький національний технічний університет, завідувач кафедри „Обладнання та технологія зварювального виробництва”, директор НДЦ „Титан Запоріжжя”.

Офіційні опоненти:

Лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки, доктор технічних наук, професор **Міщенко Валерій Григорович**, Запорізький національний університет, завідувач кафедри „Прикладна фізика”.

доктор технічних наук, професор **Вахрушева Віра Сергіївна**, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, професор кафедри „Матеріалознавство та обробка матеріалів”.

Захист відбудеться « 04 » 10 2016 р. о 13³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д17.052.01 у Запорізькому національному технічному університеті за адресою: 69063, м. Запоріжжя, вул. Жуковського, 64, ауд. 153.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Запорізького національного технічного університету за адресою: 69063, м. Запоріжжя, вул. Жуковського, 64, та на сайті університету у розділі „Наука” - „Спец. вчена рада”.

Автореферат розісланий « 02 » 09 2016 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради
Д 17.052.01



О.А. Мітяєв

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Стратегічним напрямком розвитку авіаційного двигунобудування є розробка та серійне виробництво газотурбінних двигунів (ГТД) нового покоління, з підвищеним ресурсом, надійністю, тягоозброєністю та економічністю. Підвищення експлуатаційних характеристик авіаційних ГТД та забезпечення потрібних цінових параметрів виробу неможливо без використання нових перспективних матеріалів, нестандартних конструкторських та технологічних рішень, прогресивного промислового обладнання.

Одними з найбільш відповідальних та навантажених деталей ГТД є деталі роторної частини компресора, за якими, в тому числі, визначається загальний ресурс двигуна. Продовження ресурсу двигуна безпосередньо пов'язано з можливістю ремонту основних вузлів і деталей.

Деякі деталі, наприклад, барабани компресора мають зварну конструкцію. Для виготовлення відповідальних роторних деталей компресора використовують складнолеговані двофазні титанові сплави BT8, BT9, BT3-1 та ін. Однак відомо, що двофазні титанові сплави є обмежено зварюваними. Вплив термічного циклу розповсюджених методів зварювання плавленням, таких як аргонодугове (АДЗ) та електронно-променеве (ЕПЗ) зварювання, призводить до значних структурних змін та зниження механічних властивостей зварних з'єднань. Забезпечення надійної роботи деталей упродовж ресурсу потребує підвищення запасу міцності зварних з'єднань.

Як показує світовий досвід (А. Mateo, Т. Ma, L. Hong, М. Avinash, М. Corzo), підвищення механічних властивостей можливо досягти за рахунок отримання структури в зоні зварного шва та зоні термічного впливу (ЗТВ) з мінімальною різницею по відношенню до основного металу (ОМ). Для цього необхідно зменшити термін перебування металу шва при температурі вище температури поліморфного перетворення, що можливо досягти зварюванням тертям (ЗТ). Існуючі дослідження переважно відносяться до закордонних титанових сплавів, котрі відрізняються від вітчизняних як хімічним, так і структурним станом.

Вибір технології зварювання пов'язаний з необхідністю індивідуального підходу з урахуванням складу та структурного стану сплавів, що і визначає кінцеві властивості зварних з'єднань. Окремим питанням є зварювання сплавів у різному структурному стані, що суттєво впливає на властивості зварних з'єднань. Для забезпечення потрібних механічних властивостей відповідальних деталей авіаційних ГТД, котрі виготовляються в різному

структурному стані, актуальним напрямком є комплексні дослідження, пов'язані з відпрацюванням технології різних видів зварювання, з урахуванням закономірностей впливу структурного стану сплавів на механічні та службові властивості зварних з'єднань.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Основні етапи дисертаційної роботи виконані відповідно з планами науково-дослідних робіт Запорізького національного технічного університету (ЗНТУ) і акціонерного товариства «Мотор Січ» за темами: ГД 2829 «Дослідження і розробка методики ремонту деталей ГТД із складнолегованих титанових сплавів із застосуванням наноструктурованих присадних матеріалів» (№ держреєстрації 0109U008904, 2009-2013 рр.); ГД 2134 «Розробка методів ремонту зварюванням роторних монодеталей ГТД із жароміцних титанових сплавів та визначення напружено-деформованого стану зон ремонту» (№ держреєстрації 0114U002450, 2013 рр.); ГД 1219 «Дослідження зварних з'єднань сплавів ВТ3-1, ВТ8, ВТ9, ВТ6, виконаних зварюванням тертям» (2009-2014 рр.); ГД 2112 «Визначення зон ремонту деталей ГТД із жароміцних титанових сплавів при використанні різних методів зварювання» (2012-2014 рр.).

Мета і задачі досліджень. Мета роботи – забезпечення необхідного рівня механічних властивостей зварних з'єднань авіаційних деталей з складнолегованих двофазних титанових сплавів в різному структурному стані.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити наступні задачі:

- проаналізувати механізми формування структури для забезпечення необхідного рівня механічних властивостей зварних з'єднань титанових сплавів;
- дослідити вплив зварювання плавленням на структуру та механічні властивості складнолегованих двофазних титанових сплавів;
- дослідити вплив зварювання тертям на структуру та механічні властивості складнолегованих двофазних титанових сплавів;
- встановити механізми впливу вихідної структури на структуру зварних з'єднань та механізми руйнування при статичному та циклічному навантаженнях, при кімнатній та підвищеній температурах;
- на основі експериментальних даних, отриманих на модельних зразках, визначити напружено-деформований стан (НДС) деталей, при виготовленні та ремонті методами зварювання;
- виконати промислове впровадження з реалізацією розроблених теоретичних та практичних підходів в виробничих умовах.

Об'єкт досліджень – процеси структуроутворення та формування механічних властивостей зварних з'єднань титанового сплаву BT8, який використовується в роторних деталях ГТД.

Предмет досліджень – закономірності формування структури і механічних властивостей зварних з'єднань складнолегованого двофазного титанового сплаву BT8.

Методи досліджень. Хімічний склад сплавів визначали рентгеноспектральним і хімічним методами, структурних складових – енергодисперсійним рентгеноспектральним методом. Металографічні дослідження структури та вивчення фрактограм поверхонь руйнування проводили з використанням оптичного, растрового та просвічувального електронного мікроскопів.

Механічні властивості визначали за стандартними методиками при статичних та знакозмінних навантаженнях, також визначали жароміцність. Дослідження виконувались на приладах та обладнанні, які пройшли метрологічний контроль. Моделювання напружено-деформованого стану деталей виконано з використанням спеціальних ліцензованих програм професійного класу ANSYS.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Розширено уявлення про закономірності впливу вихідних типів структури сплаву BT8 на формування структури зварного шва при зварюванні плавленням. Встановлено, що при зварюванні плавленням, незважаючи на вихідний тип структури – бімодальний та рівновісний, в зварному шві формується нерегламентована, крупнозерниста пластинчаста структура. При цьому розмір первинної β -фази складає $\sim 170\ldots 320$ мкм, а α -пластин $\sim 20\ldots 40$ мкм.

2. Розширено уявлення про закономірності впливу вихідних типів структури на механічні властивості зварних з'єднань складнолегованого двофазного титанового сплаву BT8 із застосуванням різних видів зварювання. Встановлено, що при зварюванні плавленням σ_b не перебільшує 0,87 від σ_b основного металу, внаслідок отримання нерегламентованої структури в зварному шві та розмірів зони термічного впливу для АДЗ до 5...7 мм, для ЕПЗ до 3...4 мм.

При зварюванні тертям зберігається регламентований тип структури в зоні шва та незалежно від вихідного типу структури, в зварному шві формується рівновісний тип структури, за рахунок дії термомеханічного впливу. Встановлено, що при зварюванні тертям розмір структурних складових в зварному шві до 10 разів менше, ніж при зварюванні плавленням і становить 2...4 мкм, також розмір зони термічного впливу не перевищує

2 мм. При цьому забезпечується $\sigma_{\text{в}}$ зварного шва на рівні 0,95 $\sigma_{\text{в}}$ основного металу.

3. Вперше встановлено закономірності формування структури при зварюванні тертям в зварних швах сплаву ВТ8 з різними вихідними типами структур. Доведено, що в зварних швах з вихідною рівновісною структурою зберігається тип структури за умов виконання зварювання при температурі не вище α - β перетворення. Встановлено, що при зварюванні тертям практично не змінюються розміри α - та β -фаз. Структурні зміни відбуваються в межах первинного β -зерна, що виражається в підвищенні мікротвердості в результаті утворення внутризеренної гартівної структури з α' - фазою та змінням параметрів ґратки з $a = 0,29223$ нм та $c = 0,47447$ нм до зварювання на $a = 0,29233$ нм та $c = 0,47471$ нм після зварювання.

4. Вперше встановлені закономірності розподілення легувальних елементів в зварному шві сплаву ВТ8 при зварюванні тертям. Встановлено, що перерозподілення легувальних елементів відбувається внаслідок термомеханічного впливу в процесі зварювання тертям при температурі початку α - β перетворення, але нижче кінця цього температурного інтервалу. В межах β -зерен йде перерозподілення легувальних елементів та зникає концентраційна неоднорідність легуючих елементів між α та β складовими β -зерна, котра по Al складала більше 2-х разів та по Мо досягала 7 разів. При цьому між рівновісними зернами α - та β -фаз дифузія елементів практично відсутня, що забезпечує збереження вихідної рівновісної структури.

Практичне значення отриманих результатів.

Встановлено режими зварювання для формування структури, що забезпечує незалежно від вихідного структурного стану механічні властивості при зварюванні плавленням $\sigma_{\text{в св.}} = 0,85 \sigma_{\text{в ОМ}}$, при зварюванні тертям $\sigma_{\text{в св.}} > 0,95 \sigma_{\text{в ОМ}}$.

Отримані зварні з'єднання методом зварювання тертям із сплаву ВТ8, з підвищеними в середньому до 20% міцністю, відносним подовженням по відношенню до з'єднань, виконаних зварюванням плавленням.

Розроблено методику побудови модельних зразків для розрахункових моделей барабана зі сплаву ВТ8 з урахуванням розмірів та механічних властивостей зварних з'єднань, виконаних різними методами.

Розроблено технологію відновлення барабана та моноколеса компресора методами зварювання. Технологія реалізована на АТ «Мотор Січ». Працездатність деталей, відновлених за даною технологією, підтверджена в експлуатації з очікуваним економічним ефектом 223656,25 грн.

Особистий внесок здобувача. В дисертаційній роботі основні положення, наукові результати і висновки отримані автором самостійно.

Дослідження впливу різних методів зварювання на структуру, механічні властивості жароміцних двофазних титанових сплавів виконані автором та підтверджені публікаціями [1, 3, 9].

Здобувачем сформульовано та обґрунтовано методологію проведення експериментів [6, 8], які були виконані за його участю. Досліджено вплив вихідної структури основного металу, а також форми зварного з'єднання на структуру та механічні властивості отриманих зварних з'єднань [4, 5]. Автором роботи проведено експериментальні дослідження особливостей використання методів зварювання [2, 7] при відновленні деталей авіаційних двигунів.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на XII Міжнародній науковій конференції «Стародубовські читання» (Дніпропетровськ, 2012), на I-III науково-технічних конференціях «Титан-2008: виробництво та використання», «Титан-2010: виробництво та використання» (Запоріжжя, 2008, 2012), III-V Міжнародних науково-технічних конференціях молодих спеціалістів авіадвигунобудівної галузі «Молодь в авіації: нові рішення та передові технології» (Алушта, 2009, 2011), X Міжнародній науково-технічній конференції «Прогресивні технології життєвого циклу авіаційних двигунів та енергетичних установок» (Алушта, 2013), Міжнародній науково-технічній конференції «Теоретические и прикладные проблемы создания авиационных двигателей и энергетических установок» (Запоріжжя, 2014), Ювілейній всеукраїнській науково – технічній конференції, присвяченій 55-річчю кафедри зварювального виробництва НУК ім. Макарова «Проблеми зварювання, споріднених процесів і технологій» (Коблево, 2014), Ювілейній науковій конференції, присвяченій 110-річчю з дня народження д.т.н. Поплавко-Михайлова «Технологии сварки плавлением новых конструкционных материалов» (2014).

Публікації. Основні результати роботи наведено в 9 публікаціях, з яких 2 статті в виданнях з індексом цитування, 3 – у фахових наукових журналах, 1 – у збірниках наукових праць, та 3 – в матеріалах вітчизняних та міжнародних конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з вступу, 5 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та 1 додатку. Загальний обсяг дисертації складає: 131 сторінку основного тексту, список використаних джерел із 111 найменувань на 12 сторінках та 1 додаток на 2 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність дисертаційної роботи, сформульовано мету та задачі досліджень. Показано наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів із зазначенням особистого внеску автора.

В першому розділі проведено аналіз основних властивостей і вимог до титанових сплавів, які використовуються для виготовлення роторних деталей компресора. Проаналізовано умови роботи та навантаження, які діють на роторні деталі компресора та зазначено рівень механічних властивостей основного матеріалу деталей. Показано, що рівень потрібних властивостей деталей знаходиться в залежності від структури матеріалу. Для різних за призначенням деталей – лопаток та дисків потрібна відповідна структура. Також обґрунтовано необхідність використання зварювання при виготовленні та ремонті.

Проведено аналіз методів зварювання та їх вплив на матеріал деталей. Показано, що вплив зварювання на двофазні титанові сплави призводить до зниження рівня механічних властивостей зварних з'єднань. Це пов'язано зі значними структурними змінами, які відбуваються під час зварювання традиційними методами, при цьому головне – це термін знаходження металу при температурі вищій температури поліморфного перетворення. Виходячи з цього, сформульовані обмеження зварюваності двофазних титанових сплавів за рахунок зниження міцності зварних з'єднань.

Розглянуто можливості покращення структури та підвищення рівня механічних властивостей зварних з'єднань двофазних титанових сплавів. Показано, що суттєво зменшити вплив термічного циклу на структуру зварних з'єднань можливо за рахунок використання методів зварювання в твердій фазі, наприклад, зварювання тертям. Огляд сучасних публікацій дозволив встановити, що найбільш поширені дані стосуються зварювання тертям однофазних титанових сплавів і двофазних типу ВТ6. Однак роторні деталі компресора виготовляють зі складнолегованих двофазних титанових сплавів типу ВТ8, ВТ3-1, ВТ9 і інформація про можливість зварювання тертям і рівень міцності зварних з'єднань таких сплавів майже відсутня.

На підставі аналізу відомих досліджень сформульовано основні завдання досліджень, які включають визначення особливостей впливу різних типів вихідних структур, форми зварних з'єднань та методів зварювання на структуру та механічні властивості отриманих зварних з'єднань.

У другому розділі представлено методики і устаткування, які застосовувалися в процесі виконання роботи. Зразки для проведення випробувань механічних властивостей та досліджень структури отримували

методом прокатки прутків на пластини з наступною механічною обробкою до потрібних розмірів.

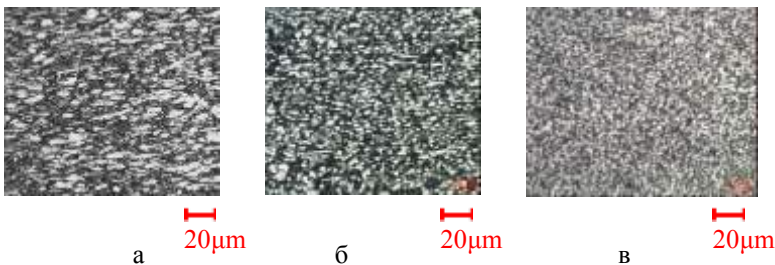
Зварні з'єднання отримували методами зварювання плавленням – аргонодугове на установці У6872-5306, електронно-променеве на установці У6879-5007, твердофазне зварювання тертям на установці МСТ-2.

Структуру зварних з'єднань зразків досліджували із застосуванням мікроскопів «NEOPHOT-32» та «Observer.D1m» фірми Carl Zeiss. Поверхні руйнування досліджували на мікроскопі МСП-2 фірми «ЛОМО».

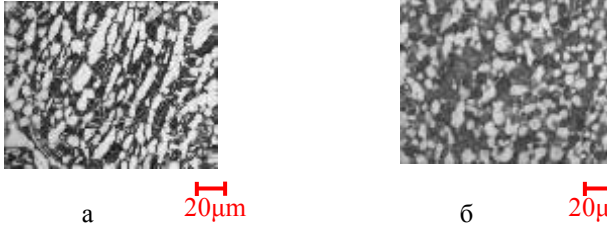
Механічні властивості визначали за стандартними методиками (ГОСТ 6996-66, ГОСТ 25.503.97) на машині INSTRON-8801. Твердість вимірювали на установці ММ7Т фірми «Buehler». Дослідження жароміцності виконували за допомогою універсальної машини «УММ-20» при $T = 350^{\circ}\text{C}$, на базі 100 год. Випробування на втому зразків проводили на електродинамічних вібростендах ВЭДС-200, на базі 2×10^7 циклів. Розрахункові моделі виконували за допомогою програми ANSYS.

У **третьому розділі** приведено результати досліджень впливу різних методів зварювання на структуру та властивості зварних з'єднань при статичних та циклічних навантаженнях та виконано дослідження рівня механічних властивостей, які обмежують застосування різних методів зварювання для деталей ГТД, виготовлених з двофазних титанових сплавів.

Дослідження виконували на зразках із сплаву BT8 у вигляді пластин товщиною 2 мм для зварювання плавленням та прутків $\varnothing 10$ мм для зварювання тертям. Структурний стан зразків відповідав рівновісному (рис. 1) типу вихідної структури, з хімічним складом: Al – 6,4%; Mo – 3,1%, Si – 0,3% та бімодальному типу вихідної структури (рис. 2), з хімічним складом Al – 6,2%; Mo – 2,9%, Si – 0,2%. Рівень механічних властивостей для основного металу з різними вихідними структурами наведено в табл. 1.



а – з прокатаних стрічок; б – з прутків за ОСТ 190006-86; в – з лопаток;
Рисунок 1 – Мікроструктура заготовок рівновісного типу.



а – у вигляді стрічок; б – у вигляді прутків за ОСТ 190197-89;
Рисунок 2 – Мікроструктура заготовок бімодального типу.

Таблиця 1 – Механічні властивості основного металу сплаву ВТ8.

Структура	Механічні властивості			
	σ_B , МПа	δ , %	σ_{100}^{350} , МПа	σ_{-1} , МПа
рівновісна	1170	15	775	784,8
бімодальна	1070	12	785	-

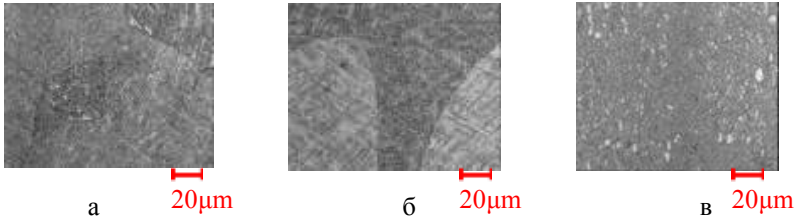
Відповідно атестаційним принципам авіаційних матеріалів оцінювали механічні властивості зварних з'єднань – статичні характеристики за стандартними механічними властивостями, циклічні характеристики визначали через межу витривалості. Випробування зварних з'єднань дозволило встановити (табл. 2), що міцність зварних з'єднань, виконаних зварюванням плавленням значно менше ніж з'єднань, виконаних зварюванням тертям. При цьому, найбільша міцність отримана для комбінації рівновісних вихідних структур, незалежно від методу зварювання.

Таблиця 2 – Механічні властивості зварних з'єднань.

Структура зразків	Метод зварювання	$\sigma_{B\text{ зв.}}$, МПа	$\delta_{\text{ зв.}}$, %
Рівновісна і рівновісна	АДЗ	986,5	7,5
	ЕПЗ	1080,2	8
	ЗТ	1162,0	8
Рівновісна і бімодальна	АДЗ	938,4	6,8
	ЕПЗ	1018,4	8,2
	ЗТ	1120,6	7,5
Бімодальна і бімодальна	АДЗ	930,0	8,5
	ЕПЗ	1020,2	8,8
	ЗТ	1070,0	8,2

З аналізу структур зварних з'єднань встановлено, що в зварних швах, виконаних методами зварювання плавленням, при різних комбінаціях

вихідних структур формується нерегламентована крупнозерниста пластинчаста структура (рис. 3, а, б), при цьому розмір первинної β -фази складає $\sim 170 \dots 320$ мкм, а α -пластин $\sim 20 \dots 40$ мкм. В зварних швах, виконаних методом зварювання тертям, при різних комбінаціях вихідних структур формується рівновісний тип структури (рис. 3, в).

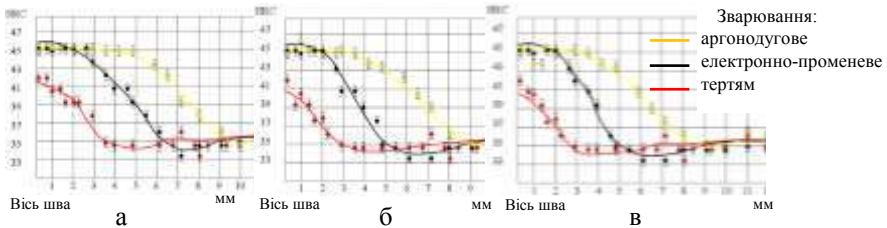


а – аргондугове зварювання; б – електронно-променеве зварювання;
в – зварювання тертям;

Рисунок 3 – Типові структури зварних швів.

Встановлено, що при зварюванні тертям розмір структурних складових в зварному шві до 10 разів менше, ніж при зварюванні плавленням і становить $2 \dots 4$ мкм.

Визначення розмірів зони термічного впливу проводили за рахунок вимірів твердості та дослідженням структурних змін на мікрошліфах. При цьому встановлено розміри зони термічного впливу (рис. 4).



а – рівновісна структура; б – бімодальна структура;
в – рівновісна і бімодальна структура;

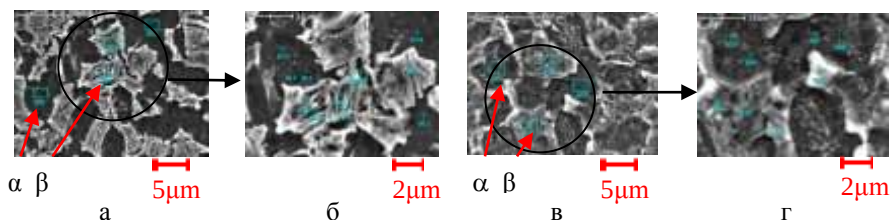
Рисунок 4 – Результати вимірів твердості в зварних з'єднаннях.

Так розмір зони термічного впливу для аргондугового зварювання становить $5 \dots 7$ мм, для електронно-променевого зварювання – $2 \dots 4$ мм, для зварювання тертям не більш 2 мм.

Встановлено, що межа міцності σ_b зварних з'єднань залежить від структури, яка отримується при зварюванні. Так, зміна типу структури та формування нерегламентованої крупнозернистої пластинчастої структури, а

також значні розміри зони термічного впливу при зварюванні плавленням призводять до зниження механічних властивостей зварних з'єднань. Навпаки, незначні структурні зміни при зварюванні тертям, зі збереженням типа вихідної структури та мінімальні розміри зони термічного впливу призводять до підвищення рівня механічних властивостей зварних з'єднань.

Для підтвердження відсутності значних змін структури при зварюванні тертям виконано дослідження на растровому електронному мікроскопі методом енергодисперсійного аналізу (рис. 5). При цьому, виконано аналіз хімічного складу як в α - та β -фазах (табл. 3), так і в структурних складових β -фази (табл. 4).



а, б – основний метал; в, г – зварний шов

Рисунок 5 – Визначення вмісту легувальних елементів в різних зонах зварного з'єднання при використанні зварювання тертям.

Таблиця 3 – Вміст основних легувальних елементів в α - та β -фазах (див. рис. 5, а, б).

№ точки	Вміст елементів, %							
	Al		Si		Ti		Mo	
	шов	осн.мет	шов	осн.мет	шов	осн.мет	шов	осн.мет
001	3,75	6,11	0,28	0,30	89,93	93,56	6,04	-
002	6,01	5,81	0,36	0,36	93,63	93,83	-	-
003	3,55	2,94	0,30	0,32	90,72	90,76	5,43	5,98
004	5,85	2,67	0,39	0,30	93,76	92,11	-	4,92

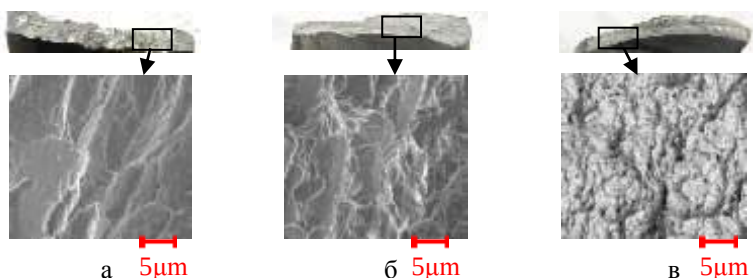
Аналіз результатів досліджень рентгеноструктурної, просвічуючої та рентгеноспектральної мікроскопії дозволив встановити, що перерозподіл легувальних елементів виконується внаслідок термомеханічного впливу в процесі зварювання тертям при температурах початку α - β перетворення, але нижче кінця цього температурного інтервалу. В межах β -зерен йде перерозподіл легувальних елементів та зникає концентраційна неоднорідність легувальних елементів між α та β складовими β -зерна, котра по Al складала більше 2-х разів та по Mo досягала 7 разів.

Таблиця 4 – Вміст основних легувальних елементів в складових β -зерен (див. рис 5, в, г).

№ точки	Вміст елементів, %							
	Al		Si		Ti		Mo	
	шов	осн.мет	шов	осн.мет	шов	осн.мет	шов	осн.мет
005	6,05	5,94	0,24	0,20	93,71	93,86	-	-
006	5,88	6,41	0,34	0,38	93,78	93,21	-	-
007	5,91	5,86	0,21	0,22	93,88	93,92	-	-
008	6,16	3,71	0,38	0,36	93,46	90,46	-	5,47
009	2,67	3,13	0,31	0,37	91,15	90,02	5,87	6,48
010	3,42	3,39	0,40	0,29	90,03	90,93	6,15	5,39
011	3,39	6,1	0,34	0,40	89,94	93,50	6,33	-
012	2,63	3,7	0,29	0,32	91,42	90,14	5,66	5,84

В межах β -фази формується α' -фаза, з параметрами $a = 0,29223$ нм та $c = 0,47447$ нм, при $a = 0,29233$ нм та $c = 0,47471$ нм – для кристалевої ґратки первинного β -зерна. При цьому між рівновісними зернами α - та β -фаз дифузія елементів практично відсутня.

Структурні перетворення вплинули на характер руйнування зварних з'єднань. Показано, що при зварюванні тертям руйнування має пластичний характер, а при зварюванні плавленням руйнування мало крихкий характер (рис. 6).



а – аргондугове зварювання; б – електронно-променеве зварювання; в – зварювання тертям;

Рисунок 6 – Типові поверхні руйнування зварних зразків.

Дослідженнями жароміцності зварних з'єднань встановлено, що жароміцність σ_{100}^{350} знаходилась в діапазоні 785...930 МПа. Однак, для основного металу $\sigma_{100}^{350} = 775$ МПа. Отже, рівень жароміцності для всіх методів зварювання відповідає основному металу.

В зв'язку з тим, що деталі авіаційних двигунів працюють в умовах динамічних навантажень, виконано дослідження межі витривалості.

Встановлено, що найбільшу межу витривалості отримано на зразках, виконаних методом зварювання тертям: $\sigma_{-1} = 725,94$ МПа, найменшу на зразках, виконаних методом аргондугового зварювання: $\sigma_{-1} = 553,21$ МПа, для електронно-променевого зварювання межа витривалості становила: $\sigma_{-1} = 578,35$ МПа. Це пов'язано зі структурними змінами, які виникають внаслідок зварювання. Так, зміна типу структури та формування нерегламентованої крупнозернистої пластинчастої структури, а також найбільші розміри зони термічного впливу при аргондуговому зварюванні призводять до зниження σ_{-1} зварних з'єднань. Навпаки, незначні структурні зміни зі збереженням типу вихідної структури та найменшими розмірами зони термічного впливу при зварюванні тертям призводять до збереження σ_{-1} зварних з'єднань на рівні основного металу (див. табл. 1).

У зв'язку з тим, що поширені деталі ГТД мають тонкостінну оболонкову конструкцію, для встановлення впливу форми зварних з'єднань на структуру та властивості виконано дослідження на зразках оболонкової форми (рис. 7). Результати випробувань механічних властивостей зразків оболонкової форми, наведено в табл. 5.



а



б



в

а – аргондугове зварювання; б – електронно-променеве зварювання;
в – зварювання тертям;

Рисунок 7 – Типові зварні зразки оболонкової форми.

Таблиця 5 – Механічні властивості зварних з'єднань оболонкової форми.

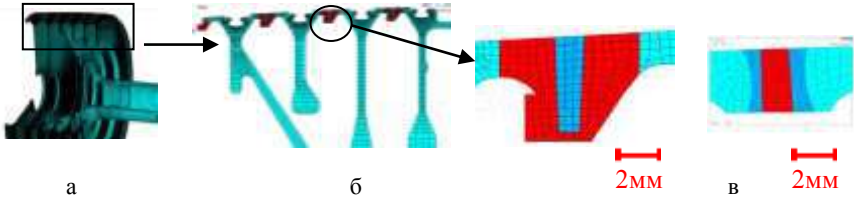
Метод зварювання	Механічні властивості	
	σ_b св., МПа	δ св., %
АДЗ	979,9	9
ЕПЗ	1020,3	9
ЗТ	1151,4	8

При цьому встановлено, що в зварних з'єднаннях оболонкової форми отримано аналогічні структури та механічні властивості на рівні, аналогічно суцільним зразкам (див. табл. 2).

Таким чином, встановлено, що при ЗТ забезпечується межа міцності σ_b на рівні σ_b основного металу за рахунок збереження типу структури, зменшення розмірів структурних складових в шві, а також зменшення розмірів зони термічного впливу до 2 мм. Для зварювання плавленням σ_b не перебільшує 0,87 від σ_b основного металу, що пов'язано з

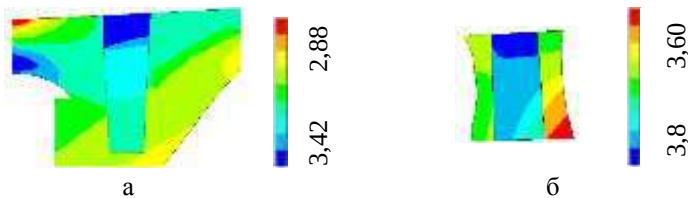
отриманням нерегламентованої структури в шві та збільшенням розмірів зони термічного впливу для АДЗ до 5...7 мм, для ЕПЗ до 3...4 мм.

У **четвертому розділі** наведено результати досліджень по вибору відповідних методів зварювання для деталей ГТД з двофазних титанових сплавів. Побудовано твердотільні моделі барабана компресора. Розрахунки напружено-деформованого стану барабана виконували методом кінцевих елементів (рис. 8).



а – модель барабана; б – модель фрагмента барабана; в – модель швів;
Рисунок 8 – Схема розбивки на кінцеві елементи.

Проведено розрахунки полів розподілу напружень та переміщень барабана компресора із застосуванням різних методів зварювання. Визначено розподіл коефіцієнтів запасу міцності (рис. 9). Збільшення коефіцієнту запасу міцності для зварювання тертям відбувається за рахунок підвищення рівня механічних властивостей зварних з'єднань, та зменшення розмірів шва, та зони термічного впливу.



а – шов електронно-променевого зварювання;
б – шов зварювання тертям;

Рисунок 9 – Розподіл коефіцієнтів запасу міцності.

Розрахунковим методом визначено зони оптимального розташування зварних швів при виготовленні та ремонті деталей. Встановлено, що за рахунок зменшення розмірів зони зварювання та підвищення рівня механічних властивостей можливо зменшення маси деталей до 10%. Таким чином, теоретично обгрунтовано та практично доведено, що мінімальний вплив зварювання тертям на структуру та розміри зони зварювання

призводить до підвищення рівня механічних властивостей та збільшення коефіцієнта запасу міцності, порівняно з традиційними методами зварювання плавленням.

У п'ятому розділі представлено результати апробації запропонованої методики по вибору методу зварювання на натурних деталях в умовах АТ «Мотор Січ» на прикладі моноколеса компресора. На моноколесах компресора упродовж експлуатації виникають різні дефекти (рис. 10).

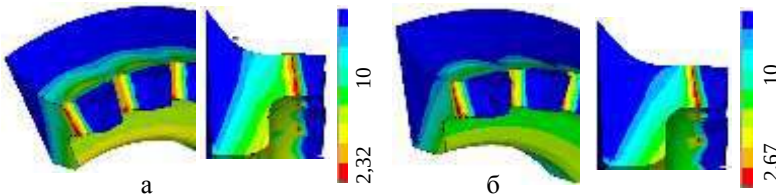


а – контактне зношування зуба; б – вирид зуба;

Рисунок 10 – Дефекти моноколіс компресора.

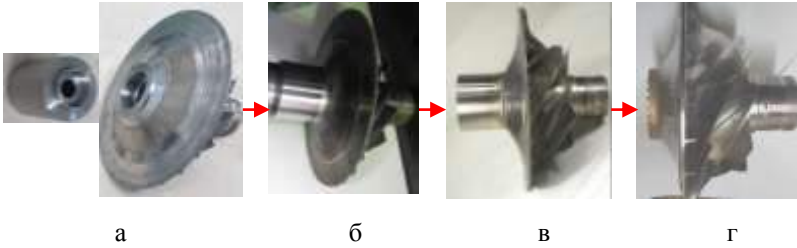
Запропоновано виконувати відновлення методом видалення дефектної частки та приварювання вставки. Для виконання відновлення вибрано два методи зварювання – електронно-променеве та зварювання тертям. Пошук оптимального місця розташування зварних швів виконували розрахунковим методом.

Побудовано твердотільні моделі НДС моноколеса компресора. Розрахунки НДС моноколеса компресора виконували методом кінцевих елементів. Проведено розрахунки полів розподілу напружень та переміщень в зоні відновлення із застосуванням різних методів зварювання. Визначено коефіцієнти запасу міцності (рис. 11). На підставі розрахунків встановлено зони ремонту моноколеса компресора методом приварювання вставки та розроблено технологію ремонту (рис. 12).



а – електронно-променеве зварювання; б – зварювання тертям;

Рисунок 11 – Розподіл коефіцієнтів запасу міцності.



а – складання; б – зварювання; в – термічна обробка; г – механічна обробка;

Рисунок 12 – Основні етапи ремонту моноколеса ЦБК.

Таким чином, доведено ефективність запропонованого підходу по вибору методу зварювання на натурних деталях на прикладі моноколеса компресора.

Запропонований підхід був застосований для усунення дефектів на багатьох деталях, які раніше не ремонтувалися. При цьому, розроблена технологія дозволяє як підвищити властивості в зоні шва, так і знизити вагу деталей.

Перспективність застосування розробленої технології, особливо для авіаційних деталей, підтверджено актом впровадження наукових результатів дисертаційної роботи на АТ «Мотор Січ». Очікуваний економічний ефект від впровадження складає 223656,25 грн.

ВИСНОВКИ

1. Проаналізовано вітчизняний і світовий досвід використання різних методів зварювання для виготовлення та відновлення відповідальних деталей авіаційних двигунів з двофазних титанових сплавів. При зварюванні цих сплавів існує проблема забезпечення потрібних механічних властивостей зварних з'єднань. Вона пов'язана зі структурними змінами в зварному шві внаслідок термічного впливу. Показано, що вирішення цієї задачі лежить в площині застосування твердофазних методів зварювання. Актуальною задачею є проведення досліджень в напрямку підвищення механічних властивостей шляхом формування потрібної структури в зварних з'єднаннях.

2. На підставі досліджень структуроутворення зварних з'єднань з комбінаціями різних вихідних структур, виконаних методами зварювання плавленням встановлено, що в зварних швах формується нерегламентована, крупнозерниста пластинчаста структура, при цьому розмір первинної β -фази складає $\sim 170...320$ мкм. При цьому розмір зони термічного впливу для аргонодугового зварювання становить $5...7$ мм, для електронно-променевого зварювання – $2...4$ мм.

3. На підставі результатів досліджень мікроструктури, рентгеноспектрального аналізу, растрової та просвічуючої мікроскопії зварних з'єднань, отриманих методом зварювання тертям встановлено, що зварювання тертям виконується в твердій фазі, в інтервалі температур α - β перетворення, що дозволяє зберегти вихідний тип структури. При цьому не змінюється внутрізеренна структура, а усі зміни відбуваються в межах β -зерна. Підвищення мікротвердості відбувалося в результаті утворення гартівної структури з α' -фазою, зі зміненням параметрів ґратки (з $a = 0,29223$ нм та $c = 0,47447$ нм до зварювання на $a = 0,29233$ нм та $c = 0,47471$ нм після зварювання). Для всіх типів вихідних структур, в зварних швах формується рівновісний тип структури, при цьому розмір структурних складових до 10 разів менший ніж при зварюванні плавленням і дорівнює 20...40 мкм, а розмір зони термічного впливу становить до 3 мм.

4. 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 складає не більше 85% по відношенню до міцності основного металу. Відсутність суттєвих структурних змін при зварюванні тертям призводить до збереження рівня механічних властивостей, при цьому, міцність отриманих зварних з'єднань складає більш 95% по відношенню до основного металу. Дослідженнями характера руйнування встановлено, що механізми руйнування для різних видів зварювання мали різні характери, що пов'язано з типом та розмірами сформованої мікроструктури в зварному шві. При зварюванні плавленням руйнування проходило за змішаним механізмом квазів'язкого руйнування з наявністю крупних ямок в'язкого руйнування, розмір останніх подібний розмірам β -зерен зварного шва. При зварюванні тертям поверхня руйнування мала в'язкий ямковий характер, схожий на поверхню руйнування основного металу з рівновісною структурою.

5. Проведеними дослідженнями жароміцності встановлено, що рівень жароміцності σ_{100}^{350} для всіх методів зварювання знаходився в діапазоні 785...930 МПа, а для основного металу складав 775 МПа. Отже жароміцність усіх зварних з'єднань знаходиться на рівні основного металу, що відповідає технічним умовам.

6. Проведено дослідження межі витривалості зварних зразків, виконаних різними методами зварювання. Встановлено, що найбільша межа витривалості отримана на зразках, виконаних методом зварювання тертям: $\sigma_{-1}=725,94$ МПа, найменша на зразках, виконаних методом аргонодугового зварювання: $\sigma_{-1}=553,21$ МПа, межа витривалості для електронно-променевого зварювання: $\sigma_{-1}=578,35$ МПа. Це, як і при статичних

випробуваннях, пов'язано з характером структурних змін в зварних з'єднаннях при однакових механізмах руйнування.

7. З метою уточнення впливу масштабного фактору та форми зварних з'єднань на структуру та механічні властивості проведено дослідження зразків з оболонковою конструкцією, які застосовуються в промислових умовах. При цьому встановлено, що механічні властивості знаходяться на рівні, аналогічному як у суцільних зразків.

8. На розроблених моделях деталей проведено порівняльний аналіз розподілу коефіцієнтів запасу міцності. На основі розрахунків і експериментальних досліджень напруженого стану деталей ГТД визначено зони розташування зварних швів на барабані компресора оболонкової форми двигуна ТВ3-117 та колеса центробіжного компресора двигуна АИ-450. Встановлено, що використання зварювання тертям дає можливість зменшити розміри і масу зварних швів на 10%, а також збільшити зони можливого ремонту деталей на 30% у порівнянні з раніше використаними методами.

9. Розроблена технологічна схема виготовлення і відновлення деталей ГТД із застосуванням зварювання тертям дозволяє сформувати потрібний тип структури зварного шва та механічні властивості зварних з'єднань. Впроваджено технологічні процеси відновлення роторних деталей методом приварювання вставки та методом зварювання. Очікуваний економічний ефект від впровадження становить 223656,56 грн.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Влияние параметров режима сварки трением на структуру и механические свойства соединений титанового сплава BT3-1 / А.Г. Селиверстов, Ю.М. Ткаченко, Р. А. Куликовский, В.И. Брагинец, И.В. Зяхор // Автоматическая сварка. – 2013. – №1. – С. 29 – 34.

2. Повышение работоспособности лопаток из титановых сплавов вентилятора авиадвигателя / И.А. Петрик, А.В. Овчинников, Ю.Ф. Басов, В.Г. Шевченко, С.Л. Рягин, А.Г.Селиверстов // Вестник двигателестроения – 2006. – №4. – С. 104 –107.

3. Исследование механических свойств сварных соединений сплава BT3-1, выполненных сваркой трением / А.Г. Селиверстов, И. А. Петрик, Ю.М. Ткаченко, Р.А. Куликовский, А.В. Овчинников // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2011. – №4. – С. 41 – 44.

4. Петрик И.А. Повышение свойств сварных соединений роторных деталей из титановых сплавов / И.А. Петрик, А.Г. Селиверстов, А.В. Овчинников // Авиационно-космическая техника и технология. – 2014. – №8. – С. 25 – 29.

5. Влияние способа сварки на структуру и механические свойства сварных соединений жаропрочных титановых сплавов с различным исходным структурным состоянием / П.Д. Жеманюк, И.А. Петрик, А.В. Овчинников, А.Г. Селиверстов // Сварочное производство. – 2015. – №4. – С. 6 – 11.

6. Исследование структуры сварных соединений спеченных титановых сплавов / А.А. Скребцов, А.В. Овчинников, А.Е. Капустян, И.О. Быков, А.Г. Селиверстов // Строительство, материаловедение, машиностроение: сб. науч. трудов. – Дн-вск., ПГАСА, 2012. – Вып. 64. – С. 403 – 408.

7. Селиверстов А.Г. Оптимизация технологии ремонта лопаток из титановых сплавов вентилятора авиадвигателя / А.Г. Селиверстов, И.А. Петрик, А.В. Овчинников // Титан – 2008: производство и применение: всеукр. науч.-техн. конф., 1-2 окт. 2008 г.: тезисы докл. – Запорожье, 2008. – С. 87 – 89.

8. Исследование структуры механических свойств соединений титановых сплавов, полученных методом порошковой металлургии / А.А. Скребцов, А.Г. Селиверстов, А.В. Овчинников, И.А. Петрик, Е.М. Календо // Титан – 2010: производство и применение: всеукр. науч.-техн. конф., 1-2 дек. 2010 г.: тезисы докл. – Запорожье, 2010. – С. 32 – 34.

9. Селиверстов А.Г. Исследование механических свойств сварных соединений сплава ВТ3-1, выполненных сваркой трением / А.Г. Селиверстов, И.А. Петрик, А.В. Овчинников // Титан – 2012: производство и применение: всеукр. науч.-техн. конф., 4-5 окт. 2012 г.: тезисы докл. – Запорожье, 2012. – С. 40 – 42.

АНОТАЦІЯ

Селіверстов О. Г. Підвищення властивостей зварних з'єднань роторних деталей ГТД з титанового сплаву ВТ8. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.01 – матеріалознавство. – Запорізький національний технічний університет, Запоріжжя, 2016.

Дисертаційна робота присвячена вивченню особливостей формування структури та механічних властивостей зварних з'єднань двофазного титанового сплаву ВТ8 з метою отримання рівномірних з основним металом зварних з'єднань при виготовленні та відновленні роторних деталей ГТД.

Встановлено вплив вихідних структур, методів зварювання, форми швів на структуру та механічні властивості отриманих зварних з'єднань. Показано, що досягти умови рівномірності зварних з'єднань з основним металом можливо за рахунок використання зварювання тертям. Досліджено розподіл полів напружень в роторних деталях ГТД. Встановлено зони розташування

зварних швів. На підставі отриманих даних виконано ремонт відповідальних деталей методами зварювання. Результати роботи впроваджено на АТ «Мотор Січ».

Ключові слова: титанові сплави, зварні з'єднання, структура, механічні властивості, зварювання тертям.

АННОТАЦИЯ

Селиверстов А. Г. Повышение свойств сварных соединений роторных деталей ГТД из титанового сплава BT8. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.01 – материаловедение. – Запорожский национальный технический университет, Запорожье, 2016.

Диссертационная работа посвящена изучению особенностей формирования структуры и механических свойств сварных соединений сложнолегированного титанового сплава BT8 с целью получения равнопрочных с основным металлом сварных соединений при изготовлении и ремонте ответственных деталей ГТД.

Установлено влияние различных исходных структур и методов сварки на структуру и механические свойства полученных сварных соединений. Изучено влияние формы и расположения сварных швов на структуру и механические свойства сварных соединений. Показано, что достичь условия равнопрочности сварных соединений с основным металлом возможно за счет применения сварки трением, при этом возможно уменьшение размеров зоны сварки и снижение веса ответственных деталей. Проведены исследования распределения полей напряжений в ответственных деталях ГТД. На основании сравнения полученных значений напряжений с уровнем прочности ответственных сварных соединений установлены зоны расположения сварных швов. На основании полученных данных выполнен ремонт ответственных деталей методами сварки.

Результаты работы внедрены на АО «Мотор Сич», ожидаемый экономический эффект составляет 223656,25 грн.

Ключевые слова: титановые сплавы, сварные соединения, структура, механические свойства, сварка трением.

ABSTRACT

Oleksander Seliverstov. Properties increasing of welded joints of the BT8 titanium rotor parts for gas-turbine engines. – Manuscript.

PhD thesis in engineering science trained as 05.02.01 – Material science. – Zaporizhzhya National Technical University, 2016.

This thesis work is dedicated to investigate peculiarities of structuring and mechanical properties of two-phase BT8 titanium alloy welded joints in order to create full strength balance of welded joints and core metal in the course of manufacturing and reconditioning repair of gas-turbine engine rotor parts.

It was determined the influence of various initial structures and welding procedures on structure and mechanical properties of created welded joints. It was demonstrated that strength balance of welded joints and core metal can be created due to friction welding. Investigations of stress fields of gas-turbine engine critical parts were performed. Welded joint areas were determined. According to the analysis results, critical parts were overhauled by welding procedures. The results of scientific work were provided at Motor Sich JSC.

Key words: titanium alloys, welded joints, structure, mechanical properties, friction welding.