

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
Кораблебудівний навчально-науковий інститут

Кафедра зварювального виробництва

«Допущений до захисту»
В.о.завідувача кафедри

_____ С.В.Драган

«_____» _____ 2023

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня вищої освіти «магістр»

на тему: **ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ЗВАРЮВАННЯ**
ДИСКІВ СТУПЕНІВ РОТОРА ІЗ СПЛАВІВ ВТ3-1 ТА ВТ-9
КОМПРЕСОРА ГАЗОТУРБІННОГО ДВИГУНА

Виконав: студент 6121м групи


(підпис) **Сичов О.В.**

Керівник роботи:
Професор, к.т.н., професор НУК


Костін О.М.

Миколаїв 2023

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний Університет кораблебудування імені адмірала Макарова
Кораблебудівний навчально науковий інститут

Кафедра Зварювального виробництва

Спеціальність 131 Прикладна механіка

Освітня програма Інжиніринг зварювання та споріднених процесів

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Гарант освітньої програми

С.В.Драган

« ____ » ____ 20 ____ р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ на здобуття ступеня вищої освіти «магістр»

Студенту _____ Сичову Олегу Володимировичу _____
(Прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Дослідження та розробка технології зварювання дисків ступенів ротора із сплавів ВТЗ-1 та ВТ9 компресора газотурбінного двигуна Керівник роботи Костін Олександр Михайлович, професор, к.т.н. Затверджені наказом ректора № ____ від « ____ » ____ 20 ____ року

2. Термін подання роботи: _____

3. Вихідні дані по роботі: Матеріал дисків ступенів ротора компресора низького тиску газотурбінного двигуна з титанових сплавів ВТЗ-1 та ВТ9, товщина зварювання 8,5 мм.

4. Перелік питань, що належать до розробки (найменування розділів)
Аналіз властивостей титанових сплавів. Огляд проблем технологій зварювання титанових сплавів. Методика проведення досліджень якості зварних з'єднань. Дослідження та розробка технології зварювання дисків ступенів ротора із сплавів ВТЗ-1 та ВТ9 компресора КНТ. Вимоги охорони праці при електропроменевому зварюванні. Розрахунок економічного ефекту вибраної технології зварювання.

5. Перелік презентаційних матеріалів

Аналіз властивостей титанових сплавів. Огляд проблем зварювання титану.

Методи контролю якості зварних швів. Аналіз способів зварювання титану.

Досліджувані сплави ВТЗ-1 і ВТ9. Вибір технології та режимів зварювання.

Програма досліджень. Дослідження механічних властивостей. Спектральний аналіз. Дослідження макро- і мікроструктури, мікротвердість. Охорона праці. Оцінка економічного ефекту. Загальні висновки.

6. Консультанти розділів роботи.

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	Костін О.М., професор, к.т.н		
2	Костін О.М., професор, к.т.н		
3	Костін О.М., професор, к.т.н		
4	Костін О.М., професор, к.т.н		
5	Костін О.М., професор, к.т.н		

7. Дата видачі завдання 02.10.2023

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1.	Огляд проблем технології зварювання титанових сплавів в компресорах ГТУ.	22.10.2023	
2.	Методика проведення досліджень якості зварних з'єднань.	29.10.2023	
3.	Дослідження та розробка технології зварювання дисків ступенів ротора із сплавів ВТЗ-1 та ВТ9 компресора ГТУ	12.11.2023	
4.	Охорона праці. Вимоги охорони праці при електро-променевому зварюванні	15.11.2023	
5.	Розрахунок економічного ефекту вибраної технології зварювання на виробництві.	20.11.2023	
6.	Оформлення пояснювальної записки	01.12.2023	
7.	Презентаційні матеріали.	04.12.2023	
8.			
9.			
10.			

Студент


(підпис)

Сичов О.В.

(ПІБ)

Керівник роботи


(підпис)

Костін О.М.

(ПІБ)

АНОТАЦІЯ

Ключові слова: газотурбобудування, титанові сплави, ротор компресора, технологія і режими зварювання, методи контролю якості зварного шву, охорона праці на електронно-променевих зварювальних установках.

Кваліфікаційна робота присвячена огляду проблем зварювання титанових сплавів у газотурбобудуванні при виробництві окремих вузлів газотурбінної установки, зокрема ротору компресора низького тиску при зварюванні дисків барабану із різних титанових сплавів.

Проведено аналіз існуючих способів зварювання; визначено їх основні переваги та недоліки. За результатами аналізу зроблено висновок, що для серійного виробництва газотурбінного двигуна електронно-променеве зварювання у вакуумі є оптимальним варіантом. В роботі описано склад та властивості титанових сплавів BT3-1 + BT9. Визначено технологію та режими електронно-променевого зварювання.

Розроблена комплексна методика на підставі якої проведено дослідження структурних, технологічних та експлуатаційних властивостей зварного з'єднання із сплавів BT3-1 + BT9.

Визначено комплекс заходів із охорони праці при роботі на електронно-променевих зварювальних установках.

Результати дослідження, а також розрахунки економічної частини магістерської роботи, вказують на економію матеріальних витрат у серійному виробництві, наприклад при ремонті, або коли відсутні комплектуючі із заданих матеріалів. Обґрунтований підхід із заміною одного титанового сплаву іншим є оправданим, економічно обґрунтованим та доцільним.

					КР.131.6121м.05.00.ПЗ	Арк.
						2
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ABSTRACTS

Key words: gas turbine construction, titanium alloys, compressor rotor, welding technology and modes, methods of weld quality control, labor protection on electron-beam welding installations.

The qualification work is devoted to the review of the problems of welding titanium alloys in gas turbine construction in the production of individual units of a gas turbine plant, in particular the rotor of a low-pressure compressor when welding drum discs from various titanium alloys.

An analysis of existing welding methods is carried out; Their main advantages and disadvantages are defined. Based on the results of the analysis, it is concluded that electron beam welding in vacuum is the best option for serial production of a gas turbine engine. The paper describes the composition and properties of titanium alloys VT3-1 + VT9. The technology and modes of electron beam welding have been determined.

A comprehensive methodology has been developed, on the basis of which a study of the structural, technological and operational properties of a welded joint made of VT3-1 + VT9 alloys has been carried out. A set of measures for labor protection when working on electron-beam welding installations has been determined.

The results of the study, as well as the calculations of the economic part of the master's work, indicate the saving of material costs in mass production, for example, during repairs, or when there are no components from specified materials. A reasonable approach with the replacement of one titanium alloy with another is justified, economically feasible and expedient.

					<i>КР.131.6121м.05.00.ПЗ</i>	Арк.
						3
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЗМІСТ

ВСТУП	5
1. ОГЛЯД ПРОБЛЕМ ТЕХНОЛОГІЇ ЗВАРЮВАННЯ ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ В КОМПРЕСОРАХ ГАЗОТУРБІННИХ УСТАНОВОК.	6
1.1. Використання титанових сплавів в газотурбінних установках. Умови робочого середовища.	6
1.2. Властивості і характеристики сплавів з титану для ГТУ	9
1.3. Огляд проблем технологій зварювання титанових сплавів	22
1.4. Висновки, мета та завдання магістерської роботи. Визначення програми дослідження	28
2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ ЯКОСТІ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ	30
2.1. Дослідження механічних властивостей та твердості зварного шву. Спектральний аналіз	31
2.2. Металографічні дослідження, пошук макро- та мікроефектів, визначення мікротвердості.	36
Висновки	40
3. ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ЗВАРЮВАННЯ ДИСКІВ БАРАБАНУ РОТОРА ІЗ СПЛАВІВ ВТЗ-1 + ВТ9 КОМПРЕСОРА ГАЗОТУРБІННОГО ДВИГУНА	41
3.1. Огляд способів зварювання титанових сплавів та обладнання.	41
3.2. Досліджувані матеріали. Їх характеристики.	52
3.3. Вибір способу та режимів зварювання у відповідності до програми дослідження.	54
3.4. Програма проведення дослідження.	58
3.5. Дослідження механічних властивостей зварного шву. Спектральний аналіз.	62
3.6. Дослідження мікроструктури зварного шву. Металографічні дослідження.	66
3.7. Дослідження зварювальних деформацій.	73
Висновки	74
4. ОХОРОНА ПРАЦІ	75
4.1. Вимоги охорони праці при електронно-променевому зварюванні.	75
4.2. Розрахунок заземлення та місцевої вентиляції	79
Висновки	86
5. РОЗРАХУНОК ЕКОНОМІЧНОГО ЕФЕКТУ ВИБРАНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ЗВАРЮВАННЯ НА ВИРОБНИЦТВІ	87
Висновки	92
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	93
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	96
ДОДАТКИ	

					<i>КР.131.6121м.05.00.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		4

ВСТУП

Розвиток сучасної промисловості, машинобудування та зокрема газотурбобудування при створенні технологічної продукції вимагають використання міцних матеріалів, які мають високі технологічні властивості, жаростійкість та корозійну стійкість до агресивних речовин.

Титан та його сплави, в порівнянні з іншими металами, має ряд переваг. Цей метал відрізняється легкістю, високими показниками міцності і корозійної стійкості. Високі механічні якості цього металу зберігаються при температурах від 450 до 600 °С. Надзвичайно висока корозійна стійкість обумовлена здатністю титану утворювати на поверхні тонкі (5–15 мкм) суцільні плівки оксиду TiO_2 , міцно пов'язані з масою металу. Мала щільність сприяє зменшенню маси використовуваного матеріалу. Легкі титанові сплави незамінні в авіаційній техніці, в суднобудуванні. Титан затребуваний в металургії, медицині, гірничопрохідницької і ядерній техніці, хімічній, харчовій, целюлозно-паперової промисловості та інших галузях.

Наприклад, в авіабудуванні в літаках цивільної авіації (марка літаків ТУ), загальна частка використаних титанових деталей складає від 12% до 20%. У військових літаках де з титану виконують бронезахист відсоток може сягати 90% (стратегічний бомбардувальник ТУ-160).

У сучасному машинобудуванні окрему нішу займає виробництво газотурбінних установок (ГТУ) та двигунів (ГТД), які використовують на електростанціях, нагнітаючих станціях магістральних газопроводів, на водному та повітряному транспорті. При цьому багато деталей роторного призначення (робочі лопатки різних ступенів компресора, диски компресора, кільця ГТД, кріпильні деталі) виконують з титанових сплавів, які при температурах 450°-600°С мають найбільший експлуатаційний ресурс.[1]. Диски компресора відіграють значну роль в роботі ГТУ і їх кріплення стяжними болтами не завжди доцільне.

Основним способом міцного з'єднання різних металевих деталей залишається зварювання. Тому, виникає потреба у даній роботі провести дослідження та вибір технології зварювання дисків барабану ротора із титанових сплавів ВТ3-1 та ВТ-9 компресора газотурбінного двигуна.

					КР.131.6121м.05.00.ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ВСТУП	Літ.	Арк.	Акрушів
Студент	Сичов							
Керівник	Костін						5	97
Консул.						НУК ім.адм.Макарова		
Н. Контр.								
Зав. каф.	Драган							

1. ОГЛЯД ПРОБЛЕМ ТЕХНОЛОГІЇ ЗВАРЮВАННЯ ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ В КОМПРЕСОРАХ ГАЗОТУРБІННИХ УСТАНОВОК.

1.1. Використання титанових сплавів в газотурбінних установках. Умови робочого середовища.

Газотурбінні установки в залежності від сфери використання мають різні компоновки конструкції силових агрегатів. Однак, більшість установок (двигунів), зокрема у суднобудуванні, мають більш менш схожий склад агрегатів. До складу ГТУ входять - вхідний пристрій, компресор низького тиску, компресор високого тиску, камера згоряння палива, турбіна високого тиску, турбіна низького тиску, силова турбіна, муфта.

Задача компресорів ГТУ полягає у заборі повітря, створенні необхідного напрямлення повітряного потоку і перетворення енергії високошвидкісного потоку повітря у тиск.

Основним робочим елементом сучасної турбіни є її ротор. Ротор складається із валу, що спирається на підшипники ковзання або кочення, дисків барабану, насаджених на вал та стягнутих наскрізними болтовими з'єднаннями або зварених між собою, та лопаток, закріплених в дисках. Лопатки газової турбіни під дією газового потоку створюють обертальний момент, який передається ротору.

У судових ГТД використовують компресори з динамічним принципом стиснення повітря – центробіжні та осьові. Принцип дії – спочатку в робочих лопатках компресора механічна енергія обертання ротора перетворюється у кінетичну енергію руху повітря (газу), а потім кінетична енергія повітря у направляючих лопатках (при гальмуванні потоку) перетворюється в потенційну енергію тиску повітря.

					КР.131.6121м.05.01.ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ОГЛЯД ПРОБЛЕМ ТЕХНОЛОГІЇ ЗВАРЮВАННЯ ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ У ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНАХ	Літ.	Аркуш	Аркушів
Студент	Сичов						6	97
Керівник	Костін							
Консул.								
Н. Контр.								
Зав.каф.	Драган					НУК ім.адм.Макарова		

Основним типом компресорів, що застосовуються у суднових ГТД, є компресори осьового типу. Загальний вид осьового компресора на рис.1.1. [3]

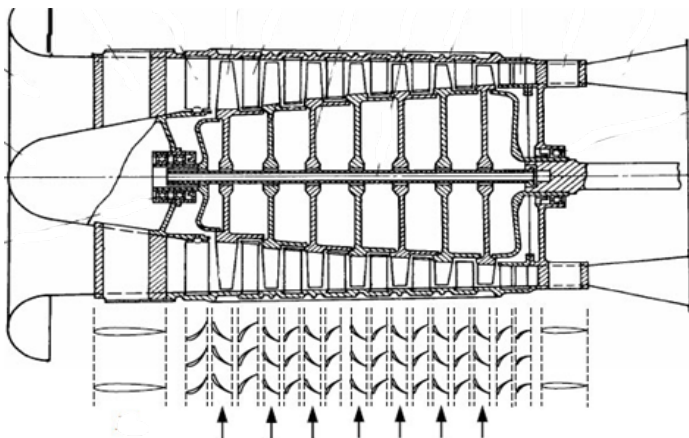


Рис. 1.1. Загальний вид осьового компресора з ротором змішаного типу.

Ротори осьового компресора виконуються барабанними, дисковими або змішаного типу. У суднових ГТД найчастіше використовують компресори з роторами змішаного типу, що поєднують простоту в конструкції, виготовленні і високу поперечну жорсткість барабанного ротору і високу міцність дискового ротору. [3]

Слід окремо зазначити, що важливим фактором надійності роботи як ГТУ в цілому так і окремих його частин є умови робочого середовища, до яких відносять перш за все експлуатаційні умови, температурний режим, агресивний вплив кліматичних факторів та робочих речовин (повітря).

Ці умови експлуатації є одним з експлуатаційних пошкоджуючих факторів і призводять до корозії деталей компресора, особливо лопаток останніх ступенів, де корозія активізується підвищеними температурами.

Основними причинами поломки компресора газотурбінного двигуна є:

- високий рівень динамічних навантажень;
- попадання сторонніх предметів в повітряний тракт двигуна під час його роботи (вплив води, солі, пилу, великих частинок, птахів);
- вплив корозії;
- неякісне виготовлення лопаток, дисків (наявність тріщин на ковці, дефектів матеріалу, відхилення розмірів від креслень, високі залишкові напруження).

Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КР.131.6121м.05.01.ПЗ

Арк.

7

Корозійне пошкодження холодних і помірно нагрітих деталей відбувається при безпосередньому впливі сольових аерозолів, що утворюються при випаровуванні залишкової води в тракті газотурбінного двигуна. На основі теоретичних і експериментальних досліджень встановлено, що з усіх рідин, що увійшли в осьовий ступінь компресора ГТД з повітрям, близько 60% буде знаходитися в крапельному вигляді в між лопатковому каналі і близько 40% у вигляді плівок на лопатках корпусу компресора. Коли стадія пройде, 7 - 10% всієї рідини в стадії осіде на корпус компресора. У той же час інтенсивність відкладення солей і характер її розподілу по шляху компресора роблять істотний вплив на вологість потоку. Зовнішні поверхні двигуна захищають від корозії, наносячи спеціальні покриття і виключаючи використання в деталях легких, некорозійностійких магнієвих сплавів. Елементи гідравліки також захищають від корозії спеціальними покриттями, застосовують різні промивки газоповітряного тракту або застосовують титанові сплави [4].

Робота деталей наземних газових турбін схожа з роботою суднових та газотурбінних двигунів на літаках морського базування не тільки за рахунок впливу високої температури і сили, але й з-за впливу агресивних середовищ. У той же час, виходячи з досвіду обслуговування силових газотурбінних агрегатів виробництва GE, Alstom, Mitsubishi, Siemens, серед основних причин руйнування на першому місці стоять корозійні пошкодження, за якими слідують руйнування внаслідок вібрацій, термічних деформацій, механічного та ерозійного зносу.

Дослідження морфології поверхонь оперативного руйнування хвостовика лопаток і диска компресора високого тиску (з титанового сплаву BT18Y) показали, що розвиток тріщин відбувався по крихкому механізму з утворенням квазістружкових граней уздовж міжфазних кордонів і кристалографічних площин структурних компонентів. В обох випадках руйнування відбувалося за механізмом уповільненого руйнування, яке розвивається під впливом агресивного середовища. [4]

Ротори компресорів низького (КНТ) та високого тиску (КВТ), що працюють при високих обертах (частота обертання досягає до 13000 об/хвил.) і високому тиску, є особливо відповідальними вузлами компресорів. Конструктивно ротори КВТ та КНТ представляють собою барабанно-дискону конструкцію діаметром 600...700 мм, довжиною 700..800 мм, з певною кількістю дисків. Диски роторів на підставі багатолітнього досвіду та розрахунків в Україні виготовляють з високолегованих мартенситних сталей ЭП609 або ЭП517, а також титанових сплавів ВТ3-1, ВТ-6, ВТ-8, ВТ-9... [2]

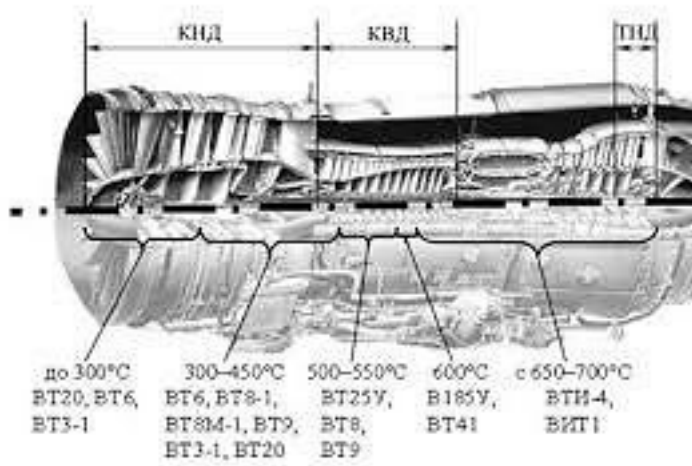


Рис.1.2. Основні марки титанових сплавів, що використовуються у ГТД залежно від температурного режиму.

1.2. Властивості і характеристики сплавів з титану для ГТУ.

Треба розуміти, що вибір титанового сплаву для більшості вузлів та деталей ГТД залежить від багатьох факторів починаючи від робочої температури та закінчуючи аналізом фазових перетворень у структурі того чи іншого сплаву, стійкості до тріщин, міцності і корозійної стійкості та інше.

Дослідження та розробка титанових сплавів для потреб промисловості, зокрема авіаційної та суднової техніки, в тому числі авіаційних газотурбінних двигунів, продовжуються вже понад 70 років. Спочатку маса титанових деталей становила 5-10% від загальної маси газотурбінного двигуна, в сучасних конструкціях масова частка титанових сплавів становить близько 40%. Висока питома міцність і корозійна стійкість титанових сплавів при температурах до 550–600 °С зробили титанові сплави основним конструкційним матеріалом для деталей компресора газотурбінного двигуна.[5, 9]

Чистий титан характеризується низькою міцністю (з 250-450 МПа), високою пластичністю (8-50-60%, 70-90%) і технологічністю при обробці тиском, в тому числі холодним куванням. Завдяки низькій щільності ($\rho=4,5 \text{ г/см}^3$) має переваги перед багатьма матеріалами за питомими характеристиками міцності. Титан має високу корозійну стійкість у багатьох агресивних середовищах (луги, кислоти, лужні та кислотні розчини) та інших активних середовищах. Важливими областями застосування є його висока корозійна стійкість в природних середовищах, включаючи морську атмосферу і морську воду. Титан має ряд привабливих теплофізичних властивостей, що обумовлює його застосування в деяких конкретних областях техніки. Ефективність титану в багатьох сферах застосування може бути значно підвищена за допомогою методів легування та термічної обробки. Ці напрямки багато в чому визначаються його поліморфізмом: як відомо, до температури $882,5^\circ \text{C}$ титан має структуру ГПУ (α -фазу), вище $882,5^\circ \text{C}$ до температури плавлення структури ОЦК (β -фаза). За впливом на поліморфізм титану всі легуючі елементи поділено на три групи.

Перша група представлена α -стабілізаторами - елементами, що підвищують температуру поліморфного перетворення титану (рис. 1.3., а). З металів до α -стабілізаторів відносяться алюміній, галій, нікель, неметали - вуглець, азот і кисень. [1]

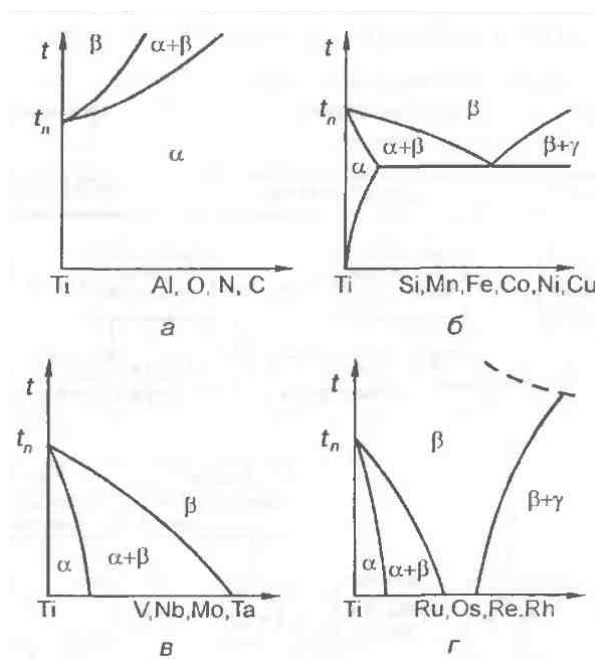


Рис.1.3. Вплив легуючих елементів на температуру поліморфного перетворення титану.[1]

До другої групи відносять β -стабілізатор і елементи, що знижують температуру поліморфного перетворення титану. Їх можна розділити на три підгрупи. У титанових сплавах з елементами першої підгрупи евтектоїдний розпад β -фази $\beta \rightarrow \alpha + \gamma$ відбувається при досить низькій температурі (рис.1.3, б). До числа таких елементів відносять кремній, хром, марганець, залізо, кобальт, нікель, мідь - їх називають евтектоїдоутворюючими β -стабілізаторами. У сплавах з евтектоїдоутворюючими β -стабілізаторами β -фаза досить стабільна і тривалий час зберігається при температурах нижче евтектоїдної. У титанових сплавах з неперехідними елементами β -фаза не стійка і її не вдається закріпити навіть загартуванням від температур вище евтектоїдних.

У титанових сплавах з елементами другої підгрупи при досить високій концентрації β -розчин зберігається до кімнатної температури, не піддаючись евтектоїдного розпаду (рис. 1.3, в). До таких елементів належать ванадій, молібден, ніобій, тантал і вольфрам. Оскільки вони утворюють неправильні розчини з β -титаном, їх називають β -ізоморфними стабілізаторами. У сплавах цієї підгрупи при низьких температурах і великих впливах може відбуватися монотектоїдне перетворення $\beta_1 \rightarrow \alpha + \beta_2$. У промислових умовах виробництва сплавів таке перетворення не реалізовується.

У сплавах третьої підгрупи рівноважна β -фаза стабілізується також при кімнатній температурі, але суцільні β -тверді розчини не утворюються (рис. 1.3, г), так як не дотримується принцип ізоморфізму взаємодіючих елементів. До елементів цієї підгрупи відносяться реній, рутеній, родій, осмій, іридій. Їх можна назвати кватнітоморфними β -стабілізаторами.

Третя група представлена легуючими елементами, які мало впливають на температуру поліморфного перетворення титану. До них відносяться олово, цирконій, германій, гафній, торій. Ці елементи називають нейтральними зміцнювачами.

Майже всі промислові титанові сплави містять алюміній, і тому титано-алюмінієва система в титановій металургії так само важлива, як залізо-вуглецева система для сталей. [1]

					КР.131.6121м.05.01.ПЗ	Арк.
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

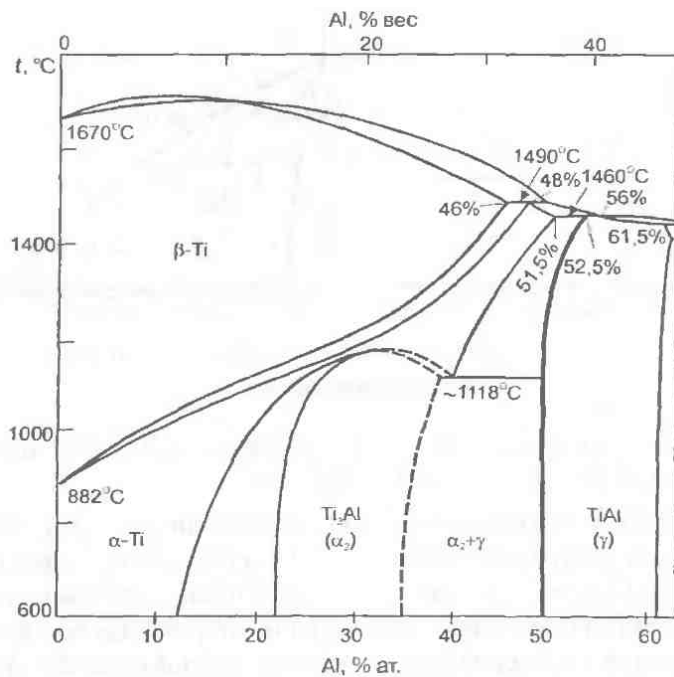


Рис.1.4. Діаграма стану системи Ti – Al

Розчинність алюмінію в α - титані зменшується зі зниженням температури і становить 10, 9, 8 і 7 % мас. при 900, 800, 700 і 600 °C відповідно.

Алюміній є основним легуючим елементом в титанових сплавах, він присутній практично у всіх сплавах. Однак зі збільшенням вмісту алюмінію підвищується чутливість титанових сплавів до сольової корозії, а також, знижується їх технологічна пластичність. Тому, якщо існує небезпека контакту сплавів з сіллю при роботі в діапазоні температур 250-550°C або потрібна висока технологічна пластичність, слід обмежити вміст алюмінію в титанових сплавах.

В описі багатокомпонентних титанових сплавів передбачається, що дія всіх β -стабілізаторів може бути виражено сумарним еквівалентним вмістом молібдену [Mo]... в якому число β -фаз, стабільність і здатність до трансформації в подвійному сплаві Ti-Mo будуть такими ж, як і в розглянутому сплаві.

$$[\text{Mo}]_{\text{ЗКВ}} = \% \text{Mo} + \% \text{Ta}/4 + \% \text{Nb}/3,3 + \% \text{W}/2 + \% \text{V}/1,4 + \% \text{Cr}/0,6 + \% \text{Ni}/0,8 + \% \text{Mn}/0,6 + \% \text{Fe}/0,4. \quad (1.1)$$

Основними перетвореннями в титані і його сплавах є поліморфні і мартенситні. Поліморфне дифузійне перетворення відбувається при відносно низьких швидкостях охолодження і реалізується шляхом зародження і росту

нових зерен. При швидкостях охолодження, що перевищують критичні, відбувається бездифузійне (мартенситне) перетворення. Мартенситне перетворення відбувається в інтервалі температур початку і кінця перетворення M_H і M_K . Зі збільшенням вмісту β -стабілізаторів температури мартенситного перетворення (M_H і M_K) знижуються (рис. 1.11).

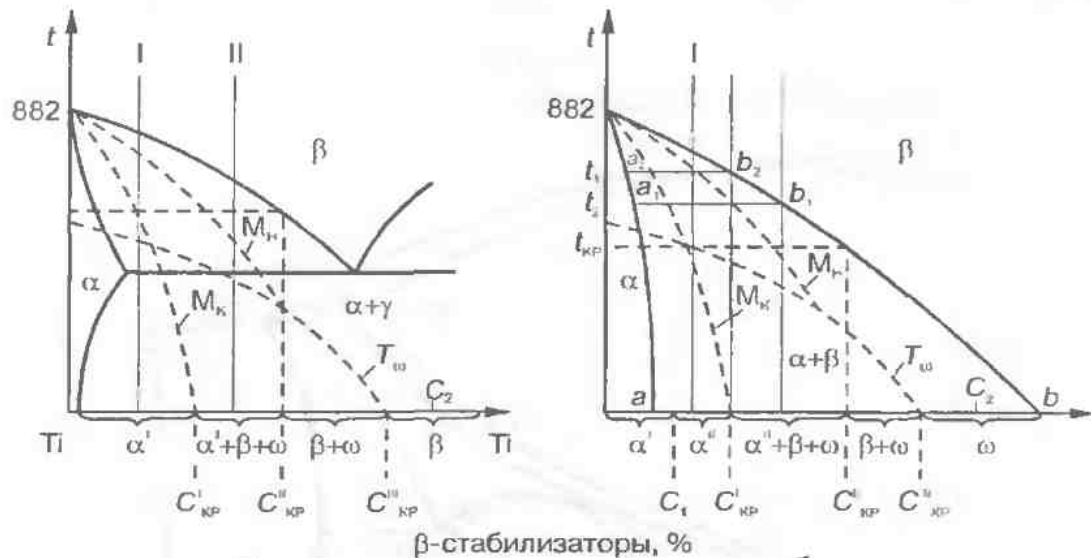


Рис.1.5. Фазовий склад титанових сплавів з β -евтектоїдоутворюючими і β -ізоморфними стабілізаторами. [1]

Титанові сплави класифікуються за різними ознаками. Найбільш поширеною є класифікація сплавів за фазовим складом. До неї входять:

1. α -сплави, структура яких представлена α -фазою.
2. Псевдо- α сплави, структура яких представлена α -фазою і невеликою кількістю β -фази або інтерметалідів (не більше 5%).
3. $(\alpha + \beta)$ -сплави, структура яких представлена α - і β -фазами. Сплави цього типу також можуть містити невелику кількість інтерметалідів.
4. Псевдо- β -сплавах із структурою, де є одна β -фаза після закалки або нормалізації із β -області. Їх хімічний склад перевищує другу критичну концентрацію. Структура цих сплавів у відпаленому стані представлена α -фазою і великою кількістю β -фази.
5. β -сплави, структура яких представлена термодинамічно стійкою β -фазою.
6. Сплави на основі інтерметалідів.

Також, виділяють сплави перехідних класів, які за своєю структурою і перетвореннями, що відбуваються в них, займають проміжне положення між

($\alpha+\beta$)- і псевдо- β сплавами. По суті, це сплави, в яких в залежності від коливань їх хімічного складу після загартування з β -області може утворитися β -структура (можливо, з ω -станом всередині неї) або структура, представлена β -фазою і мартенситом.

Для розрізнення сплавів прийнято наступні показники $[Mo]_{\text{екв}}$: для α -сплавів $=0$; $\leq 2,5\%$ для псевдо α -сплавів; від 2,5 до 10% для ($\alpha+\beta$) і 10-12% для сплавів перехідного класу; $\geq 12\%$ для псевдо- β - і $\geq 30\%$ для β -сплавів.

Також, класифікують титанові сплави за їх структурою в загартованому стані. У цю класифікацію входять:

- сплави мартенситного класу, структура яких після загартування з температур вище A_c представлена мартенситом α' або α''
- сплави перехідного класу, структура яких після загартування з температур вище A_c , представлена мартенситом α' (α'') і β -фазою,
- β -сплави, структура яких після загартування представлена β -фазою.

За здатністю до зміцнення при старінні титанові сплави можна розділити на: а) термічно незміцнені; б) термічно зміцнені.

По стабільності β -фази після загартування з β -області можна виділити три підгрупи титанових сплавів: 1) з механічно нестійкою β -фазою; 2) з механічно стійкою β -фазою; 3) з термодінамічно стійкою β -фазою.

За способом виробництва розрізняють деформовані, ливарні і порошкоподібні (гранульовані) титанові сплави. Вони поділяються на: 1) конструкційні (загального призначення); 2) термостійкі; 3) кріогенні; 4) корозійностійкі; 5) функціональні.

За рівнем міцності розрізняють сплави: 1) маломіцні; 2) сплави середньої міцності; 3) високої міцності. До маломіцних сплавів відносяться сплави з межею опору розриву менше 650 МПа, до сплавів середньої міцності від 700 до 1000 МПа, до високоміцних понад 1000 МПа. Остання класифікація, звичайно, умовна, так як властивості сплавів ($\alpha + \beta$)- і псевдо- β можуть бути змінені в широкому діапазоні методами термічної обробки.

Також, сплави розрізняють за способами виробництва: деформовані і ливарні. У середині кожної групи сплави описуються відповідно до

					КР.131.6121м.05.01.ПЗ		Арк.
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			14

класифікації за структурою: α -, псевдо- α , ($\alpha + \beta$)-, псевдо- β . Виняток зроблено для сплавів на основі інтерметалідів, оскільки вони являють специфічний вид матеріалу і можуть вироблятися і застосовуватися як в литому, деформованому, так і в порошкоподібному консолідованому станах.[1]

Маркування титанових сплавів залежить від країни виробника. Зокрема в Україні на заводі ДП «Зоря-Машпроект» використовують наступні марки сплавів.

Таблиця 1.1. Основні вітчизняні промислові титанові сплави із зазначенням хім.складу та еквівалентів по алюмінію і молібдену. [1]

№ пп	Марка сплава	Средний химический состав, % мас.	[Al] _{экв} , %	[Mo] _{экв} , %
α-сплавы				
1	BT1-00	0,10 O ₂ ; 0,04 N; 0,05 C; 0,08 Si; 0,20 Fe*	0,8	—
2	BT1-0	0,12 O ₂ ; 0,04 N; 0,07 C; 0,10 Si; 0,20 Fe*	1,2	—
3	BT5-1	5Al-2,5Sn	6,8	—
4	PT7M	2,2Al-2,5Zr	3,6	—
Псевдо-α-сплавы				
5	OT4-0	0,8Al-0,8Mn	1,8	1,3
6	OT4-1	1,5Al-1Mn	2,5	1,7
7	OT4	4Al-1,5 Mn	5,0	2,5
8	PT3B	4Al-2V	5,0	1,4
9	OT4-1B	3Al-2V	4,0	1,4
10	OT4B	4,5Al-2,5V	5,5	1,8
11	AT3	3Al-0,7Cr-0,4Fe-0,4Si	4,0	2,2
12	AT6	6Al-0,7Cr-0,4Fe-0,4Si	7,0	2,2
13	BT18Y	6,5Al-4Zr-2,5Sn-0,6Mo-1Nb-0,15Si	9,0	1,0
14	BT20	6,5Al-2Zr-1Mo-1V	7,8	1,7
($\alpha + \beta$)-сплавы				
15	BT6	6Al-4,5V	7,0	3,2
16	BT6с	5Al-4V	6,0	2,9
17	BT6КТ	6Al-4V	7,0	2,9
18	BT14	5Al-3Mo-1,4V	6,0	4,0
19	BT8	6,5Al-3,3Mo-0,30 Si	7,5	3,3
20	BT8M	6,3Al-1Sn-1Zr-3,3Mo-0,15Si	7,8	3,3
21	BT9	6,4Al-1,5Zr-3,4Mo-0,25Si	7,7	3,4
22	BT25Y	6,5Al-1,8Sn-3,8Zr-4Mo-1W-0,2Si	8,7	4,5
23	BT36	6,2Al-2Sn-3,6Zr-0,7Mo-5W-0,15Si	8,5	3,2
24	BT3-1	6,3Al-2,5Mo-1,5Cr-0,5Fe-0,3Si	7,3	6,3
25	BT23	5,5Al-2Mo-4,5V-1Cr-0,6Fe	6,5	8,4
26	BT16	3Al-4,5V-5Mo	4,0	8,2
Сплавы переходного класса				
27	BT22	5Al-5Mo-5V-1Cr-1Fe	6,0	12,7
28	BT22И	3Al-5Mo-5V-1Cr-1Fe	4,0	12,7
29	BT30	11,5Mo-6Zr-4,5 Sn	3,5	11,5
Псевдо-β-сплавы				
30	BT35	15V-3Cr-3Al-3Sn-1Zr-1Mo	5,2	16,7
31	BT19	5,5Mo-5,5Cr-3,5V-3Al-1Zr	4,2	17,2
32	BT32	8Mo-8V-1,2Cr-1,2Fe-3Al	4,0	18,7
33	BT15	Ti-11Cr-7Mo-3Al	4,0	25,3
β-сплавы				
34	4201	Ti-33Mo	1,0	33,0

* Максимально допустимое содержание примесей.

Загальна характеристика окремих α - і псевдо- α сплавів представлена в таблиці 1.2. Сплави цього класу леговані алюмінієм і нейтральними зміцнювачами (олово і цирконій). В порівнянні з чистим титаном, відрізняються підвищеною міцністю і жаростійкістю, високою термічною стійкістю. Низька схильність до холодної крихкості, хороша зварюваність. Хороша зварюваність сплавів обумовлена їх однофазною структурою навіть при значному вмісті алюмінію, в зв'язку з чим метал шва і навіколошовної зони не крихкий. Титанові сплави не піддаються термічному зміцненню. Єдиним видом їх термічної обробки є відпал: повний (для достатнього видалення загартування) або неповний (для зняття залишкових напружень). З α - сплавів найбільшого поширення набув сплав Ti-5Al-2,5Sn, який виробляється практично в усіх країнах світу. Цей сплав зі зниженим вмістом домішок не схильний до холодової крихкості і використовується до температур рідкого водню.

Недоліками високотехнологічних низьколегованих псевдо α - сплавів є порівняно низька міцність і висока схильність до крихкості водню. [1]

Таблица 1.2. Загальна характеристика окремих α - і псевдо- α сплавів [1]

Сплав	Общие сведения	Общая характеристика	Структура. Термическая обработка	Полуфабрикат	Технология	Область применения
	плотность 4,40 г/см ³ $T_{\text{пл}}=1030$ °C	высокой коррозионной стойкостью			ворительно сваривается	
BT20 (Ti-6,5Al-1Mo-1V-2Zr) [2, 4, 6, 7, 13, 18, 28, с. 707 и 875; 29, с. 567; 47, с. 82]	Сплав разработан в ВИАМе в 1965 г., обладает несколько более высокой прочностью по сравнению с BT6. Литейный вариант сплава BT20Л. Плотность 4,45 г/см ³ $T_{\text{пл}}=980-1020$ °C	Довольно высокое содержание алюминия обеспечивает значительную прочность и жаропрочность сплава	Сплав применяется в отожженном состоянии. Его пластичность и технологичность при обработке давлением ниже, чем у сплавов типа OT4	Прутки, листы, плиты, поковки, штамповки, профили, кольцевые детали, полевые профили, панели, фасонное литье	Сплав хорошо деформируется в горячем состоянии, хорошо сваривается всеми видами сварки, может свариваться с другими титановыми сплавами	Обшивка крыла, корпусные детали, детали ГТД, сварные узлы, работающие до 400-450 °C
BT18Y (Ti-6,5Al-2,5Sn-4Zr-1Nb-0,7Mo-0,15Si) [6, 13, 18, 29, с. 567 и 583; 71]	Сплав BT18 разработан в ВИАМе в 1972 г. как жаропрочный материал для работы при температурах до 600 °C. Сплав BT18Y – усовершенствованный вариант сплава BT18. Плотность 4,55 г/см ³ $T_{\text{пл}}=990-1030$ °C	Наиболее жаропрочный титановый сплав. Высокие характеристики жаропрочности обеспечивают большие содержания алюминия, нейтральных упрочнителей и легирование кремнием	Сплав термически не упрочняется. Оптимальное сочетание свойств обеспечивает двойной отжиг. Пластические свойства и технологичность при обработке давлением ниже, чем у сплавов типа OT4	Прутки, поковки, штамповки, листы	Сплав удовлетворительно деформируется в горячем состоянии	Детали газотурбинных двигателей (компрессоры высокого давления), работающих при 550-600 °C

Загальна характеристика окремих ($\alpha+\beta$) сплавів наведена в таблиці 1.3.

Механічні властивості сплавів цього класу змінюються в доволі широких межах. Ці сплави термічно зміцнюються шляхом гартування і старіння, що дозволяє отримати в них високоміцний стан, однак дещо при зниженні пластичності. З підвищенням еквіваленту по молібдену (коефіцієнта β -стабілізації K_β) міцнісні властивості ($\alpha+\beta$)-сплавів підвищуються, разом з тим росте їх схильність до термічного зміцнення. Найбільш високими міцносними властивостям володіють сплави з $[Mo]_{\text{екв}} \approx 11\%$. [1]

Першим серійним жароміцним сплавом титану у вітчизняній промисловості став ($\alpha+\beta$)-сплав ВТЗ-1 (Ti–6.7Al–2.5Mo–1.8Cr–0.5Fe–0.25Si). Сплав і досі використовується для деталей газотурбінних двигунів, що працюють тривалий час при температурах до 450 °С. Згодом для більш високих робочих температур 500 і 550 °С були розроблені і впроваджені ($\alpha+\beta$)-сплави ВТ8 (Ti–6,8Al–3,5Mo–0,32Si) і ВТ9 (Ti–6,8Al–3,2Mo–2,0Zr–0,3Si). [5]

Таблиця 1.3. Загальна характеристика окремих ($\alpha+\beta$)-сплавів [1]

Сплав	Общие сведения	Общая характеристика	Структура, термическая обработка	Полуфабрикат	Технология	Область применения
ВТЗ-1 (Ti–6,3Al–2,5Mo–1,5Cr–0,5Fe–0,3Si) [3, 4, 6, 7, 15, 18, 28, с. 875; 85, с. 23, 47, с. 82]	Один из первых отечественных промышленных сплавов (предложен ВИАМом в 1957 г.). Долгое время был самым распространенным отечественным сплавом. Литейный вариант ВТЗ-1Л. Плотность 4,5 г/см ³ , $T_{\text{пл}} = 960\text{--}1000$ °С	Комплексное легирование сплава обеспечивает более высокую прочность и жаропрочность по сравнению со сплавом ВТ6. По технологичности и трещиностойкости сплав ВТЗ-1 уступает сплаву ВТ6. Предназначен для работы до 400–450 °С	Применяют в отожженном и термически упрочненном состоянии. Прокаливаемость сплава невелика (в сечении до 40–45 мм). Количество β -фазы в отожженном сплаве $\approx 15\text{--}20\%$	Прутки, поковки, штамповки, плиты, профили, кольцевые детали	Удовлетворительно деформируется в горячем состоянии. Обладает удовлетворительными литейными свойствами	Детали компрессора ГТД, работающие длительно до 400 °С; арматура, ушковые болты, детали системы управления (в настоящее время рекомендуется заменять сплав ВТЗ-1 для приведенного применения на сплав ВТ6)
ВТ23 (Ti–5Al–4,5V–2Mo–1Cr–0,7Fe) [7, 13, 14, 18, 25, с. 1559; 29, с. 944; 28, с. 707, 831; 87, 58]	Разработан в ВИАМе в 1969 г. Плотность 4,57 г/см ³ , $T_{\text{пл}} = 890\text{--}930$ °С	Среднелегированный ($\alpha+\beta$)-сплав мартенситного класса. В виду довольно большого содержания β -стабилизаторов отличается высокой технологической пластичностью при обработке давлением и	Применяют в отожженном и термически упрочненном состоянии; в отожженном сплаве содержание β -фазы $\approx 30\%$. Эффект старения достигает $\approx 40\%$	Прутки, листы, лента, фольга, поковки, штамповки, плиты, трубы, профили	Хорошо обрабатывается давлением, при изготовлении деталей можно применять вытяжку и отбортовку. Сплав хорошо сваривается	Силовые конструкции аэрокосмической техники: лонжероны, шпангоуты, обшивка, баллоны; широко использован в конструкции космического аппарата «Буран»

Сплав	Общие сведения	Общая характеристика	Структура, термическая обработка	Полуфабрикат	Технология	Область применения
BT6 (Ti-6Al-4V) [2-4, 7, 13-15, 28, с. 707, 2777, 2991; 47, с. 82, 197, 200]	Аналог зарубежного сплава Ti-6Al-4V. Выпускается несколько модификаций этого сплава, отличающихся содержанием Al, V и примесей (BT6; BT6с; BT6к; BT6кт; BT6ч); литейный вариант BT6Л. Плотность 4,43 г/см ³ . T _{кр} =970-1010 °C	Сплав средней прочности (в отожженном состоянии). Al упрочняет α- и β-фазы; V стабилизирует β-фазу и затрудняет образование α ₂ -сверхструктуры в α-фазе. Обладает высоким комплексом прочностных, технологических и служебных свойств. Максимальная рабочая температура 350 °C. Сплав с пониженным содержанием примесей (BT6кт) применяют при криогенных температурах (до 196 °C)	Применяют в отожженном и термически упрочненном состоянии. В отожженном сплаве содержится около 10 % β-фазы. Закалка и старение повышают уровень прочности примерно на 15-20 % при сохранении достаточно высокой пластичности	Листы, лента, фольга, плиты, поковки, штамповки, профили, кольцевые детали, панели, проволока	Обладает высокой технологичностью при обработке давлением, хорошими литейными свойствами, свариваются всеми видами сварки	Детали авиационных двигателей (статор, компрессор) и планера самолета, детали ракет, детали крепления, химическое машиностроение, изделия бытовой техники, спортивный инвентарь, детали и элементы конструкций, работающих в воде; хирургические имплантаты

BT9 (Ti-6,5Al-3Mo-1,5Zr-0,25Si) [12,	Разработан в ВИАме в 1958 г.; литейный вариант сплав BT9Л	Высокое содержание алюминия и легирование кремнием обеспечивают	Оптимальное сочетание механических свойств обеспечивает двойной	Прутки, поковки, штамповки, плиты, кольца	Сплав удовлетворительно деформируется в горячем состоя-	Детали ГТД (диски, лопатки и другие детали компрессора)
---	---	---	---	---	---	---

Сплав	Общие сведения	Общая характеристика	Структура, термическая обработка	Полуфабрикат	Технология	Область применения
с. 583; 17-20, 22, 28, 30, 31, 53]	Плотность 4,48 г/см ³ , T _{кр} =980-1020 °C	более высокие прочностные и жаропрочные свойства по сравнению с BT6. Предназначен для работы при температурах 400-500 °C	отжиг, содержание β-фазы после отжига равно 10 %. Сплав термически упрочняется закалкой и старением	высшие детали	нии. Технологические свойства при обработке давлением хуже, чем у сплава BT6. Сварка не рекомендуется	
BT8 (Ti-6,5Al-3,3Mo-0,3Si) [2-7, 13-15; 28, с. 875; 29, с. 583, 944]	Разработан в ВИАме в 1958 г.; позднее предложены его модификации: BT8-1, BT8M, BT8M-1. Плотность 4,48 г/см ³ , T _{кр} =980-1020 °C	Высокое содержание алюминия и легирование кремнием обеспечивают более высокие прочностные и жаропрочные свойства по сравнению со сплавом BT6. Максимальная рабочая температура 480 °C; сплавы BT8-1 и BT8-1M превосходят сплавы BT3-1 и BT9 по термической стабильности, пластичности, технологичности и трещиностойкости	Оптимальное сочетание свойств обеспечивает двойной и изотермический отжиг. Содержание β-фазы в отожженном сплаве составляет 10 %. Сплавы этого типа термически упрочняются	Прутки, поковки, штамповки, плиты	Удовлетворительно деформируется в горячем состоянии; технологичность при обработке давлением хуже, чем у сплава BT6. Сварка не рекомендуется	Детали ГТД (лопатки и диски компрессора низкого давления, детали крепления; в том числе вентилятора)

Сплав	Общие сведения	Общая характеристика	Структура, термическая обработка	Полуфабрикат	Технология	Область применения
BT14 (Ti-5Al-3Mo-1V) [2, 13-15; 18, 29, с. 962; 43, с. 190]	Разработан в ВИАме в 1960 г.; первый термически упрочняемый сплав, освоенный промышленностью. Литейный вариант BT14Л. Плотность 4,50 г/см ³ , $T_{\text{пл}} = 920-960$ °C	Существенное содержание β -стабилизаторов (молибдена и ванадия) обеспечивает получение β -фазы в количествах, достаточных для термического упрочнения. Рекомендуются для работы до 400 °C	Применяют в отожженном или термически упрочненном состоянии. Эффект от старения составляет ≈ 30 %. Прокаливаемость невелика (в сечениях не более 40-45 мм)	Листы, прутки, профили, поковки, штамповки, фасонное литье	Хорошо деформируется в горячем состоянии; основные операции штамповки осуществляют при нагреве. Сплав удовлетворительно сваривается. Хорошие литейные свойства	Штамповочные конструкции, длительно работающие до 350-400 °C, конструкции из труб, детали крепления
BT25У (6,5Al-1,8Sn-3,8Zr-4Mo-1W-0,20Si) [29, с. 583; 72, 85, с. 23; 47, с. 82]	Разработан в ВИАме в 1971 г. Плотность 4,5 г/см ³ , $T_{\text{пл}} = 900-1030$ °C	Высокое содержания алюминия и нейтральных упрочнителей (циркония и олова), а также легирование вольфрамом обеспечивают повышенные характеристики жаропрочности. Максимальная рабочая температура достигает 500-550 °C	Применяют в отожженном состоянии. По прочности и жаропрочности в интервале температур 450-550 °C превосходит все другие отечественные сплавы; но по трещиностойкости уступает сплаву BT6	Прутки, поковки, штамповки, кольцевые детали	Удовлетворительно деформируется в горячем состоянии. Технологические свойства при обработке давлением хуже, чем сплава BT6	Детали ГТД (лопатки и диски компрессора высокого давления)

Механічні властивості сплавів $(\alpha+\beta)$ -класу дуже чутливі до типу і параметрів мікроструктури. Для забезпечення високого рівня пластичності і спротиву циклічним навантаженням необхідно прагнути до равноосної дрібнозернистої структури. Високу в'язкість до руйнування і більший опір розвитку тріщин забезпечують навпроти – пластинчасті структури. По жароміцності $(\alpha+\beta)$ -сплави поступають псевдо- α -сплавам.

Псевдо- β -сплави відносяться до високолегованих сплавів, в яких сумарний склад легуючих елементів доходить до 25% і більше.

До переваг сплавів можна віднести:

1. Висока технологічність в загартованому стані, що дозволяє проводити деякі операції обробки тиском навіть при кімнатній температурі. Висока технологічність сплавів цього класу обумовлена об'ємною центральною решіткою β -фази, яка легше деформується, ніж α -фаза з гексаганальною структурою при однаковому ступені легування.
2. Великий ефект термічного зміцнення, який пов'язаний з високим ступенем перенасичення загартованої β -фази легуючими елементами. Розпад

пересиченої β -фази при старінні забезпечує підвищення міцності сплавів в 1,5-1,7 рази.

3. Велика глибина розжарюваності.
4. Висока в'язкість руйнування зі значними характеристиками міцності.
5. Висока стійкість до втоми.
6. Низька схильність до крихкості водню.

Сплави псевдо- β характеризуються зниженими значеннями модулів пружності і явищем псевдопружності.

Недоліки псевдо- β сплавів: а) низька термічна стабільність, внаслідок чого їх не можна використовувати при температурі вище 350°C; б) погана зварюваність, обумовлена сильним зростанням зерен в околосшовній зоні і ліквідацією легуючих елементів у зварному шві; в) великий розкид механічних властивостей, викликаних хімічною неоднорідністю сплавів із-за ліквідації і великою чутливістю процесу старіння до вмісту домішок; г) сильно виражений негативний вплив домішок на пластичність сплавів, у зв'язку з чим при виплавці злитків необхідно застосовувати чисті шихтові матеріали; д) порівняно висока щільність; е) висока вартість.

Таблиця 1.4. Загальна характеристика окремих псевдо- β -сплавів [1]

Сплав	Общие сведения	Общая характеристика	Структура, термическая обработка	Полуфабрикат	Технология	Область применения
BT30 (Ti – 11,5Mo – 6Zr – 4,5Sn) III. [29, с. 567; 88]	Аналог зарубежного сплава beta – III. Плотность 5,06 г/см ³ , T _{пл} = 760 °C	Сплав переходного класса. Обладает высокой пластичностью в закаленном состоянии ($\psi \geq 50\%$) при малом уровне прочности ($\sigma_{\text{в}} \approx 725$ МПа). Старение вызывает сильное упрочнение ($\sigma_{\text{в}} \geq 1300$ МПа)	Содержание β -стабилизаторов достаточно для подавления мартенситного $\beta \rightarrow \alpha'$ ("")-превращения. После закалки сплав способен к холодной деформации при комнатной температуре со значительными степенями (прокатке, штамповке, редуцированию и т.д.); последующее старение позволяет получить нужный уровень прочностных свойств	Прутки, листы, фольга, плиты	При плавке возникают большие трудности из-за ликвации легирующих элементов, при горячей деформации молибден испаряется. Сплав содержит дорогие легирующие элементы	Детали крепления
BT22 (Ti – 5Al – 5Mo – 5V – 1Cr – 1Fe) [2, 13, 18, 15; 25, с. 1569; 29, с. 567; с. 583; 28, с. 707, 1227, 2643; 47, с. 82; 44, 100, 101, 228]	Разработан ВИАМом в 1965 г. Позднее предложены его модификации BT22И; BT22ч; BT22М. Плотность 4,60 г/см ³ , T _{пл} = 850–890 °C	Высокопрочный, высоколегированный сплав переходного класса. Высокое содержание β -стабилизаторов обеспечивает большой эффект упрочнения при старении. Сплав BT22М дополнительно легирован оловом и цирконием	Сплав BT22 применяют в отожженном и термически упрочненном состоянии. В отожженном сплаве содержание α - и β -фаз примерно одинаково ($\approx 50\%$). Наиболее прочный в отожженном состоянии сплав среди серийных сплавов ($\sigma_{\text{в}} \geq 1300$ МПа). Рабочие температуры – до 350 °C	Прутки, поковки, штамповки, плиты, профили	Удовлетворительная обрабатываемость давлением; возможность получения крупногабаритных поковок и штамповок с довольно однородным распределением свойств по сечению. Сплав удовлетворительно сваривается	Силовые крупногабаритные детали фюзеляжа, крыла, шасси, детали системы управления, крепежные детали типа силовых болтов (Ил-76; Ил-86; Ил-96; «Руслан», «Мрия»), детали ГТД

Сплав	Общие сведения	Общая характеристика	Структура, термическая обработка	Полуфабрикат	Технология	Область применения
		ем, что привело к дополнительному упрочнению. Сплав BT22И содержит меньшие концентрации алюминия, что повышает его способность к холодной деформации				
BT35 (Ti – 15V – 3Cr – 3Al – 3Sn – 1Zr – 1Mo) [25, с. 1559; 29, с. 567; 50, с. 17; 86, с. 25; 102]	Предложен ВИАМОм; аналог зарубежного сплава Ti-15-3-3-3. Литейный вариант BT35Л. Плотность 4,88 г/см ³ , T _{пл} = 720–740 °C	Высоколегированный псевдо-β-сплав с β-фазой, легко сохраняющейся даже при охлаждении с печью	Обладает большой прокаливаемостью. В закаленном состоянии высокопластичный и способен к холодной деформации. Старение приводит к существенному упрочнению (σ _т ≥ 1200 МПа; δ = 6 %) при высокой вязкости разрушения	Листы, фольга, фасонное литье	Удовлетворительно обрабатывается давлением в горячем состоянии; после заковки способен к холодной деформации	Сотовые конструкции, анкерные гайки, длинномерные листовые лонжероны
BT19 (5,5Mo – 3,5V – 5,5Cr – 3Al – 1Zr) [25, с. 1559; 29, с. 944]	Разработан в ВИАМе в 1973 г.	Высоколегированный псевдо-β-сплав с β-фазой высокой устойчивости. Обладает лучшим комплексом механических свойств	В закаленном состоянии малопрочен и высокопластичен (σ _т ≈ 1000 МПа; δ ≥ 11 %; ψ ≥ 50 %). Старение вызывает сильное упрочнение (σ _т ≥ 1550 МПа; δ ≈ 4–5 %; ψ ≈ 15–5 %)	Поковки, штамповки, прутки, плиты, листы	Обладает удовлетворительной пластичностью при горячей и холодной обработке давлением	Детали авиационной техники

Титанові β-сплави з термодинамічною стійкою β-фазою можна отримати лише на основі таких систем, в яких легуючі елементи мають ОЦК решітку при кімнатній температурі. Це елементи – ванадій, молібден, ніобій, тантал. Однак, стабільні β-фази тут виникають при таких високих концентраціях компонентів, що титанові сплави втрачають головну перевагу, а саме порівняно малу щільність. Тому титанові β-сплави не отримали широкого промислового використання.

Інтерметаліди – перспективні сплави. Деталі з таких титанових сплавів можуть працювати при температурах 600 – 750 °C, а в окремих випадках до 950°C. Однак, при таких температурах більш перспективним виглядає використання жароміцних нікелевих сплавів (ЖНС) які є основним конструкційним матеріалом в газотурбобудуванні. Ефективність газових турбін істотно залежить від температури газу перед турбіною. Тому робоча температура ЖНС безперервно зростає. З 1970 по 2000 рік ККД двигунів різних поколінь зростав. Максимальна температура газу на вході до турбіни з 1027–1177 °C (третє покоління) зросла до 1527–1677 °C (п'яте покоління). Найбільш високотеплонагруженими є насадки і робочі лопатки, виготовлені

методом точного лиття у вакуумі. Для зниження температури лопатки мають складну систему охолодження, а для підвищення жароміцності їх роблять монокристалічними або із спрямованою кристалізацією. На сьогоднішній день інтерметалідний сплав на основі Ni_3Al робоча температура якого може бути підвищена до 1220°C є найбільш перспективним для авіаційних газових турбін нового покоління. [6]

Таким чином, проаналізувавши характеристики титанових сплавів ми бачимо, що за механічними, технологічними та ціновими показниками найбільш прийнятними для застосування у компресорах (КНТ та КВТ) ГТД залишаються титанові сплави $(\alpha+\beta)$ -класу.

1.3. Огляд проблем технології зварювання титанових сплавів.

Зварюваність титану і сплавів на його основі залежить від їх фізико-хімічних властивостей. Найважливішими з цих властивостей є: висока активність титану до атмосферних газів при підвищених температурах, значна схильність до зростання зерен при нагріванні, можливість утворення крихких фаз при охолодженні зварного шва.

Спорідненість титану до кисню та азоту значно перевищує спорідненість заліза, зварювальна поведінка якого добре вивчена. Переважний розвиток має утворення оксидів титану. Швидкість, з якою титан взаємодіє з киснем, в 50 разів більше, ніж з азотом. Різке збільшення швидкості реакції титану з цими газами спостерігається при температурі вище 600°C . Підвищення температури до 850°C сприяє розчиненню оксидної плівки в титані з подальшою дифузією кисню в глибину металу. [8]

Азот і кисень у відносно широкому діапазоні концентрацій утворюють тверді розчини з титаном. Ці гази різко знижують пластичність і значно підвищують твердість і міцність металу.

Спорідненість титану до водню надзвичайно висока. Розчинність водню в титані досягає 33 ат.% і в десятки тисяч разів перевищує розчинність цього газу в залізі. Здатність титану поглинати таку значну кількість водню

					КР.131.6121м.05.01.ПЗ	Арк.
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

обумовлена утворенням гідридів титану, які зазвичай виділяються уздовж ліній зближення і площини ковзання, тому збільшення вмісту водню в металі різко знижує його в'язкість. З підвищенням температури здатність титану утворювати гідриди зменшується, тому розчинність водню в титані зменшується. Однак від температури 400 °С швидкість адсорбції зростає. При високих температурах рівновага в титан-водневій системі встановлюється швидше, ніж при низьких, незважаючи на те, що більш високі температури відповідають меншій розчинності водню.

Домішки вкладення - гази викликають крихке руйнування з'єднань, підвищують їх схильність до утворення холодних тріщин, уповільнене руйнування і чутливість до розрізу.

Стійкість титану до холодного розтріскування при зварюванні зменшується зі збільшенням водню, азоту і кисню. Найсильніший шкідливий вплив водню обумовлено гідридним перетворенням, яке відбувається при зміні обсягу.

Пластичність металу також залежить від вмісту кисню і азоту.

Тріщини найчастіше виникали в тих з'єднаннях, де порушували технологію захисту шва в процесі зварювання. Відпал після зварювання зменшує залишкові напруги і усуває схильність зварних швів з часом розтріскуватися. Встановлено, що вміст газових домішок в металі шва на титані не повинен перевищувати 0,12-0,15% по масі O_2 , 0,03-0,04% по масі N_2 і 0,01 - 0,015% по масі H_2 .

Водень і кисень можуть викликати пористість металу зварного шва. Пори в швах - найпоширеніший дефект з'єднання при зварюванні титанових сплавів. Основною причиною пористості є водень, присутній в зварюваному металі в зоні дуги. Встановлено, що пори утворюються в результаті зміни розчинності водню в металі з підвищенням температури. Існує гіпотеза, що кисень також може викликати пористість, взаємодіючи з воднем. Азот без домішок інших газів не викликає утворення пор.

Встановлено, що зварні шви на двофазних сплавах $\alpha+\beta$ більш схильні до утворення пор, ніж на однофазних β -сплавах. Зі збільшенням числа проходів

					КР.131.6121м.05.01.ПЗ	Арк.
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

в багат шарових швах збільшується кількість пір. Пористість у зварних швах залежить від теплоти, що надходить під час зварювання: зі збільшенням тепловіддачі до певної межі кількість пір різко збільшується. При зварюванні стисненою дугою утворення газових порожнин в металі шва обумовлено порушенням динамічної рівноваги між тиском дуги і гідростатичним тиском рідкого металу, в хвостовій частині зварювальної ванни - можливим відхиленням дуги від норми і т.д. Пористість негативно позначається на циклічній міцності зварних швів з титанових сплавів. Пори також знижують статичну міцність з'єднань, що особливо помітно на β -сплавах типу ВТ15.

У зв'язку з тим, що в промисловості відсутні неруйнівні методи випробування газонасичених шарів безпосередньо на зварній конструкції, особливу увагу слід приділити захисту зварюваної деталі або зони зварювання від взаємодії з повітряною атмосферою. Існує три основні методи захисту: загальний захист деталі, локальний захист і струминний захист.

Для зварювання високоміцних титанових сплавів найбільш доцільно використовувати камери із загальним і місцевим захистом. Краще використання камер із загальним захистом всієї деталі, так як забезпечується надійний захист і виключаються випадкові порушення. При такому способі захисту можна контролювати склад атмосфери за допомогою спеціальних приладів - газоаналізаторів. Особливо це важливо при зварюванні високоміцних титанових сплавів.

Крім високої хімічної активності титану при підвищених температурах, складність зварювання обумовлює схильність зерна до зростання при нагріванні металу вище критичних температур і $\rightarrow$ до перетворення. У початковий момент зростання зерна відбувається за допомогою різкого переміщення кордонів. Зі збільшенням розміру зерен їх зростання сповільнюється, але з підвищенням температури збільшення зерен знову прискорюється.

Зростання зерен на ділянках зони термічного впливу, прилеглих до лінії плавлення, сприяє зниженню міцності і пластичності зварних з'єднань.

Крупнокристалічна структура металу шва і навколошовної зони на титанових сплавах викликає серйозні труднощі при загартовуючій термічній обробці. Як відомо, крупнозерниста структура термодинамічно менш стійка і може призводити до небажаних змін властивостей при подальших обробках.

Поряд з перерахованими вище основними факторами, що впливають на властивості зварних з'єднань при зварюванні титанових сплавів, необхідно враховувати початковий фазовий склад основного металу, α -сплави титану зварюються практично так само, як і технічний титан, α -стабілізатори не вносять принципових змін в мікроструктуру металу зварного шва і пришовної зони в порівнянні зі швами на технічному титані. Двофазні титанові сплави, до складу яких входять як α -стабілізатори, так і β -стабілізатори, можна розділити на низько- і середньолеговані. У низьколегованих сплавах вміст β -стабілізаторів зазвичай знаходиться в межах їх розчинності в α -фазі, тому їх зварюють так само, як і титанові α -сплави.

Підвищення концентрації β -стабілізаторів в середньолегованих сплавах викликає труднощі при їх зварюванні. Оскільки кінцеві продукти розпаду легованої β -фази залежать від швидкості охолодження, середньолеговані сплави $\alpha+\beta$ стають чутливими до термічних зварювальних циклів, що також відбивається в підвищеній схильності до утворення холодних тріщин у зварному шві та зоні зварювання.

При зварюванні сплавів, що містять β -стабілізатори, виявлена їх схильність до зміцнення в пришовній зоні, що супроводжується значним підвищенням твердості. Сплави стають схильними до загартування, коли вміст β -стабілізуючих елементів перевищує їх межу розчинності α -фази. Причому евтектоїдоутворюючі елементи мають в цьому відношенні більш різку дію в порівнянні з β -ізоморфними. При зварюванні високоміцних сплавів на основі нестійкої β -фази необхідно враховувати також їх чутливість до режимів зварювання. Зварні з'єднання таких сплавів схильні до холодного розтріскування і крихкості після загартовуючої термічної обробки.

Висока температура плавлення титану вимагає використання концентрованих джерел нагріву. Низька теплопровідність титану призводить до більш низької ефективності джерела нагріву в порівнянні зі зварювальними сталями.

Пори і холодні тріщини в титанових зварних швах викликані шкідливими домішками газів і водню. Тому необхідно забезпечити чистоту основного металу і зварювальних витратних матеріалів, в тому числі присадних проводів. Поблизу температури плавлення поверхневий натяг титану в 1,5 рази вище, ніж у алюмінію, що дозволяє формувати корінь зварного шва за допомогою ваги. Однак розплавлений метал має низьку в'язкість, і при неправильній збірці деталей можуть виникнути пропали.

Великий досвід виробництва підтверджує, що титанові сплави не схильні до гарячих тріщин при зварюванні. Випадків кристалізації тріщин при зварюванні різних зразків і конструкцій з високолегованих титанових сплавів не зафіксовано.

При зварюванні високолегованих титанових сплавів необхідно враховувати процеси ліквідації в зоні зварного шва, які можуть істотно змінити умови кристалізації металу шва.

При зварюванні високоміцних сплавів виникають додаткові труднощі, обумовлені специфікою фазових і структурних перетворень, що відбуваються під впливом зварювального термічного циклу і часто призводять до крихкості швів. Численні дослідження, проведені в останні роки, показують, що підібравши відповідні методи і розробивши оптимальні параметри режимів зварювання і подальшої термічної обробки, в ряді випадків можна подолати виникаючі труднощі і отримати працездатні зварні з'єднання. Завдяки цьому перспективним є використання високоміцних титанових сплавів у виробництві термозміцнених зварних виробів.[8, 14]

Стосовно до деталей з титанових сплавів, що використовуються в компресорах газотурбінних двигунів маємо наступні додаткові моменти, які необхідно врахувати.

Таблиця 1.5. Порівняння зварюваності окремих титанових сплавів.[7]

марка	зварюваність	Технологічні особливості зварювання
BT1-00, BT1-0, OT4-0, OT4-1	добра	Зачистка кромки, режим з <i>min.</i> погонною енергією
OT4, BT5, BT5-1	задовільна	
BT6, BT3-1, BT9, BT14, BT16, BT20	обмежена	М'який режим з малими швидкостями охолодження
BT22		Наступна термообробка
ПТ-7М, ПТ3-В, ПТ1-М	добра	Режим з високою швидкістю охолодження

Диски барабану роторів на підставі багатолітнього досвіду та розрахунків в Україні виготовляють з високолегованих мартенситних сталей ЭП609 або ЭП517, а також титанових сплавів BT3-1, BT-8, BT-9 та інші. [2]

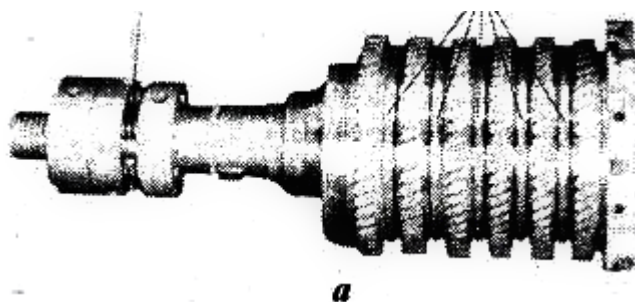
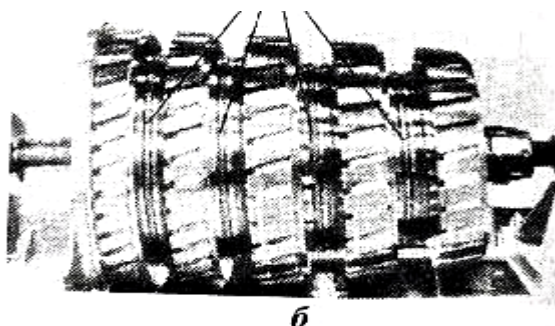


Рис.1.6 Загальний вид роторів КВТ та КНТ [2]:

а) суцільнозварний ротор КВД (титановий сплав BT3-1)



б) суцільнозварний ротор КНД (сплав ЭП609)

Як показала практика, суцільнозварна конструкція ротора більш технологічна та надійна у порівнянні з механічним з'єднанням дисків. Це підтверджено експлуатацією більш ніж 8000 роторів.

Ідеальним варіантом для даної конструкції з точки зору її технічних і технологічних можливостей є електронно-променеве зварювання (ЕПЗ), що дозволяє дозовано впорскувати енергію в стик, глибоке одностороннє проникнення, невелика зона термічного впливу (ЗТВ), мінімальні деформації, надійний захист зварювальної ванни – це основні переваги ЕПЗ.

Можна без перебільшення зазначити, що великим досягненням зварювального виробництва є створення суцільнозварних роторів газових турбін з титанових сплавів ВТЗ-1 і ВТ-8 і високолегованих мартенситних сталей ЕП609 і ЕП517. [2]

1.4. Висновки, мета та завдання магістерської роботи. Визначення програми дослідження.

Головним напрямком модернізації сучасних та проектування перспективних газотурбінних двигунів (ГТД) є підвищення їх потужності та коефіцієнту корисної дії (ККД), цей шлях неодмінно призводить до підвищення робочих температур та навантажень на деталі ГТУ. Підвищення робочих параметрів викликає пришвидшене зношування деталей, що може призвести до зниження ефективності установки або навіть її поломки.

Сучасний ГТД є високотехнологічним і дорогим виробом, тому процедура його ремонту тягне за собою значні фінансові та трудові витрати. В зв'язку із цим надзвичайно актуальним є питання подовження ресурсу роботи двигуна, а також підвищення його ремонтпридатності.

Одним із шляхів вирішення цієї проблеми є підвищення експлуатаційних характеристик з'єднання дисків роторів шляхом застосування зварних з'єднань дисків з різних сплавів. Ще однією перевагою даної технології є можливість її використання під час ремонту двигуна для відновлення деталей ротора, зношених в процесі експлуатації. Як показує практика, відремонтований двигун не поступається новому, при цьому реальна економія складає 35...70% від вартості нового двигуна.

Розвиток сучасного газотурбобудування ставить певні вимоги перед матеріалами, які використовуються в процесі виробництва ГТД. Провівши аналіз робочих параметрів титанових сплавів та особливостей їх структури і особливостей функціонування, можна зробити наступні висновки:

1. Для підвищення ремонтпридатності та робочих параметрів компресора необхідно розробляти та впроваджувати технології зварювання

деталей з титанових сплавів, схожих за структурами і фазовими перетвореннями.

2. Особливості титанових сплавів задають певні проблеми під час зварювання. Хімічна активність титану до газів із складу повітря та фазові структурні перетворення при нагріванні змушують ретельно розглядати зварювально-технологічні властивості титанових сплавів.

3. Метод з'єднання деталей з титанових сплавів (зокрема дисків роторів компресорів ГТД) механічним способом не задовольняє всім технологічним та експлуатаційним вимогам при виготовленні вузлів ГТД.

Актуальним залишається питання вивчення та розробки методів зварювання деталей ГТД з різних сплавів, що з одного боку забезпечувало б необхідний рівень високотемпературної зносостійкості, а з іншого - не викликало проблем в процесі зварювання. Розрахунок подібного методу і є метою даної магістерської роботи. Для досягнення мети проекту необхідно вирішити наступні завдання:

1. Проаналізувати на підставі літературних даних наявні способи зварювання титанових сплавів та їх вплив на механічні властивості зварних з'єднань.

2. Провести вибір оптимальної технології зварювання дисків із титанових сплавів BT3-1 та BT-9 компресора газотурбінного двигуна та режимів зварювання.

3. Визначити методи контролю якості зварних з'єднань.

4. Дослідити механічні властивості отриманого зварного шву.

5. Дослідити будову мікроструктури отриманого зварного шву. Провести металографічні дослідження, виявити структурні особливості окремих фаз та їх вплив на фізичні властивості зварного шву.

6. Дослідити схильність отриманого зварного шву до зварювальних деформацій та до охрупчування.

7. Оцінити економічну доцільність вибраного способу зварювання титанових сплавів для ГТД на виробництві.

2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ ЯКОСТІ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ

Методи контролю якості зварних з'єднань.

Показники якості зварних з'єднань визначаються тією або іншою сукупністю наступних властивостей: міцністю, надійністю, відсутністю дефектів, структурою металу шва та біляшовної зони, корозійною стійкістю, кількістю та характером виправлень тощо.

Приймальний контроль включає перевірку зовнішнього вигляду виробу та визначення його розмірів (візуальний контроль). Для відповідальних зварних виробів проводять випробування. Випробування поділяють на *руйнівні та неруйнівні*.

Неруйнівні випробування називають фізичними методами контролю. До них відносять: радіографічний, радіохвильовий, ультразвуковий, магнітний, вихрострумний, акустичний, капілярний, контроль герметичності та ін.

Руйнівні випробування дозволяють оцінити прямим шляхом показники якості зварних виробів.

До руйнівних випробувань відносять: механічні випробування, аналіз хімічного складу, випробування на корозійну стійкість.

Згідно нормативних документів, для титану та його сплавів після зварювання достатньо проведення наступних досліджень:

- механічні дослідження, для з'ясування міцності зварного з'єднання та твердості шву;
- спектральний аналіз, для визначення хімічного складу матеріалу та шву;
- металографічні дослідження, де ведеться пошук макро- та мікродефектів, та визначається мікротвердість.

Ці випробування, як правило, проводяться на вибіркових натурних зразках або на спеціальних виробах, підготовлених для випробувань і виготовлених за стандартною технологією.

					КР.131.6121м.05.02.ПЗ								
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата									
Студент	Сичов				МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ ЯКОСТІ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ				Літ.	Аркуш	Аркушів		
Керівник	Костін										30	98	
Консул.									НУК ім.адм.Макарова				
Н. Контр.													
Зав.каф.	Драган												

2.1. Дослідження механічних властивостей та твердості зварного шву. Спектральний аналіз.

Випробування на одновісне статичне розтягнення.

Одновісне статичне випробування на розтяг є одним з найбільш поширених видів механічних випробувань. Ретельно підготовлений екземпляр поміщають в захвати потужної машини, яка прикладає до нього розтягуючі зусилля. Форма і розрив циліндричного зразку після випробувань показано на рис. 2.1.



Рис.2.1 – Форма і розрив циліндричного зразку після випробувань на одновісне статичне розтягнення.



Рис. 2.2 – Стенд на одновісне статичне розтягнення при кімнатній та підвищеній температурі (система вимірювання параметрів досліджень Instron 3382).

Виробник, дата	Діапазон вимірювань	Показники точності
Модель Instron 3382 Instron Corp. США 2007	Максимальне навантаження – 100 кН, Швидкість переміщення захватів – 0,005-500 мм/хвил. Повне переміщення траверси – 1235 мм, Діапазон температур – 20-1000°C, Швидкість збору даних – 8 кГц	Похибка заміру навантаження $\pm 0,5\%$ від показника, Похибка заміру напруг $\pm 0,5\%$ від показника

Під час випробування визначають міцність найслабшої ділянки стикового або внахлестового з'єднання або міцність металу шва в стиковому з'єднанні.

Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КР.131.6121м.05.02.ПЗ

Арк.

31

Одновісне статичне випробування на розтяг проводиться відповідно до ГОСТ 6996-66 «Зварні з'єднання. Методи визначення механічних властивостей».

Випробування на довготривалу міцність.

Довготривала міцність - це стійкість матеріалу до механічних руйнувань під впливом тривало прикладеного постійного навантаження при високій температурі.

Розрізняють тривалу міцність на розтяг, кручення та вигин, а також складні напружені стани, такі як розтяг і вигин, міцність на розрив і кручення.

Суть методу полягає в доведенні зразка до руйнування під впливом постійного розтягуючого навантаження при постійній температурі.

В результаті випробувань визначається тривала межа міцності на розрив, тобто напруга, що викликає руйнування металу за певний час випробувань при постійній температурі, або (при прийманні та інших контрольних випробуваннях) встановлюється контрольна характеристика - час до руйнування при заданому напруженні, яке дорівнює або перевищує норму часу, зазначену в стандартах або технічних умовах на металеві вироби.



Рис.2.3. Стенд
(маятниковий копер МК-30) для випробувань на ударну в'язкість і металеві зразки після випробувань.

Характеристики маятникового копера типу МК-30

Найбільший запас енергії маятника – 30 кгм,	Ціна розподілу шкали – 0,2 кгм
Допустимі втрати енергії - +0,1 кгм	Необхідне місце виліту маятника в обидві сторони – 2100 мм
Число ступенів запасу енергії – 16,	Вага копра – 340 кг
Відстань між опорами – 40...100 мм	Вага молота – 21,03 кг
Кут профілю ножа - 45°	

Випробування на довготривалу міцність проводиться відповідно до ГОСТ 10145-81 (ISO 1099) «Метали. Метод дослідження на тривалу міцність».

Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КР.131.6121м.05.02.ПЗ

Арк.

32

Визначення твердості дослідних матеріалів.

В дипломній роботі випробування твердості дослідних матеріалів проводилось за **Брінеллем**.

Сутність метода полягає у тому, що у поверхню зразка за допомогою твердоміра Брінелля втискають сталюну загартовану кульку (*індентор*) діаметром D , який може бути рівним 2,5; 5 або 10 мм. Діаметр кульки вибирають у зворотній залежності від очікуваної твердості (табл. 2.1). Внаслідок пластичної деформації поверхневих шарів зразка отримується відбиток у вигляді сферичної лунки діаметром d (рис. 1.1).

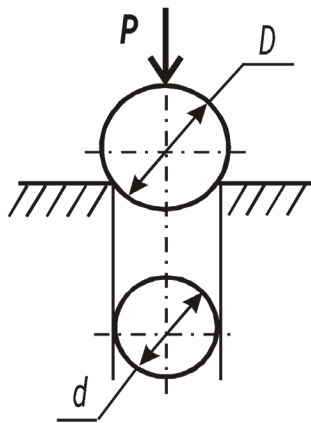


Рис. 2.4. Схема визначення твердості за Брінеллем.

Діаметр відбитка визначається спеціальною лупою, яка має шкалу з ціною поділки 0,02 мм.

Число твердості за Брінеллем **HB** визначають як відношення величини навантаження P , яким втискали кульку, до площі поверхні отриманого сферичного відбитка (лунки), F :

$$HB = P / F = 2P / \pi D \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right) \quad (2.1)$$

Щоб не проводити аналітичних обчислень за формулою (2.1), на практиці часто користуються стандартною таблицею, в якій наведена залежність числа твердості **HB** від d , D і P .

Таблиця 2.1. Параметри випробувань при визначенні твердості за Брінеллем.

Матеріал	Інтервал твердості за Брінеллем, МПа	мін. товщина зразка, мм	Діаметр кульки, D , мм	Співвідношення між P , кгс і D , мм	Навантаження P		Час витримки, с
					кгс	H	
Чорні метали	1400...1500	6...3	10	$P=30D^2$	3000	29430	10
		4..2	5		750	7357	
		<2	2,5		187,5	1839	
	<1400	>6	10	$P=10D^2$	1000	9810	10
		6...3	5		250	2452	
		<3	2,5		62,5	613	
Кольорові метали	350...1300	9...6	10	$P=10D^2$	1000	9810	30
		6...3	5		250	2452	
		<3	2,5		62,5	613	
	80...350	>6	10	$P=2,5D^2$	250	2452	60
		6...3	5		62,5	613	
		<3	2,5		15,6	153	

Залежність між границею міцності та твердістю за Брінеллем записується у вигляді $\sigma_e = K \cdot HB$, (2.2)

де HB – твердість за Брінеллем, МПа; K – коефіцієнт пропорційності ($K=0,35$ – для сталі; $0,55$ – для міді та її сплавів у відпаленому стані; $0,4$ – для міді та її сплавів після наклепу). Таким чином, знаючи твердість матеріалу, можна оцінити й інші його характеристики. Умови визначення твердості за Брінеллем регламентуються стандартом ГОСТ 9012-59 (ISO 410-82, ISO 6506-81).

Сучасні твердоміри для визначення твердості за Брінеллем можуть бути *універсальними* (один прилад для визначення твердості за Брінеллем та Роквеллом). Як правило, робоче зусилля в ньому створюється також за рахунок ваги гирь, однак привід силового механізму здійснюється не від електродвигуна через кулачок, а важелем від руки. [29]



Рис.2.5. Твердомір Брінелля ТШ-2М

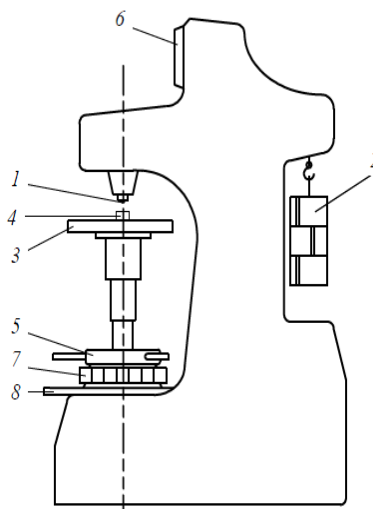


Рис. 2.6. Твердомір Роквелла ТК-2:

1 – індентор; 2 – вантажі; 3 – стіл; 4 – зразок; 5 – шків; 6 – індикатор; 7 – барабан; 8 – пускова клавіша



Характеристики твердоміра ТШ-2М

Межі вимірювань твердості – 8...450 НВ, Випробувальні навантаження – 187,5; 250,0; 750,0; 1000,0; 3000,0 кг	Відхилення твердості від еталону 2 розряду МТБ – при НВ 100±25 і навантаженні 1000±5% - при НВ 200±50 і навантаженні 3000±4%
Межа допустимої похибки навантажень ±1%, Діаметри шариків – 2,5; 5; 10 мм	Тривалість заміру під навантаженням - 10±2; 30±4; 60±6 сек

Спектральний аналіз металів.

Метод атомного емісійного спектрального аналізу дозволяє визначати хімічний склад речовини за спектрами випромінювання. Аналізований матеріал диспергує під дією джерела збудження (електрична дуга або іскра,

Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КР.131.6121м.05.02.ПЗ

Арк.

34

полум'я, плазма). На короткий (близько 10-7с) проміжок часу електрони атомів або іонів речовини, що випарувалась, переходять на більш високі енергетичні рівні і повертаються в стійкий не збуджений стан. При цьому відбувається виділення енергії у вигляді випромінювання з певною довжиною хвилі, характерною даному енергетичному переходу.

В результаті виникає серія спектральних ліній, властивих певному хімічному елементу, яка може бути зареєстрована за допомогою оптичних приладів. Довжина хвилі випромінювання, реєстрованого в атомному аналізі, знаходиться в межах від 150 до 800 нм.

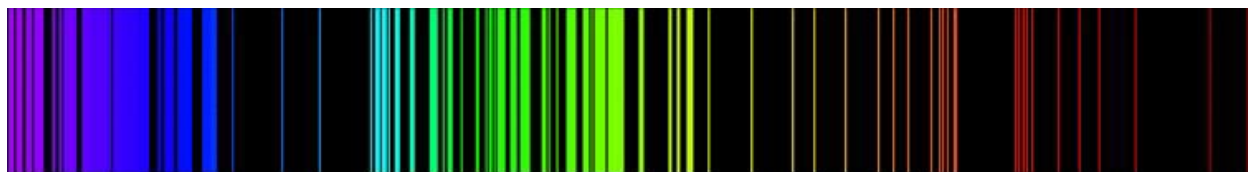


Схема пристрою спектрометра (рис. 2.7) з фотопомножувачем демонструє загальні принципи формування і реєстрації атомних спектрів:



Рис.2.7. Схема пристрою спектрометра



Рис.2.8. Спектрометр SPECTROLAB M10

Характеристики - Спектрометр SPECTROLAB M10 (рис.2.8.) – іскрово-дуговий емісійний спектрометр для хімічного аналізу.

Конфігурація та технічні характеристики	Спектральна емісійна система (джерело іскри, дуги), мультиоптична система, спектральний діапазон довжин хвиль (120~800 нм), базовий аналіз Fe, Al, Cu, Mg, Ti, Zn, канал аналізу (101 канал), багатоелементний одночасний аналіз
Сфера застосування	Кількісний аналіз компонентів зразка сталі та кольорових металів, управління процесом плавлення та вимірювання сегрегації на поверхні зразка

2.2. Металографічні дослідження, де ведеться пошук макро- та мікродефектів, визначення мікротвердості.

Металографічні дослідження – це комплекс випробувань та аналітичних заходів, спрямованих на вивчення макро- та мікроструктури металів. Дослідження закономірностей формування структури і встановлення залежності впливу структури на механічні, фізико-механічні, електричні та інші властивості металу.

Макроскопічний аналіз структури металів і зварних з'єднань виконується неозброєним оком, із застосуванням лупи, або оптичного мікроскопу що дає збільшення від 5 до 50 разів. Макроаналіз дає можливість виявляти: раковини; шлакові включення; порушення суцільності металу; тріщини та інші дефекти будови сплаву; хімічну і структурну неоднорідність; відхилення геометрії шва.

Мікроскопічний аналіз металів і зварних з'єднань полягає в дослідженні їх структури за допомогою оптичного або електронного мікроскопів на спеціально підготовлених зразках. Методами мікроаналізу визначають форму і розміри кристалічних зерен, виявляють зміни внутрішньої будови сплаву під впливом термічної обробки або механічного впливу на сплав, мікротріщини.

В дипломній роботі макроаналіз проводився на стереомікроскопі Carl Zeiss (Stemi 2000), а мікроаналіз проводився на металографічному інверторному мікроскопі Carl Zeiss Axiovert 40. З його допомогою можна розглядати мікрошліфи, проводити фотографування мікроструктури. Загальний вид мікроскопів приведений на рисунку 2.8.(а, б)



а) Стереомікроскоп Carl Zeiss (Stemi 2000) для макроаналізу



Металографічний мікроскоп Carl Zeiss Axijvert 40

Характеристики – цифровий металографічний інверторний мікроскоп Carl Zeiss Axijvert 40

Конфігурація та технічні характеристики	Універсальний світловий мікроскоп. Можливі методи мікроскопії: світлове поле, темне поле, фазовий контраст, Varel-контраст. Збільшення, крат 50х – 1000х Збільшення об'єктивів, крат 5, 10, 20, 50, 100 (опціонально довгофокусне, флуоресцентне)
Сфера застосування	Дослідження мікроструктур і контролю якості матеріалів в лабораторіях на виробництві і наукових інститутах

Порядок проведення дослідних робіт:

1. Для дослідження мікроструктури необхідно приготувати мікрошліф. Мікрошліфом називають невеликий зразок металу, який має оброблену поверхню для мікроаналізу.

2 Вибір проби шліфа. Процес підготовки мікрошліфа починається з вирізування з деталі, зливка чи виливка зразка металу невеликих розмірів. Найзручніші розміри 15х15х15 мм, або циліндрики діаметром 10-20 мм.

3 Попередня обробка. Після вирізування зразка потрібну для дослідження поверхню необхідно вирівняти зробити плоскою за допомогою наждачного круга та терпуга.

4. Шліфування. Одержану плоску поверхню зразка шліфують наждачним папером різної зернистості.

Після шліфування на поверхні зразка залишаються абразивні частки, які необхідно стерти спиртом.

5. Полірування. Матова поверхня готового до полірування зразка не повинна мати глибоких рисок. При механічному поліруванні застосовуються обертові круги, обтягнені полірувальним матеріалом. Після полірування зразок повинен мати дзеркальну поверхню, вільну від рисок при дослідженні його при будь-якому збільшенні мікроскопа.

6. Травлення. Поверхню полірованого зразка після обстеження під мікроскопом протравлюють для виявлення границі зерен, фазових та структурних складових. Найбільш універсальними реагентами для виявлення мікроструктури титану і його сплавів є ті, які містять плавикову кислоту. Одним з таких є реагент наступного складу: HCl – 16,6 %; HNO₃ – 16,6 %; HF – 16,6 %; H₂O – 50 %.

					KP.131.6121м.05.02.ПЗ	Арк.
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

Методика дослідження мікроструктури дослідних матеріалів

Особливості будови мікроструктури визначаються за допомогою методів рентгеноспектрального аналізу (РСА) та растрової електронної мікроскопії.

Метою РСА є встановлення відповідності між атомною структурою дослідного зразка та просторовим розподілом рентгенівського випромінювання, розсіяного зразком. Таким чином метод РСА заснований на явищі дифракції рентгенівського випромінювання. Основною для розрахунків виступає формула Вульфа-Брегга:

$$d = \lambda / 2 \sin \theta \quad (2.3)$$

де d – відстань між площинами у сукупності кристалічних площин; θ – кут між хвильовим вектором падаючої хвилі; λ – довжина хвилі випромінювання.

В процесі аналізу рентгенівське випромінювання реєструється лічильником імпульсів, який реєструє кількість імпульсів, записаних на рентгенограму за допомогою цифродрукарного пристрою. Після отримання рентгенограми за формулою Вульфа-Брегга вираховується величина d , потім за таблицею проводиться ідентифікація фаз, тобто порівняння власних експериментальних значень міжплощинних відстаней із табличними еталонними значеннями.

Рентгеноструктурний аналіз можна проводити на дифрактометрі ДРОН-3, на трубці з мідним випромінюванням CuKa довжиною хвилі $\lambda_{\text{ср.}} = 1.54178 \text{ \AA}$ із використанням Ni β -фільтру. Обертання зразків в інтервалі подвійних кутів від 30 до 115° при напрузі трубки 45 Кв, струм накалу 30 мА. Швидкість розгортки 1 град/хв та швидкість руху діаграмної стрічки 60 мм/год, шкала приладу встановлювалась на 250 імп/с.

Растрові електронні мікроскопи (РЕМ) із системою мікроаналізу широко використовуються у матеріалознавстві для дослідження поверхні твердих металічних та неметалічних зразків.

Зображення в растровому електронному мікроскопі отримують, скануючи пучком первинних електронів зонду поверхню зразку. Для такого

сканування в конструкції РЕМ є система відхилення променя, яка складається із електромагнітних котушок, які розштовхують пучок первинних електронів (зонд) із боку в бік. Таким чином, електронний зонд сканує поверхню об'єкту рядок за рядком, формуючи растрове зображення об'єкту.

При попаданні первинного електронного променя в яку-небудь точку зразку відбувається вибивання із його матеріалу вторинних електронів і вихід відображених електронів первинного пучка. Обидва види сигналу реєструються відповідними детекторами, які виводять результат на екран монітору. Яскравість зображення точки на екрані залежить від кількості виходів електронів. Високий вихід електронів із зразку дає світлу точку зображення на екрані, малий вихід відповідає темній точці. Величина сигналу визначається струмом зонду, топографією поверхні, елементним складом, кристалографічною структурою та іншими властивостями.

Для проведення електронного мікроаналізу можна використовувати растровий електронний мікроскоп-мікроаналізатор РЭММА 102-02. Типова блок-схема обладнання зображена на рис. 2.9.

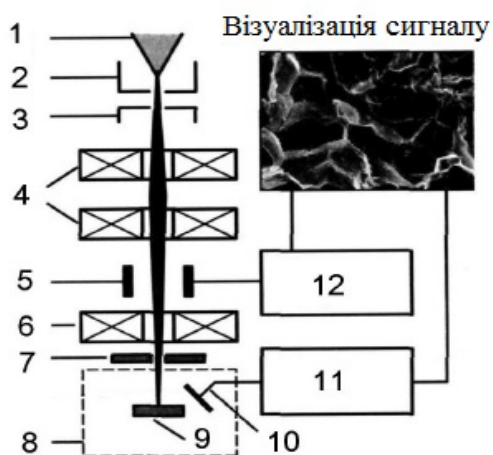


Рис. 2.9 - Схема растрового електронного мікроскопу: 1 – катод; 2 – керуючий електрод; 3 – анод; 4 – конденсаторні лінзи; 5 – система відхилення електронного променя; 6 – об'єктивна лінза; 7 – діафрагма; 8 – робоча камера; 9 – зразок; 10 – детектор вибитих із зразку електронів; 11 – підсилювач відеосигналу; 12 – генератор сканування.

Вимірювання мікротвердості.

Випробування на мікротвердість використовується при випробуванні на твердість окремих фаз і структур сплаву, дрібних деталей приборів, тонких напівфабрикатів (смуги, фольги, дроти), тонких шарів, отриманих в результаті хіміко-термічної обробки (цементування, азотування, ціанування і т.і.), поверхневих шарів металу, що змінили свої властивості в результаті зняття

стружки, тиску, тертя. Мікротвердість визначається вдавленням алмазної пірамідки. Для випробування на мікротвердість використовується прилад ПМТ-3 (рис. 2.10).



Рис. 2.10. Прилад ПМТ-3

Технічні характеристики ПМТ-3:

Збільшення $\times 130 \times 150 \times 800$;

Діапазон навантажень становить 0,0196–4,9 Н;
0,002–0,500 кг.

Вимірювання мікротвердості проводиться відповідно до ГОСТ 9450-76 «Вимірювання мікротвердості шляхом вдавлення алмазних наконечників».

Висновки.

1. Для виявлення стійких зв'язків між будовою шву зварного з'єднання та його фізичними і експлуатаційними характеристиками необхідно застосувати комплекс науково-дослідних методів, що можуть із необхідною точністю описати мікроструктуру та будову зварного з'єднання.

2. Для з'ясування міцності зварного з'єднання з титанових сплавів використовуємо руйнівні механічні дослідження, визначаємо твердість шву методом Бринелля та проводимо спектральний аналіз для визначення хімічного складу дослідного матеріалу.

3. Для вивчення мікроструктури сплаву використовуються методи рентгеноспектрального аналізу та растрової електронної мікроскопії. Ці методи дозволяють вивчити внутрішню будову сплавів, дослідити склад його фаз. Це дозволяє встановити вплив мікроструктури на фізичні та механічні характеристики дослідного матеріалу.

3. ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ЗВАРЮВАННЯ ДИСКІВ БАРАБАНА РОТОРА ІЗ СПЛАВІВ ВТЗ-1 + ВТ9 КОМПРЕСОРА ГАЗОТУРБІННОГО ДВИГУНА.

3.1. Огляд і аналіз способів зварювання титанових сплавів.

При виготовленні конструкцій з титанових сплавів застосовують такі способи зварювання: *дугове зварювання в середовищі захисних інертних газів, автоматичне під флюсом, електрошлакове зварювання, електронно-променеве, лазерне, плазмове, контактне, дифузійне, холодне, вибухом, тертям*, тощо [13].

Кожен з цих способів зварювання є раціональним для певного діапазону товщини і конструкцій виготовлених деталей [16]. Технології виконання зазначених способів у більшості випадків ідентичні заварюванню сталей, однак з урахуванням ізоляції зварювальної ванни, підготовки поверхні під зварювання та інших проблемних питань зазначених у п.1.3. і описані у багатьох довідниках і підручниках.

Тому, доцільно скористуватися коротким описом зазначених способів і більш детальному освітленню вибраного способу та режимів зварювання за темою дипломної роботи.

Підготовка деталей з титану до зварювання. [15, 16]

Якість зварних з'єднань багато в чому визначається технологією підготовки кромek деталей і титанового дроту до зварювання.

Операції підготовки вибираються в залежності від початкового стану заготовки. Плоскі листові заготовки, вирізані ножицями, деталі простої форми, виготовлені методом холодного штампування і т.д., готують до зварювання механічною обробкою кромek (п'ятий-шостий класи чистоти).

Деталі, що зварюються, ріжуться механічним способом. Газове різання і плазмова різка також можуть використовуватися в якості попереднього

					КР.131.6121м.05.03.ПЗ							
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата								
Студент	Сичов				ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ЗВАРЮВАННЯ ДИСКІВ БАРАБАНА РОТОРА ІЗ СПЛАВІВ ВТЗ 1 + ВТ9 КОМПРЕСОРА ГАЗОТУРБІННОГО ДВИГУНА			Літ.	Аркуш	Аркушів		
Керівник	Костін									41	98	
Консул.								НУК ім.адм.Макарова				
Н. Контр.												
Зав.каф.	Драган											

методу різання з подальшою механічною обробкою кромок. Зняття поверхневого шару після полум'яного різання на глибину ≥ 1 мм дозволяє отримати якісне зварне з'єднання. Обробка кромок титанових сплавів принципово не відрізняється від обробки, що застосовується для сталей.

Зварювання деталей з титанових сплавів проводиться після зняття газонасиченого (альфованого) шару. Така обробка повинна застосовуватися до деталей, виготовлених методом пластичної деформації (штампування, поковки і т.і.), а також деталей, що пройшли термічну обробку в печах без захисної атмосфери.

Видалення альфованого-шару травильними речовинами включає:

1. Попереднє розпушення альфованого-шару дробом або піскоструминною обробкою, шабером.
2. Поверхні кромок деталей протравлюють при $t=60-65^{\circ}\text{C}$ протягом 5-10 хв з використанням розчину, що містить (в %): 40 HF, 40 HNO₃, 20 H₂O или 50 HF и 50 H₂NO₃; або що складається з кислот в пропорції 13:7:1 : а) соляна кислота HCl – 350 мл; б) дистильована вода – 650 мл; в) фторид натрію – 50 г. Збільшення часу травлення вище оптимального рівня призведе до розпушення поверхневих шарів металу, підвищеної сорбції інгредієнтів середовища і підвищеного утворення пір при зварюванні.
3. Подальша зачистка країв через 10...15 мм з кожного боку металевими щітками або скребками для зняття тонкого шару металу, насиченого воднем, при травленні.

Перед початком складальних і зварювальних робіт необхідно очистити деталі від бруду металевою щіткою і знежирити органічним розчинником. В якості органічних розчинників можна використовувати ацетон і бензин. Рекомендується наступна технологія знежирення: промивання зварюваних кромок і прилеглих до них поверхонь шириною ≥ 20 мм (бязевими, волосяними або капроновими щітками) бензином В-70 з подальшою промивкою спиртом-ректифікатом. Допускається промивання ацетоном.

При складанні титанових конструкцій під зварювання необхідно дотримуватися таких особливостей:

					КР.131.6121м.05.03.ПЗ	Арк.
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

1. У зв'язку з плинністю і високим коефіцієнтом поверхневого натягу розплавленого титану необхідно забезпечити високу якість зборки;
2. Виключити правку і підгонку деталей за допомогою місцевого локального нагріву газовим полум'ям;
3. Враховувати складність правки і підготовки деталей в холодному стані через значну пружність титану;
4. Надійно захищати шви при зварювання плавленням від доступу повітря з обох боків зварного шва навіть при виконанні прихваток.

Безпосередньо перед зварюванням проводять механічне очищення стику і прилеглих ділянок (шириною до 25 мм) зачищають металевою щіткою, наждачним папером №12 до характерного блиску, після чого знежирюють спиртовмісними складами. Механічне видалення альфаваного-шару (шабрування) безпосередньо перед зварюванням забезпечує кращі результати.

Дугове зварювання - в середовищі захисних інертних газів електродом, що плавляється і не плавляється.

Це найбільш розповсюджений спосіб зварювання титану завдяки доступності обладнання. На практиці більше 90% всіх з'єднань виконуються аргонодуговим і електронно-променевим зварюванням. Найчастіше використовуються схема зварювання TIG (аргонодугове зварювання), та схема MIG / MAG. [16]



Рис. 3.1. Схема TIG зварювання неплавким електродом.

В промисловості застосовують автоматичне, механізоване і ручне зварювання неплавким електродом, безперервно палаючою дугою і імпульсною дугою, а також автоматичне і механізоване зварювання плавким електродом. Для зварювання титану може використовуватися стандартне

зварювальне обладнання, оснащене додатковими пристроями для захисту зони зварювання, а також спеціалізованими зварювальними пальниками і установками.

Найбільш поширеним способом дугового зварювання титану є зварювання вольфрамовим неплавким електродом в інертних газах. Цей спосіб є найбільш універсальним, так як дозволяє проводити зварювання в різних просторових положеннях, в умовах обмеженого простору, а також швидко переналаштовувати обладнання при зміні товщини зварюваного металу і типу з'єднання.

Якість зварних з'єднань визначається головним чином надійністю захисту зони зварювання і чистотою інертного газу. Для захисту дуги і тепла розплавленої ванни необхідно використовувати аргон вищого сорту.

Титан зварюють напівавтоматичним плавким електродом в аргонгелієвому середовищі в співвідношенні 20:80 або 100% гелієм (він забезпечує захист широкого шва). При роботі з інвертором підключення здійснюється в прямій полярності. Аргон-титановий зварювальний дріт використовується для товстостінних деталей.

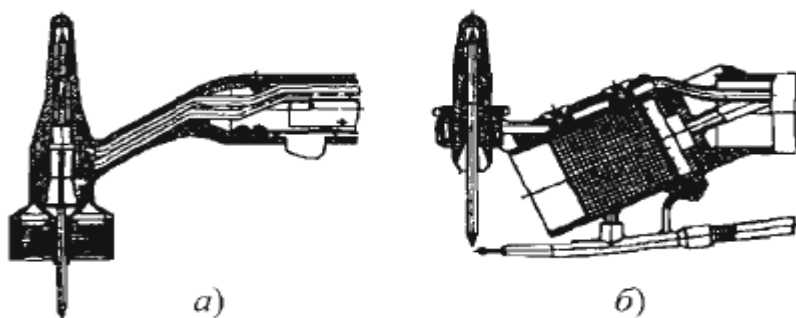


Рис.3.2. Схеми пальників для ручного та механізованого зварювання.

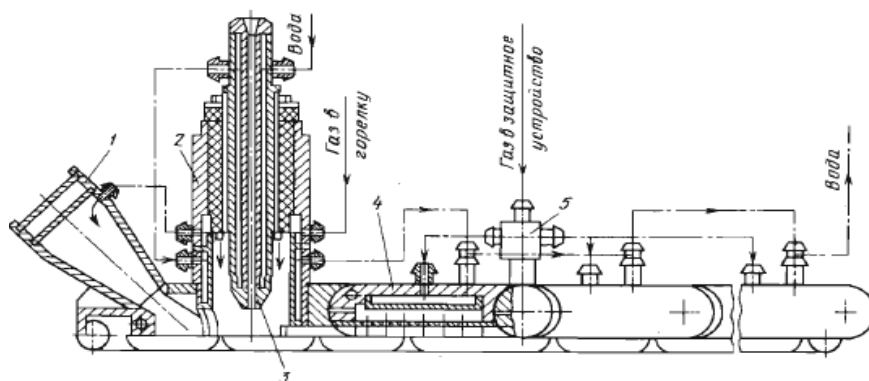


Рис.3.3. Схема пальника для автоматичного зварювання листів титану плавким електродом.

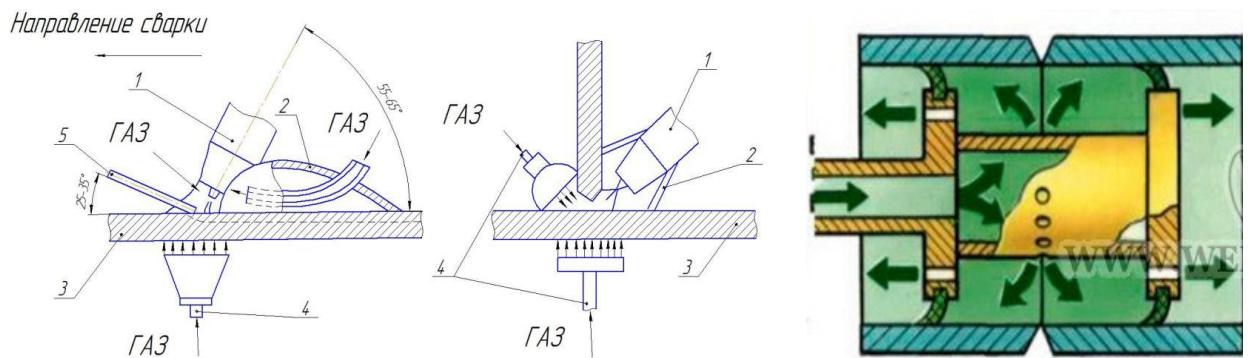


Рис.3.4. Схеми захисту зворотнього боку (кореня) шва при зварюванні. 1 – пальник; 2 – камера-насадка; 3 – виріб; 4 – поддув; 5 – присадний дріт.

Камери з контрольованою атмосферою забезпечують найбільш надійний і стабільний захист в зоні зварювання, зонах охолодження зварного шва і ЗТВ, на тильній стороні (корені) зварного шва. Тому використання таких камер особливо доцільно в серійному виробництві, коли конструкція має складну конфігурацію, а шви розташовані у важкодоступних місцях.

Зварювання в камерах може виконуватися вручну і автоматично. При цьому зварювальник може перебувати як поза камерою, так і в ній в спеціальному скафандрі.[16]



Рис.3.5. Приклад захисної камери для зварювання титану. [17]

Зварювання під флюсом.

Головною перевагою зварювання титану під флюсом є висока продуктивність процесу. Цим способом можна робити стикові, кутові, шви в нахлест з товщиною металу більше 3 мм. Захист зворотної сторони шва формується водоохолоджуваними підкладками з подачею інертного газу встик, а також із застосуванням флюсової подушки або флюсомідної підкладки. Зварювання може проводитися за допомогою стандартного зварювального обладнання; через постійний струм зворотної полярності.

Використовуються безкисневі флюси АНТ-5, АНТ-1; АНТ-3, АНТ-7 систем $\text{CaF}_2 - \text{BCl}_2 - \text{NaF}$. Перед використанням флюс слід висушити при температурі 200... 300°C. Висота шару флюсу не повинна бути менше вильоту електрода. Виліт електродного дроту потрібно обмежувати більш суворо, ніж при дуговому зварюванні в інертному газі, щоб уникнути перегріву дроту, забруднення металу шва газами і погіршення стабільності процесу.[16]

Таблиця 3.1. Технологічні параметри автоматичного зварювання під флюсом.

d_3 , мм	$I_{\text{св max}}$, А	j , А/мм ²	$K_{\text{напл}}$, г/(А·ч)	$h_{\text{пр}}$, мм
2,5	620	126,5	16,00	11,3
3,0	650	92,0	15,50	11,0
4,0	850	67,7	14,50	12,0
5,0	950	48,4	14,00	11,0

Позначення: j – щільність струму;
 $K_{\text{напл}}$ - коефіцієнт наплавлення; $h_{\text{пр}}$ -
глибина проплавлення.

Шви, зварені під флюсом, відрізняються високою щільністю і відсутністю пір. Вони рівномірні основному металу при задовільній пластичності. Для наближення пластичності і в'язкості металу шва до таких же властивостей основного металу при зварюванні особливо відповідальних конструкцій може бути застосований **комбінований флюсогазовий спосіб захисту**. Його сутність полягає в тому, що завдяки спеціальній конструкції бункера флюс продувається аргоном і це повністю виключає потрапляння газів атмосфери в зварювальну ванну. Техніка автоматичного зварювання титану під безкисневим флюсом досить проста і практично не відрізняється від техніки зварювання сталі. Шов очищають від шлакової кірки після охолодження всіх його ділянок до 300-350 °С. [18, 19]

Електрошлакове зварювання (ЕШЗ).[16, 20]

Електрошлакове зварювання ефективно для деталей товщиною понад 40 мм. Зварювання здійснюється пластинчастим електродом того ж складу, що і зварюваний метал, товщиною 9-18 мм і шириною, що дорівнює товщині деталі, що зварюється; електродними дротами (діаметром 3-5 мм) і плавким мундштуком.(рис.3.6)

Використовуються вогнетривкі флюси АНТ-2, АНТ-4, АНТ-6, які необхідно попередньо прожарити при температурі 200–400 °С, щоб вміст води у флюсі не перевищував 0,05 % за масою. Використовується спеціалізоване

(зварювальні головки А-1494, А-977, апарат А-1022 та ін.) і стандартне обладнання, перероблене на зварювання титану. Для захисту охолоджуючого металу і шлакової ванни від повітря в зазор між повзунками і деталлю подається аргон зі швидкістю 5-12 л/хв при товщині металу 30-120 мм.

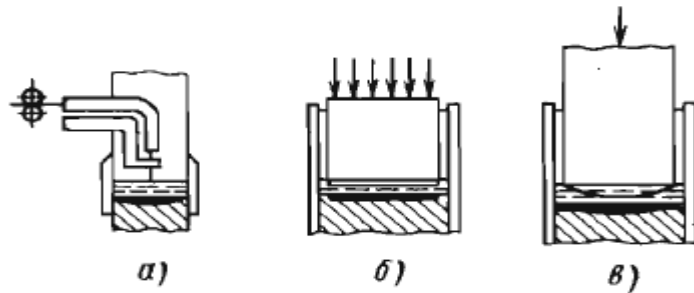


Рис. 3.6. Схеми ЕШЗ дровими електродами (а), плавким мундштуком (б) та пластинчатим електродом (в).

Механічні властивості зварних з'єднань близькі до властивостей основного металу. Недоліком ЕШЗ є крупнозерниста макро- і мікроструктура, що знижує пластичні властивості. Поліпшення властивостей досягають термічною обробкою.

Електронно-променеве зварювання (ЕПЗ).



Рис.3.7. Схема електронно-променевого зварювання.

Електронно-променеве зварювання титану забезпечує найкращі умови для захисту металу від газів. Висока концентрація теплової енергії дозволяє зварювати на високих швидкостях при низькій енергоємності процесу і отримувати зварні з'єднання титану з невеликою шириною шва і ЗТВ. Метал шва має дрібнозернисту структуру. Обов'язковою умовою отримання якісних зварних з'єднань є точне збирання конструкції для зварювання. Режими ЕПЗ титану залежать від типу використовуваної електронної гармати, оснащення, товщини металу, конфігурації і габаритів виробу.

Рекомендовані режими ЕПЗ стикових з'єднань зі сплавів ВТ20, ВТ22, ВТ23 товщиною 8... 15 мм в нижньому положенні на решті суцільної технологічної підкладки: $U = 30$ кВ; $I_{св} = 110 \dots 180$ мкА, $V_{св} = 25 \dots 35$ м/ч [16]

Основний дефект швів при ЕПЗ титану і його сплавів - пористість. Пори мають різні розміри і розташовуються усередині металу шва або, частіше,

поблизу зони сплаву. Для попередження пор необхідно, перш за все, забезпечити видалення з поверхні крайок, що зварюються і присадного дроту (якщо він використовується) адсорбованої вологи і жирової плівки, а також створити умови для максимальної дегазації зварювальної ванни. Досвід показує, що сплави α - і псевдо α -, $\alpha+\beta$ характеризуються доброю зварюваністю методом ЕПЗ, міцність зварного з'єднання рівноцінна міцності основного металу. Термічний цикл зварювання, для якого швидкості охолодження досягають десятків і навіть сотень градусів у секунду, забезпечує досить високі пластичність і в'язкість зварних з'єднань. [13]

Лазерне зварювання титану. [16]

Лазерне зварювання є інноваційним і перспективним видом зварювання, розвиток якого стримує лише його велика вартість.

Концентровані джерела нагріву, такі як електронні та лазерні промені, дозволяють проводити зварювання з мінімальними витратами тепла та допомагають подолати труднощі при зварюванні титану.

Для захисту зони зварювання застосовують інертні гази високої чистоти або фторохлоридні безкисневі флюси. Гелій використовується для захисту поверхні зварного шва і плазмового придушення, а аргон може бути використаний для захисту охолоджуючої поверхні зварного шва і його кореня.

Високі швидкості лазерного зварювання забезпечують підвищену швидкість охолодження і призводять до більшої дисперсності металу шва і значного подрібнення зерна. Сприятливі умови кристалізації, дрібнодисперсна структура, висока технологічна міцність лазерного зварювання сприяють отриманню більш високих механічних властивостей зварних з'єднань в порівнянні з іншими способами зварювання. [16]

Таблиця 3.2. Режими лазерного зварювання окремих титанових сплавів лазерним випромінюванням CO_2 .

Матеріал	δ , мм	P, кВт	$v_{\text{св}}$, м/год	F, см
BT-6	3,0	3,0	80	30
	5,0	4,0		
BT-28	2,0	4,0	160	23
	3,0	3,3	95	15

Рядом дослідників розроблена гібридна зварювальна головка для комбінації лазерного та аргонодугового зварювання. Вона поєднує фокусовану лінзу з фокусною відстанню $F = 300$ мм лазерного випромінювання 1 і вольфрамовий електрод 2 діаметром 5 мм. (рис.3.8, [21])

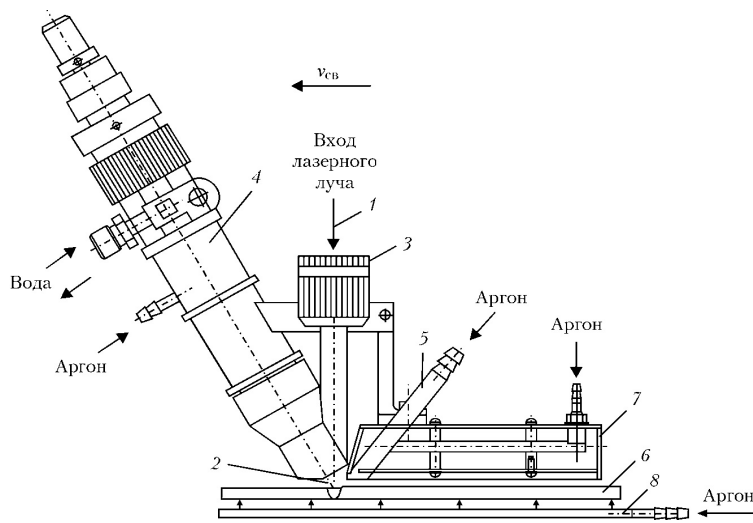


Рис. 3.8. Схема гібридного лазерно-дугового зварювання: 1 – лазерний промінь; 2 – вольфрамовий електрод; 3 – плоскопаралельна пластина для вводу лазерного пучка; 4 – пальник для TIG-зварювання титану; 5 – пристрій для доп. подачі захисного газу; 6 – зразок зварювання; 7, 8 – захисний пристрій для захисту зони зварювання та остигаючого металу.

Експериментальні дослідження дозволили встановити, що схема лазерно-дугового зварювання забезпечує приблизно дворазове збільшення ефективності в порівнянні з результатами лазерного зварювання.

Плазмове зварювання.

Плазма — високотемпературний високоіонізований газ, що складається з молекул, атомів, іонів, електронів, світлових квантів тощо. При іонізації дуги газ пропускається через канал і створюється дуговий розряд, тепловий ефект якого іонізує газ, а електричне поле створює спрямований струмінь плазми. Газ також може іонізуватися високочастотним електричним полем. Газ подається при 23 атмосфер, збуджується електрична дуга силою 400-500 А і напругою 120-160 В. Катод являє собою неплавкий вольфрамовий електрод.[16]

Плазмове зварювання здійснюється стислою дугою прямої дії постійного струму прямої полярності. В якості плазмоутворюючого газу застосовується аргон, захисного – гелій або суміш гелію з аргоном (об'ємний вміст гелію – 50-75 %). Механічні властивості і корозійна стійкість зварного з'єднання, аналогічні іншим способам зварювання. Плазмове зварювання дозволяє підвищити проплавляючу здатність дуги, процес малочутливий

до зміни дугового проміжку, візуально добре контролюється по глибині проплавлення, а також сприятливий для введення присадного дроту, що забезпечує гарантовану якість зварювання. Зварювання виконується без розробки крайок з вільним формуванням зворотного боку шва. [13]

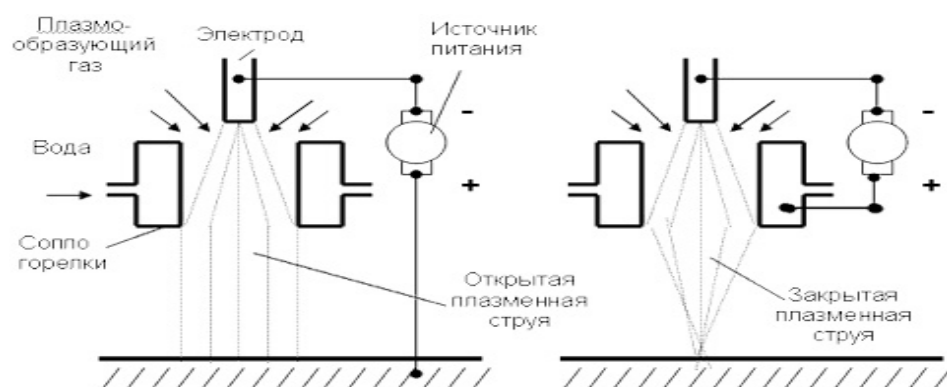


Рис. 3.9. Схема плазмового зварювання відкритим і закритим плазмовим струменем [16]

Контактне зварювання.

Контактне зварювання титану забезпечує отримання якісних зварних з'єднань з титанових сплавів при дотриманні технології.

При точковому зварюванні захист від інертних газів не потрібен через щільний контакт і стиснення деталей, що зварюються. Однак зварювання стиковим опором і зварювання швів вимагають додаткового захисту аргонем першого сорту.

Завдяки високому електричному опору і низькій теплопровідності титану, *контактне* зварювання титану значно полегшується і може проводитися на різних машинах середньої потужності однофазного і трифазного змінного струму або постійного струму. Низька електропровідність титанових сплавів полегшує можливість багатоелектродного зварювання. [16, 20]

Режими стикового зварювання оплавленням титану характеризуються застосуванням підвищених струмів (близько 6...10 кА) і мінімальним часом його проходження. При зварюванні оплавленням з підігрівом торці деталей підігрівають індуктором або безпосередньо в зварювальних машинах при періодичному їх стисненні невеликим тиском (3-7,85 МПа). Після підігріву деталі плавляться і осідають. Підігрів зменшує необхідну потужність, кінцеву швидкість і припуски на оплавлення, а також дозволяє знизити тиск і

швидкість осідання. Стикове зварювання титану та його сплавів дозволяє отримувати зварні з'єднання з межею міцності, що перевищує 90 % міцності основного металу, і пластичністю, що становить 60 % пластичності основного металу [13].

Дифузійне зварювання у вакуумі.

Ще один перспективний метод. Дифузійне зварювання застосовується для з'єднання однойменних титанових сплавів між собою і з іншими металами, металокерамікою і деякими неметалевими матеріалами. [22]

Титан і його сплави легко з'єднуються дифузійним зварюванням. Температура зварювання вибирається в діапазоні від 800 до 900°C, тобто в зоні температури рекристалізації, і становить $(0,7 \dots 0,8)T_{пл}$. З огляду на низьку межу плинності титану і значний температурний вплив на нього, тиск стиснення приймається в межах 0,98 ... 9,8 МПа. Залежно від температури і тиску стиснення час зварювання коливається від декількох секунд до декількох десятків хвилин.

З'єднання деталей з титанового сплаву за допомогою дифузійного зварювання через проміжну мідну прокладку (мідна фольга або напилена мідна фольга) засноване на застосуванні мідно-титанових евтектик, які утворюються в зоні контакту при температурі 870...890°C (нижче температури зварювання).

За оптимальних умов зварювання зона контакту не виявляється під мікроскопом, а міцність і пластичність зварних з'єднань практично не відрізняються від таких же властивостей основного металу. Недотримання оптимальних умов в зоні контакту може призвести до виникнення дефектів (пори, залишки оксидної або жирової плівки і ін.) [13]. Для поліпшення зварюваності і прискорення процесів дифузійного зварювання титану використовується зварювання з прокладками або проміжними покриттями.

Також, можливе отримання якісного зварного з'єднання титану і його сплавів і іншими видами зварювання, наприклад, **холодне і пресове зварювання, зварювання вибухом, тертям**. При цьому, механічні властивості з'єднань знаходяться на рівні властивостей основного металу.

3.2. Досліджувані матеріали. Порівняльна характеристика, зварюваність.

Відповідно до вибраної програми проводимо дослідження зварюваності між собою дисків барабану ротора компресора КНТ з матеріалів ВТ3-1 та ВТ-9.

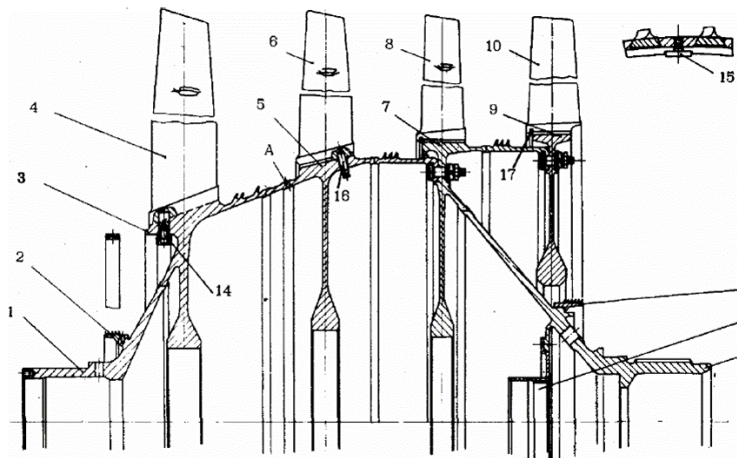


Рис.3.10. Загальний вид ротора КНТ [10].

Основні елементи:

1 – цапфа; 3 – диск першої ступені; 4, 6, 8, 10 – лопатки відповідних ступенів; 5 – диск другої ступені; 7 та 9 – диск третьої та четвертої ступені; 13 – задня цапфа.

Матеріали ВТ3-1 та ВТ-9, як вже зазначалося у п.1.2. даної роботи відносяться до титанових деформуємих сплавів з $\alpha+\beta$ структурою.

Таблиця 3.3. Порівняння хімічного складу, технологічних, механічних, фізичних властивостей матеріалів ВТ3-1 та ВТ9.[23]

Характеристика матеріалу

Марка :	ВТ3-1
Класифікація :	Титановий деформуємий сплав
Застосування:	ковані і штамповані деталі, що працюють при температурі до 400°C (6000 г) и до 450°C (2000 г) ; клас по структурі $\alpha+\beta$
Закордонні аналоги:	Відсутні дані

Марка :	ВТ9
Класифікація :	Титановий деформуємий сплав
Застосування:	деталі, що працюють при температурі до 500 °, деталі ГТД (диски, лопатки) та інші деталі компресора; клас по структурі $\alpha+\beta$
Закордонні аналоги:	Відсутні дані

Хімічний склад в % матеріалу ВТ3-1

Fe	C	Si	Cr	Mo	N	Ti	Al	Zr	O	H	Домішки
0.2 - 0.7	до 0.1	0.15 - 0.4	0.8 - 2	2 - 3	до 0.05	85.95 - 91.05	5.5 - 7	до 0.5	до 0.15	до 0.015	інші 0.3

Хімічний склад в % матеріалу ВТ9

Fe	C	Si	Mo	N	Ti	Al	Zr	O	H	Домішки
до 0.25	до 0.1	0.2 - 0.35	2.8 - 3.8	до 0.05	86.15 - 89.9	5.8 - 7	1 - 2	до 0.15	до 0.015	інші 0.3

Примітка: Ti – основа (база); процентний склад Ti дано приблизно

Технологічні властивості матеріалу ВТЗ-1 та ВТ9 .

Зварюваність:	Обмежено зварюваний
----------------------	---------------------

Механічні властивості при T=20°C матеріалу ВТЗ-1 .

Сортамент	Нап р.	s _B	s _T	d ₅	y	KCU	Термообр.
-	-	МПа	МПа	%	%	кДж / м ²	-
Пруток, підвищ. якість, ГОСТ 26492-85		930-1230		8-10	20-30	300	відпал
Пруток, підвищ. якість, ГОСТ 26492-85		1180		6	16-20	180-200	гартування і старіння
Штамповка		1040-1118		14-20	45-60	300-400	відпал
Штамповка		1150-1220		10-12	32-48		гартування і старіння

Механічні властивості при T=20°C матеріалу ВТ9 .

Сортамент	Напр.	s _B	s _T	d ₅	y	KCU	Термообр.
-	-	МПа	МПа	%	%	кДж / м ²	-
Пруток, ГОСТ 26492-85		930-980		6-7	15-16	200-250	відпал
Пруток, підвищ. якість, ГОСТ 26492-85		980-1230		7-9	16-30	300	відпал
Штамповка		1100-1300		8-14	25-45	200-500	відпал

Твердість

Твердість ВТЗ-1 після відпалу , Штамповка	HB 10 ⁻¹ = 269 - 363 МПа
Твердість ВТЗ-1 після відпалу и старіння , Штамповка	HB 10 ⁻¹ = 302 - 415 МПа

Твердість ВТ9 в межах показників сплаву ВТЗ-1.

Фізичні властивості матеріалу ВТЗ-1 .

T	E 10 ⁻⁵	a 10 ⁶	l	r	C	R 10 ⁹
Град	МПа	1/Град	Вт/(м·град)	кг/м ³	Дж/(кг·град)	Ом·м
20	1.15		8.01	4500		1360
100		8.6	8.79			
200		9.8	10.04		0.502	
300		10.3	11.3		0.544	
400		10.9	12.92		0.628	
500		11.4	14.24		0.67	
600			15.49		0.712	
T	E 10 ⁻⁵	a 10 ⁶	l	r	C	R 10 ⁹

Фізичні властивості матеріалу ВТ9 .

Т	Е 10 ⁻⁵	а 10 ⁶	l	r	С	R 10 ⁹
Град	МПа	1/Град	Вт/(м·град)	кг/м ³	Дж/(кг·град)	Ом·м
20	1.18			4510		

Мікроструктура

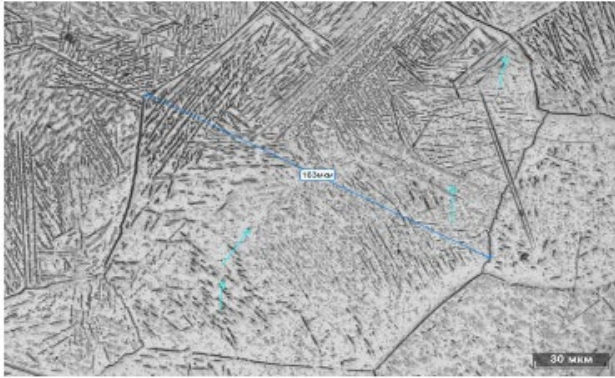


Рис.3.11. Мікроструктура сплаву ВТ3-1 після відпалу x50 [24]

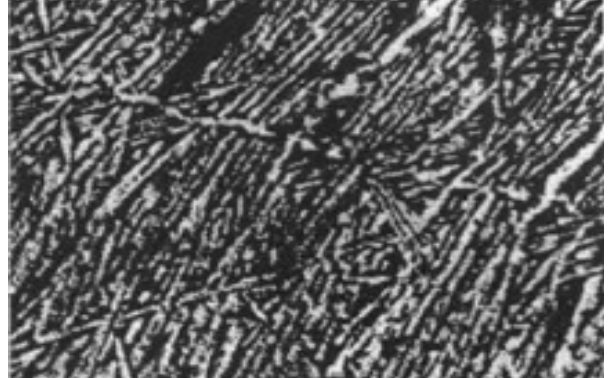


Рис.3.12. Мікроструктура сплаву ВТ9 після відпалу x500

3.3. Вибір способу та режимів зварювання у відповідності до програми дослідження.

При виборі способу зварювання слід пам'ятати, про зони температурного впливу в місцях зварювання та основні проблеми при зварюванні титанових сплавів (п.1.3).

Так, для візуального розуміння зон температурного впливу можна скористатися дослідженням АО «Мотор Січ» [9], де проаналізоване температурне поле ротора компресора КВТ.

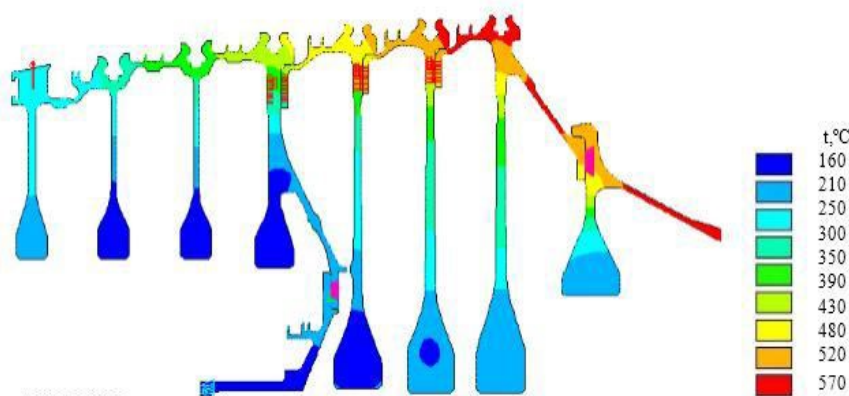


Рис.3.13
Температурне поле
компресора КВТ
(7 ступенів)

Обов'язковою умовою отримання якісного зварного з'єднання є надійний захист від атмосферних газів. Насичення металу шва киснем, азотом і воднем відбувається при температурі понад 350 °С. Це різко знижує пластичність і тривалу міцність зварних конструкцій. Зварювання необхідно

проводити у високочастотному середовищі захисного газу (аргон або гелій), під спеціальними флюсами або у вакуумі. Захисні засоби повинні захищати зону зварювання, обмежену ізотермою понад 350 °С. Зворотний бік зварного шва також повинен бути ретельно захищений, навіть якщо шари металу не розплавлялися, а лише нагрілися вище цієї температури.[11]

Перегрів шва і навколошовної зони пов'язаний з низькою теплопровідністю титану. Ці труднощі можуть бути усунені застосуванням оптимальних режимів зварювання, які виражаються в збільшенні ходової енергії для сплавів $\alpha + \beta$.

Використання концентрованих джерел енергії (лазерних і електронних променів) дає позитивні результати.

Проаналізувавши результати оглядів характеристик титанових сплавів, проблем в технології їх зварювання та способів зварювання приходимо до висновку, що для серійного виробництва оптимальним варіантом для даної конструкції з точки зору її технічних і технологічних можливостей є електронно-променеве зварювання (ЕПЗ). Дистанційне ведення зварювання дозволяє дозовано вводити енергію в стик, дає глибоке одностороннє проникнення, невелику зону термічного впливу (ЗТВ), мінімальні деформації, надійний захист зварювальної ванни – це основні переваги ЕПЗ. [2]



Рис.3.14. Установа ЕПЗ УЛС-1

Для забезпечення високої якості зварних швів, на ДП НВКГ «Зоря-Машпроект» створена універсальна установка УЛС-1, яка оснащена електронно-променевим зварювальним обладнанням ЕЛА 60/60 з системою захисту від пробоїв.

. Спеціально розроблені механізми переміщення електронної гармати дають можливість виконати зварювання з високою точністю позиціонування,

максимально використовуючи об'єм камери. Зібраний ротор в складально-зварювальному пристрої встановлюють в горизонтальному положенні в центрах зварювального маніпулятора і при досягненні вакууму в камері $8 \cdot 10^{-3}$ Па виконують зварювання.

До основних енергетичних параметрів, що визначають геометрію і якість зварного шва, відносять: прискорювальну напругу електронної гармати, зварювальний струм або потужність електронного променя, струм фокусування, швидкість зварювання. Параметри режиму ЕПЗ роторів наведені в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4. Параметри режиму ЕПЗ роторів [2]

Матеріал зварювання	Товщина, мм	Прискорювальна напруга, кВ	Швидкість зварювання, м/год	Відстань до гармати мм	Ток, мА	
					Зварювання	Фокусування
ВТ3-1 ВТ-8	20	60	25...45	100...200	50...100	45...60
ЕП609 ЕП517	20	60	10...18	150...200	60...80	45...60

Технологія зварювання. Перед тим, як ротор буде зварений, зварюється зразок свідка, який виготовлений з дискового металу. Екземпляр-свідок має такі ж конструктивні розміри, як і ротор. При його зварюванні задаються параметри режиму зварювання ротора. Зразок свідка піддається термічній обробці одночасно з ротором, потім зразки вирізаються для випробування на механічну міцність.

Перед складанням ротора його диски очищають від усіх забруднень і знежирюють ацетоном.

Висока якість зварних з'єднань досягається за допомогою різних конструктивних рішень і технологічних прийомів зварювання. Задача створення суцільнозварної конструкції ротора ускладнюється тим, що диски на зварювання надходять з остаточно обробленими пазами під лопатки. Складність полягає в отриманні після зварювання мінімальних торцевого і радіального биття вузла, що не перевищує 0,3 мм. Конструктивно задачу вирішують наступним чином: з внутрішньої сторони диски збираються між

собою за допомогою центруючої підложки товщиною 5...7 мм, що забезпечує натяг при збиранні дисків, а з зовнішньої сторони кожен стик обмежений з двох сторін виступаючими на 2...3 мм буртами (Рис.3.15.)

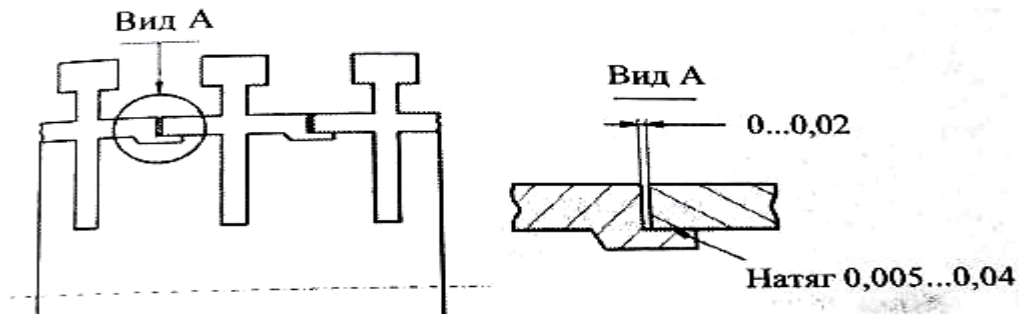


Рис.3.15. Схема з'єднання дисків барабану в роторі

Таке рішення дозволяє вставляти диски в ротор, не зламавши вісь, а в місцях зварювання забезпечити додаткову жорсткість. Для закріплення дисків в такому положенні використовується спеціальне складально-зварювальне пристосування, яке жорстко фіксує кожен диск ротора по внутрішньому діаметру. Диски, зібрані таким чином стискаються з певною силою за допомогою демпфера, що не дозволяє їм роз'єднатися при нахилі ротора в горизонтальне положення і компенсувати поперечну усадку зварних швів в процесі зварювання. Дане пристосування дозволяє забезпечити зазор в стику не більше 0,02 мм. Натяг по підложці є обов'язковою умовою при складанні і забезпечується механічною обробкою дисків.

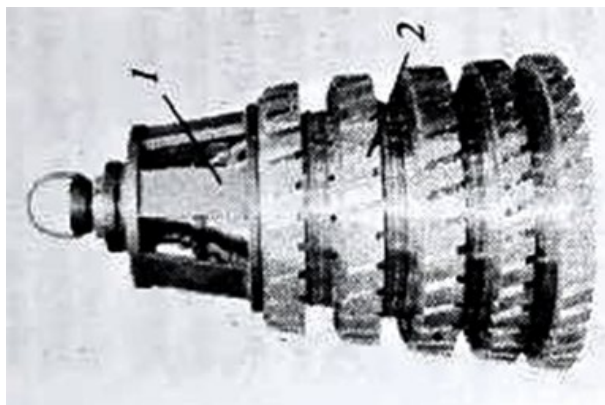


Рис.3.16 Ротор КНТ у складально-зварювальному пристосуванні:

1 - складально-зварювальне пристосування;

2- ротор КНТ

Перед завантаженням в камеру (перед зварюванням) перевіряється чистота ротора, виявлені забруднення видаляються тампоном, змоченим ацетоном. Зовнішній вигляд ротора компресора низького тиску в складально-зварювальному пристосуванні, підготовленому до розміщення в зварювальному агрегаті УЛС-1 зображено на рис.3.16.

Прихватки виконують ЕПЗ в камері безпосередньо перед зварюванням в кількості 6-8 штук, діаметрально протилежно. Параметри режиму зварювання для установки прихваток приблизно на 30...40% менше параметрів зварювання.

Зварювання ротора здійснюють по уточненим на зразку-свідку параметрам режиму, після цього ротор знімають зі складально-зварювального пристосування і встановлюють в термообробно-термофіксуючий пристрій. Термічна обробка роторів з мартенситних сталей ЕП609 і ЕП517 проводиться при температурі 650°C. Таким же чином зварюється ротор з титанових сплавів ВТЗ-1 і ВТ-8, ВТ9. Оптимальна температура відпалу становить 550° С, так як вона забезпечує більш високі пластичні властивості, ніж більш висока температура, при тій же міцності.

Після термічної обробки субстрати видаляють і проводять рентгенологічний контроль. Можливі незначні неприпустимі дефекти усувають свердлінням і запресовкою з натягом і розвальцовкою гужонів. Протяжні дефекти можна виправити тільки переварюванням, однак, з огляду на відсутність підкладки, виправлення у цьому випадку проводиться після додаткового відпрацювання технології зварювання. [2]

3.4. Програма проведення дослідження (експерименту).

Мета експерименту – провести дослідження зварних зразків дисків, зварених методом електронно-променевого зварювання, з різних матеріалів ВТЗ-1 та ВТ9 [25].

З цією метою необхідно провести наступні роботи:

1. З матеріалів ВТЗ-1 і ВТ9 виготовити деталі для двох зварних зразків (ОСЗ-1/ОС9-1, ОСЗ-2/ОС9-2) з комбінацією матеріалів ВТЗ-1+ВТ9.

1.1. Перед зварюванням провести термічну обробку зразків за технологією для дисків.

2. Зібрати зразки, заварити ЕПЗ за техпроцесом, виконати технологічний рентгенконтроль, термічну обробку та остаточний рентгенівський контроль.

3. Зі зварених зразків вирізати темплети для випробування зварних швів та проведення макро- та мікродосліджень.

4. Виконати випробування зварних швів в наступному об'ємі:

4.1. Визначити механічні властивості при кімнатній температурі (σ_b , $\sigma_{0,2}$, δ_5 , ψ)-5 зразків.

4.1.1. Міцність зварного шва: $\sigma_b^{20} \geq 927$ МПа (94,5 кг/мм²).

4.2. Визначення довготривалої міцності $\sigma_{100}^{450} = 540$ МПа - 2 зразка.

4.2.1. Довгострокова міцність зварного шва:

$t = 450^\circ\text{C}$, $\sigma = 540$ МПа (55 кгс/мм²), $\tau \geq 100$ годин.

4.3. Визначення механічних властивостей при $t = 500^\circ\text{C}$ - 3 зразки.

5. Зробити макро- і мікрошліфи поперекових перерізів зварних швів.

6. Провести макродослідження (1 зразок) в наступному об'ємі:

6.1. Випробування твердості (НВ) для зварних швів, ЗТВ і ОМ (ВТЗ-1 і ВТ9).

6.2. Визначення наявності макродефектів (непроварів, тріщин, пір, раковин, неметалевих включень).

6.3. Визначення ширини зварного шва, ЗТВ.

6.4. Оцінка макроструктури.

7. Провести мікродослідження (1 зразок) в об'ємі:

7.1. Визначення мікротвердості Н_μ для зварного шва, ЗТВ і ОМ (ВТЗ-1 і ВТ9). Побудова графіка розподілу мікротвердості в зварному з'єднанні.

7.2. Визначення наявності мікродефектів (мікротріщини, мікровключення)

7.3. Оцінка мікроструктури.

7.4. Визначення розміру зерна травленої поверхні.

8. Зробити висновки.

Згідно програми досліджень в подальшому виготовлено заготовки зразків з матеріалів ВТЗ-1 та ВТ9. (Рис.3.17)

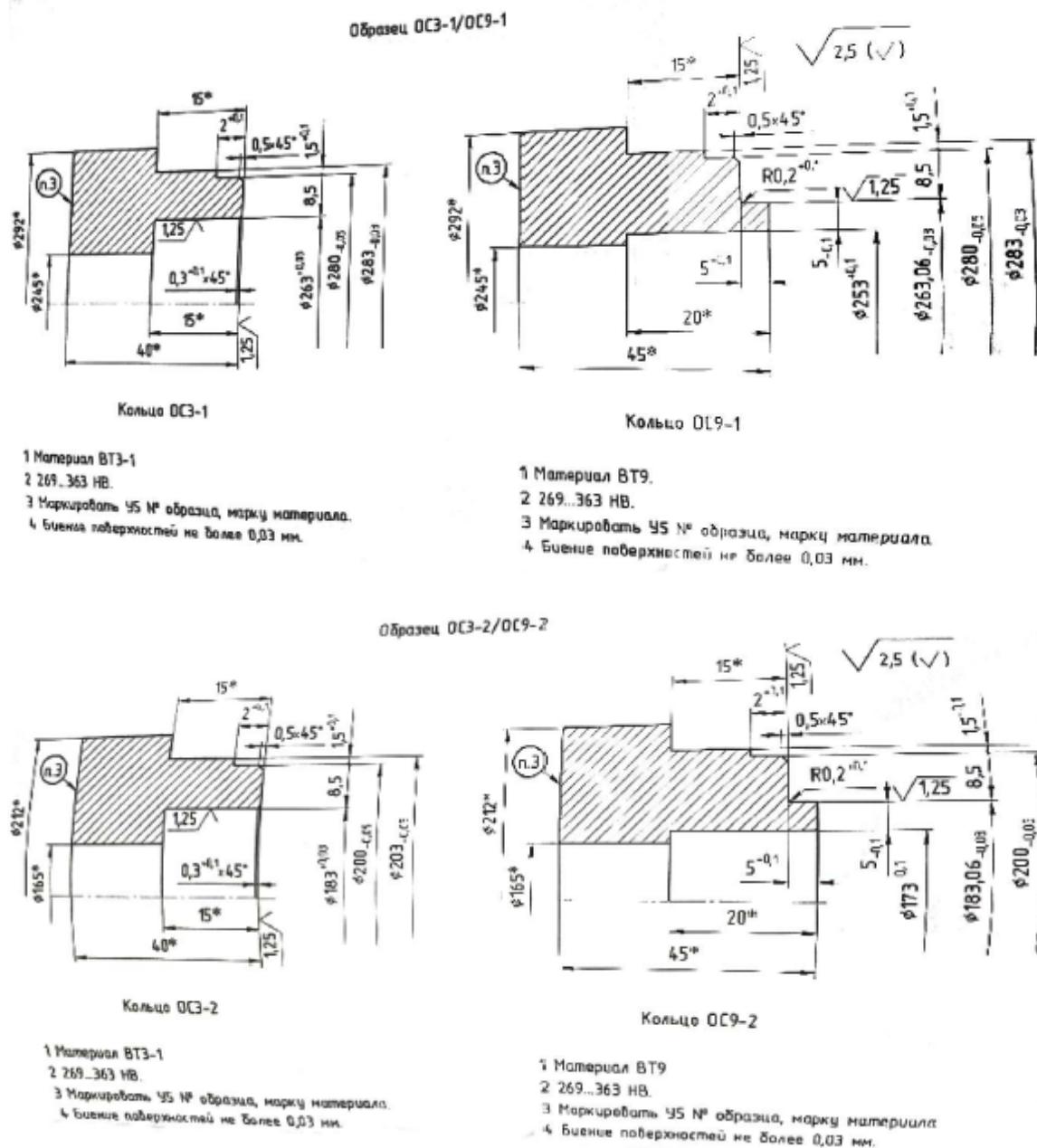


Рис.3.17. Ескізи зразків (ОСЗ-1/ОС9-1, ОСЗ-2/ОС9-2) під зварювання.[25]

Перед ЕПЗ зварюванням заготовки зразків піддано термічній обробці «подвійним відпалом» з контролем твердості (550°C).

Зразки по 2 шт., підготовлені для ЕПЗ з натягом на підкладці 0,03÷0,06 мм згідно техумовам (Рис.3.18)

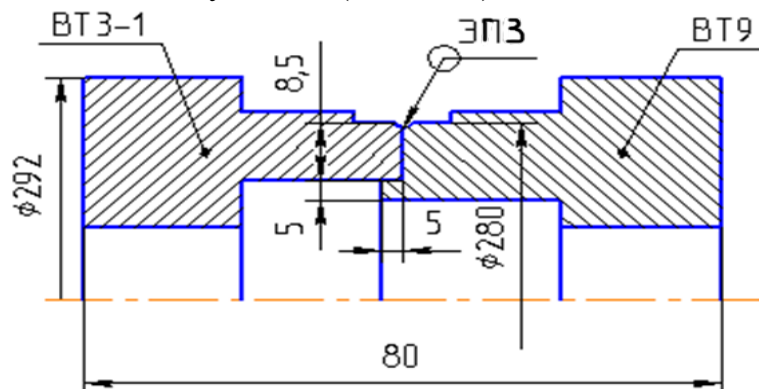


Рис.3.18. Зразки під зварювання ЕПЗ.

Після проведення шабрування кромки, травлення та обробки ацетоном зібрані у спеціальне складально-зварювальне пристосування кільця (диски) піддаємо електронно-променевому зварюванню на універсальній установці УЛС-1 за наступними режимами зварювання.

Таблиця 3.5. Вибрані параметри режиму ЕПЗ зварювання [25]

Найменування образца	Діаметр сварного стыка, мм	Сваряемый материал	Толщина свариваемого материала, мм	Категория, комплекс контроля
ОСЗ-1/ОС9-1	280	ВТЗ-1+ВТ9	8,5+5	I - 2
ОСЗ-2/ОС9-2	200			

Подготовка под ЭЛС согласно И255.105.111-89.

Сварочная установка	УЛС-1	Ускоряющее напряжение, кВ	60
Источник питания	ЭЛА60/60	Пушка	ЭЛА60/60
Давление в камере, мм. рт. ст.; (Па)	8×10^{-5} ($1,06 \times 10^{-2}$)	Давление в пушке, мм. рт. ст. (Па)	8×10^{-5} ($1,06 \times 10^{-2}$)

Применяемые приспособления и оснастка		
Наименование	№ чертежа	Кол-во, шт.
Манипулятор	9613-8757	1

Установка образца в трехкулачковый патрон.

Параметры режима сварки								
Параметры сварного стыка			I _{ск.} мА	I _{ф.} мА	Развертка луча		H, мм	V _{ск.} м/ч
Номер	Диаметр, мм	Толщина, мм			Диаметр, мм	Частота, Гц		
Прихватка								
1	280; 200	8,5+5	= 30 ⁺¹⁰	I _ф +8 ⁺⁵	-	-	175	30
Сварка								
1	280; 250	8,5+5	= 60 ⁺¹⁰	I _ф +8 ⁺⁵	-	-	175	30
Косметический шов								
1	280; 200	8,5+5	= 50 ⁺¹⁰	I _ф +10 ⁺⁵	-	-	175	30

Струм зварювання дано орієнтовно, зварювання виконується із стабільним рівномірним просипанням по підкладці. Струм фокусування орієнтовно 620 мА, для косметики 630 мА.

Косметичний шов виконується обов'язково. Охолодження в камері 30 хвил., в т.ч. 20 хвил. під високим вакуумом.

Після зварювання проведено термічну обробку зразків «відпал після зварювання» як для матеріалу ВТ9 $T=530 \pm 10^{\circ}\text{C}$, час витримки 10-10,5 годин, охолодження на повітрі.

Результат «рентгеноконтролю з підложкою» - з боку підложки дефекти-ланцюжки пор діаметром 0,5 мм по всій довжині шву (характерний дефект при ЕПЗ з легким «просипанням по підложці») - усувається при знятті підложки механічною обробкою. Браком не вважається.

3.5. Дослідження механічних властивостей отриманого зварного з'єднання. Спектральний аналіз. [25]

Після проведення ЕПЗ зразків і термообробки, для титанових сплавів проводяться такі лабораторні дослідження, як механічних властивостей, спектральний аналіз, металографічні дослідження, яких достатньо для визначення якості основного матеріалу та зварного шву.

Механічні випробування включають наступні параметри [25]

1. На розтяг при $t = 20^{\circ}\text{C}$ з визначенням σ_b (тимчасовий опір - 5 зразків). Міцність зварного з'єднання $\sigma_b^{20} \geq 927 \text{ МПа}$;
2. На довготривалу міцність при $t = 450^{\circ}\text{C}$, $\sigma = 540 \text{ МПа}$ і $T \geq 100 \text{ год.}$ (2 зразки).
3. При підвищених температурах $t = 500^{\circ}\text{C}$ з визначенням σ_b , δ_5 та ψ по факту (3 зразки).
4. Визначення твердості зварного шва, ЗТВ і основного матеріалу зварених кілець (ВТ3-1 і ВТ9) – за фактом.

Результати дослідження механічних властивостей показали наступне.

Зварним з'єднанням (кільцям) присвоєно:

- умовний номер №9182 (зразкам ОС3-1/ОС9-1 з матеріалу ВТ3-1+ВТ9 - відповідно), 1 шт.;
- умовний номер №9183 (зразкам ОС3-2/ОС9-2 з матеріалу ВТ3-1+ВТ9 - відповідно), 1 шт..

Із зварних кілець № 9182 і 9183 для механічних випробувань були виготовлені поздовжні зразки.

Отримані в результаті випробувань механічні властивості, по тривалій міцності і σ_b , задовольняють вимогам, зазначеним в програмі (Таблиця 3.6, Таблиця 3.7 - відповідно).

Таблиця 3.6. Механічні властивості зварного з'єднання при $t = 20^{\circ}\text{C}$

Зразки	Механічні властивості
зварні кільця	σ_b , МПа
Умов.№ 9182	1030, 1020, 1030, 1059, 1059 *
Умов.№ 9183	1000, 1049, 1088, 1059, 1040 *
Міцність зварного з'єднання вказана у програмі	≥ 927

*Руйнування обох кілець сталося по матеріалу ВТ9 (рис. 3.19, 3.20)

Зразки №9182

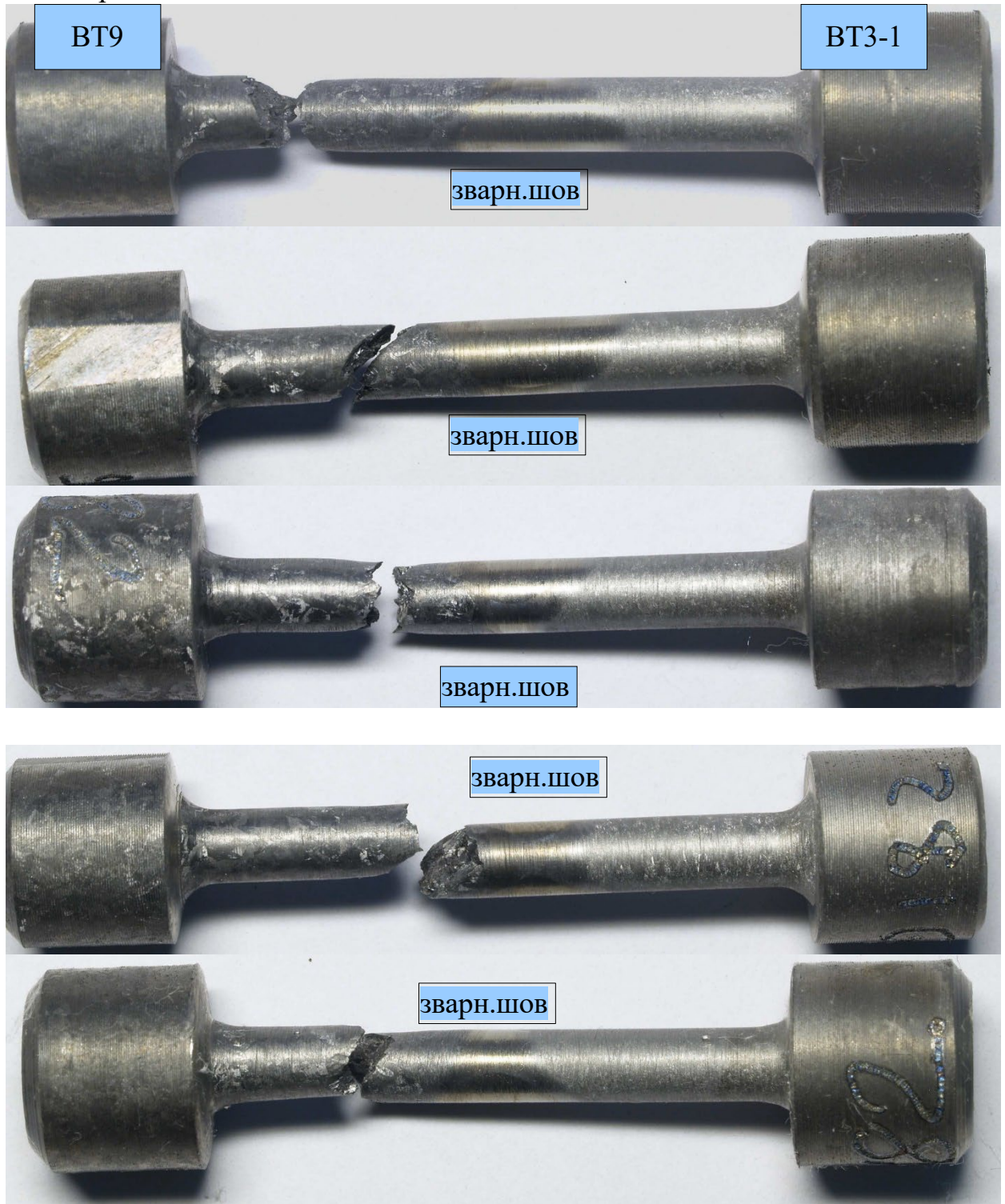


Рис. 3.19. Руйнування зразків №9182 по основному матеріалу VT9 (механічні іспити при кімнатній температурі)

Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КР.131.6121м.05.03.ПЗ

Арк.

63

Зразки №9183

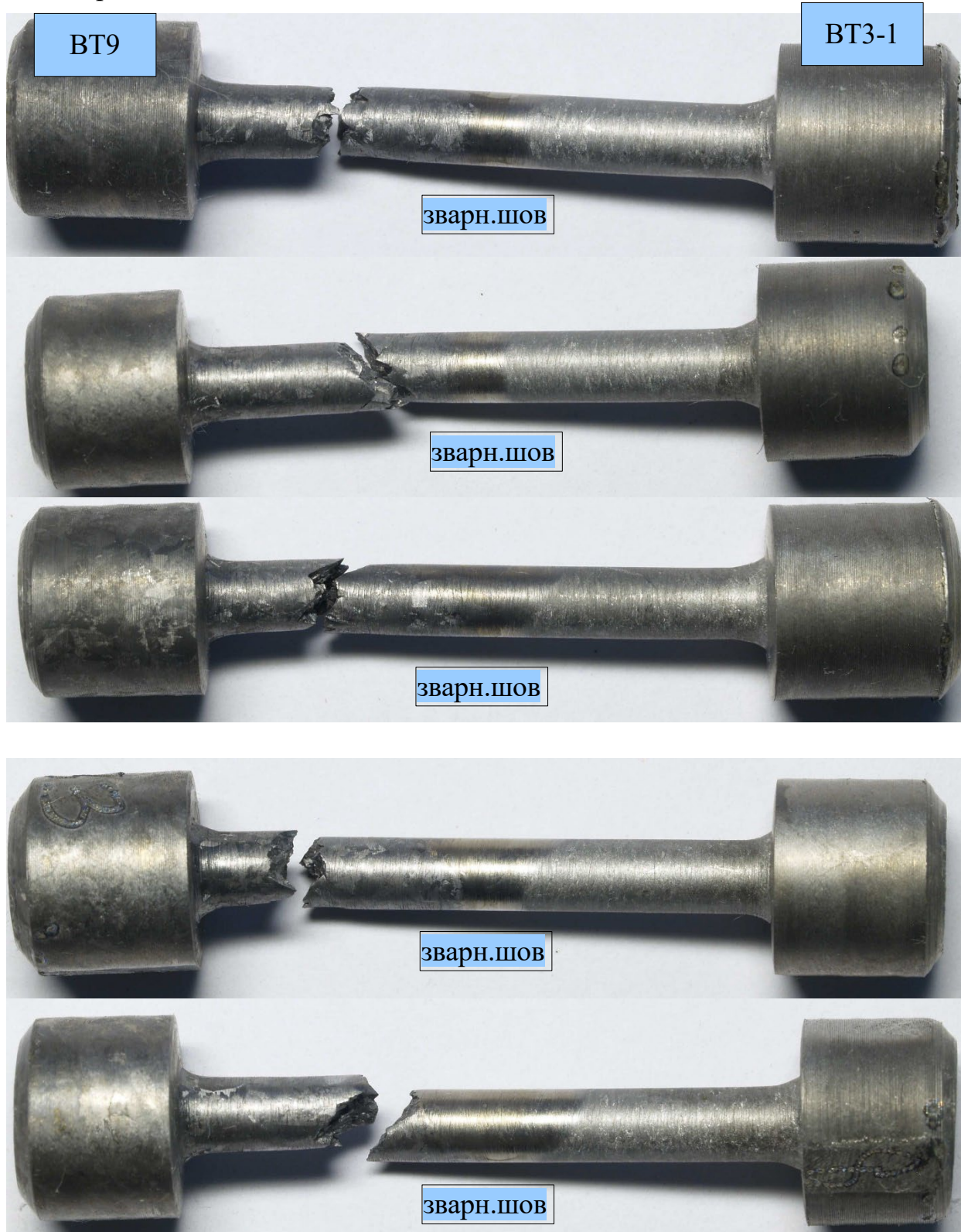


Рис. 3.20. Руйнування зразків №9183 по основному матеріалу BT9 (механічні іспити при кімнатній температурі)

Таблиця 3.7. Довготривала міцність зварного з'єднання

Зразок	Довготривала міцність		
	t, °C	σ , МПа	τ , год
Умов.№ 9182	450	540	Знято без руйнування, відстояв 161 год.
			Знято без руйнування, відстояв 161 год.
Умов.№ 9183	450	540	Знято без руйнування, відстояв 229 год.
			Знято без руйнування, відстояв 229 год.
Вимоги вказані у програмі	450	540	≥ 100

Таблиця 3.8. Механічні властивості при підвищеній температурі t = 500°C, (по факту)

Зразки	Механічні властивості		
	σ_b , МПа *	δ_5 , %	ψ , %
Умов.№ 9182	706	8	21.5
	696	8	20
	716	8	28
Умов.№ 9183	667	8	33.5
	677	6	25
	677	6	19.5

*Руйнування зразків відбулося аналогічно рис.3.19. та рис.3.20. по основному матеріалу - ВТ9.

Результати замірів **твердості** матеріалів кілець.

Таблиця 3.9. Твердість матеріалу кілець, заміри по Бринеллю (по факту).

Зразки	Твердість		
	Матеріал	d _{отп} , мм	НВ
Умов.№ 9182	ВТ3-1	3,4	321
	ЗТВ (між ВТ3-1 и Зсв)*	3,2	363
	Зсв*	3,1	388
	ЗТВ (між Зсв и ВТ9)*	3,2	363
	ВТ9	3,4	321
Умов.№ 9183	ВТ9	3,4	321
	ЗТВ (між ВТ9 и Зсв)*	3,0	415
	Зсв*	3,1	388
	ЗТВ (між Зсв и ВТ3-1)*	3,0	363
	ВТ3-1	3,4	321

Примітка: *ЗТВ — зона термічного впливу; *Зсв — зона зварювання;

Спектральний аналіз.

Спектральний аналіз проведено для визначення хімічного складу матеріалів зразків (кілець) на відповідність вимогам інструкцій. Результати аналізу занесено до таблиці 3.10.

Таблиця 3.10. Хімічний склад основного матеріалу кілець після зварювання по основним елементам

Зразки		Вміст хімічних елементів, %						
		Si	Cr	Mo	Fe	Al	Zr	Ti
Умов. №9182	BT3-1	0.3	1.47	2.4	0.43	6.5	-	основа
	BT9	0.3	-	3.5	0.1	6.4	1.77	
Умов. №9183	BT3-1	0.31	1.40	2.4	0.35	6.4	-	
	BT9	0.29	-	3.5	0.1	6.4	1.78	
Вимоги И255.105.083-86 для <u>сплаву</u> <u>BT3-1</u> (відповідно ОСТ190013)		0.15- 0.40	0.8- 2.0	2.0- 3.0	0.2- 0.7	5.5- 7.0	-	
Вимоги И255.105.083-86 для <u>сплаву</u> <u>BT9</u> (відповідно ОСТ190013)		0.20- 0.35	-	2.8- 3.8	≤0.25	5.8- 7.0	1.0- 2.0	

3.6. Дослідження мікроструктури зварного шву.

Металографічні дослідження. [25]

У даному випадку металографічні дослідження проводимо для:

- оцінки макроструктури на відповідність вимогам інструкції И255.105.091-87 з метою визначення якості основного матеріалу і наявності дефектів (непроварів, пор, тріщин) в зварному шві та в ЗТВ зоні термічного впливу;
- визначення ширини зварного шва і ЗТВ;
- виявлення мікродефектів (мікротріщин, мікровключень);
- оцінки мікроструктури основного матеріалу кілець із сплавів BT3-1 і BT9 на відповідність вимогам И255.105.091-87;
- для визначення мікротвердості Н_μ зварного шва, ЗТВ і основного матеріалу з побудовою діаграми розподілу мікротвердості в зварному з'єднанні.

Макродослідження проводилося на поперечних, відносно зварних швів, зразках.

Макроструктура зварних швів на обох зразках зварних кілець - ідентична.

В макроструктурі перерізів зварних швів всіх досліджуваних зразків тріщин, пор і непроварів не виявлено.

Макроструктура основного матеріалу кілець — задовільна, відповідає 3-м балам 10-ти бальної шкали макроструктур (И 1054-76) для матеріалу ВТЗ-1 і 7-и балам — для матеріалу ВТ9. (По інструкції И255.105.091-87 величина макрозерна повинна бути не крупніше 8-и балам шкали макроструктур (И 1054-76).

На рис. 3.21 та 3.22. приведена макроструктура досліджуваних зразків.

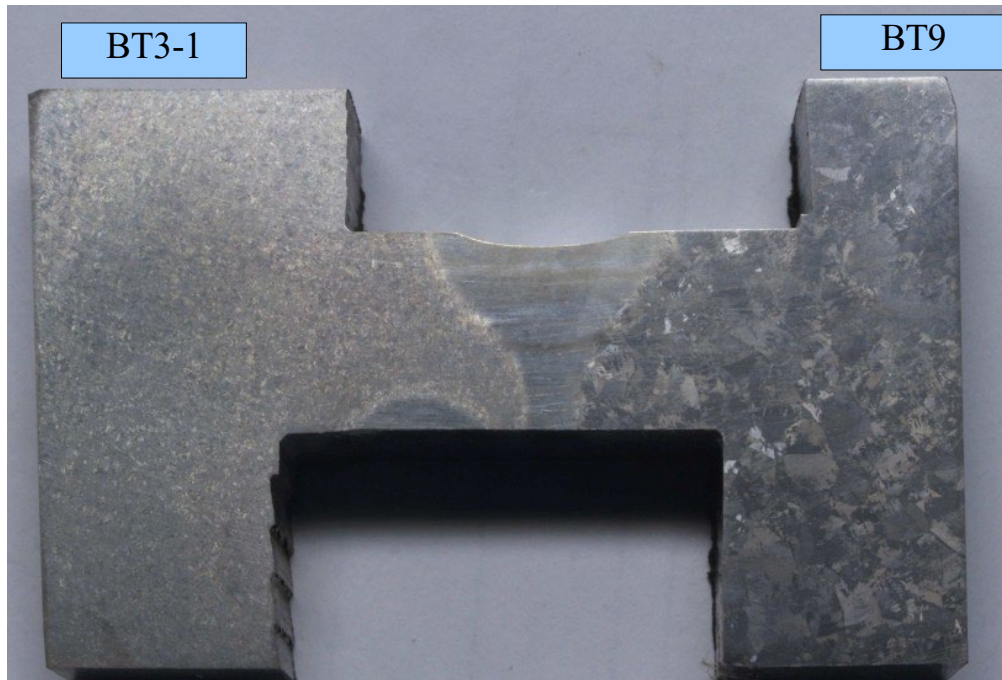


Рис.3.21. Макроструктура зварного кільця № 9182 х2

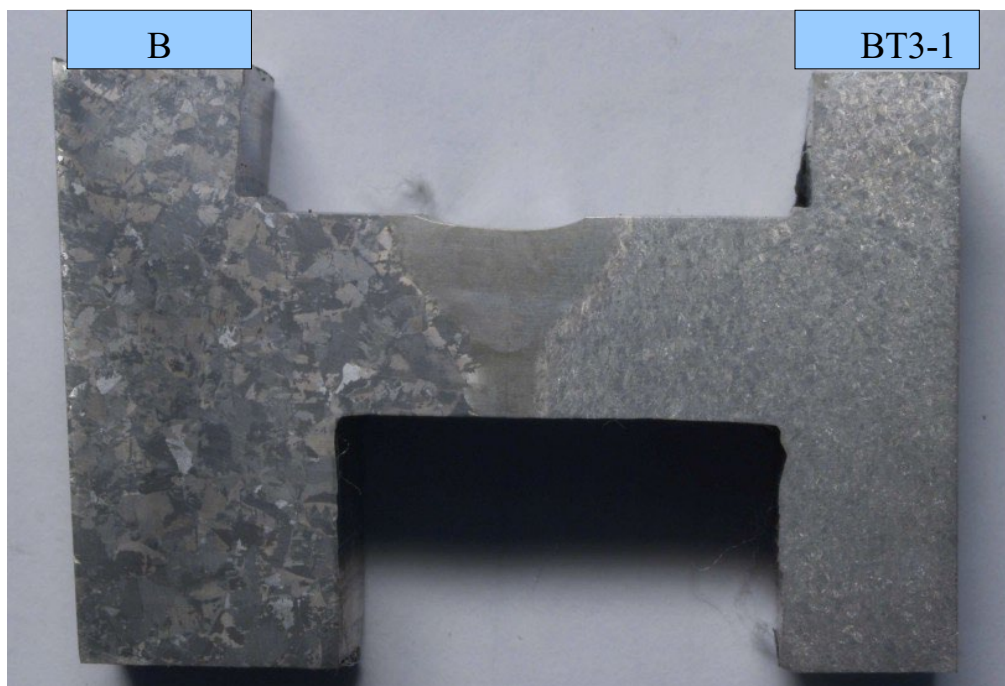


Рис.3.22. Макроструктура зварного кільця № 9183 х4

Ширина зварного шва на кільці №9182 складає 1,60 мм, зони термічного впливу — 0,90 мм, рис.3.23.

Ширина зварного шва на кільці №9183 складає 1,44 мм, зони термічного впливу — 0,79 мм, рис.3.24.

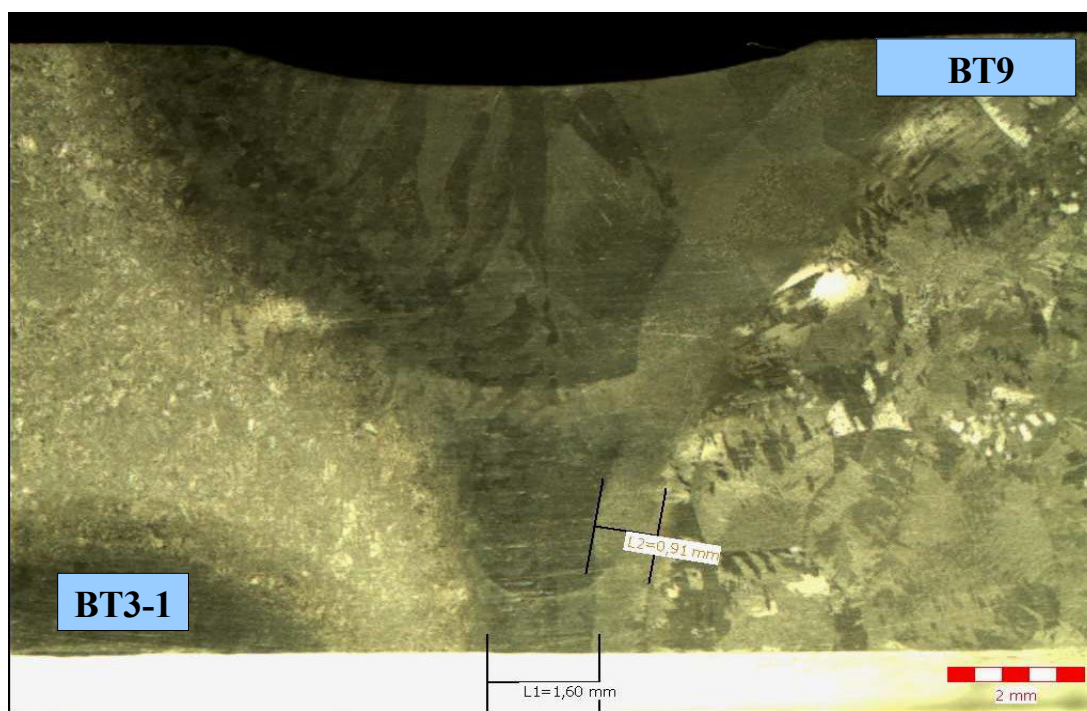


Рис.3.23. Зварне з'єднання кільця №9182 x10

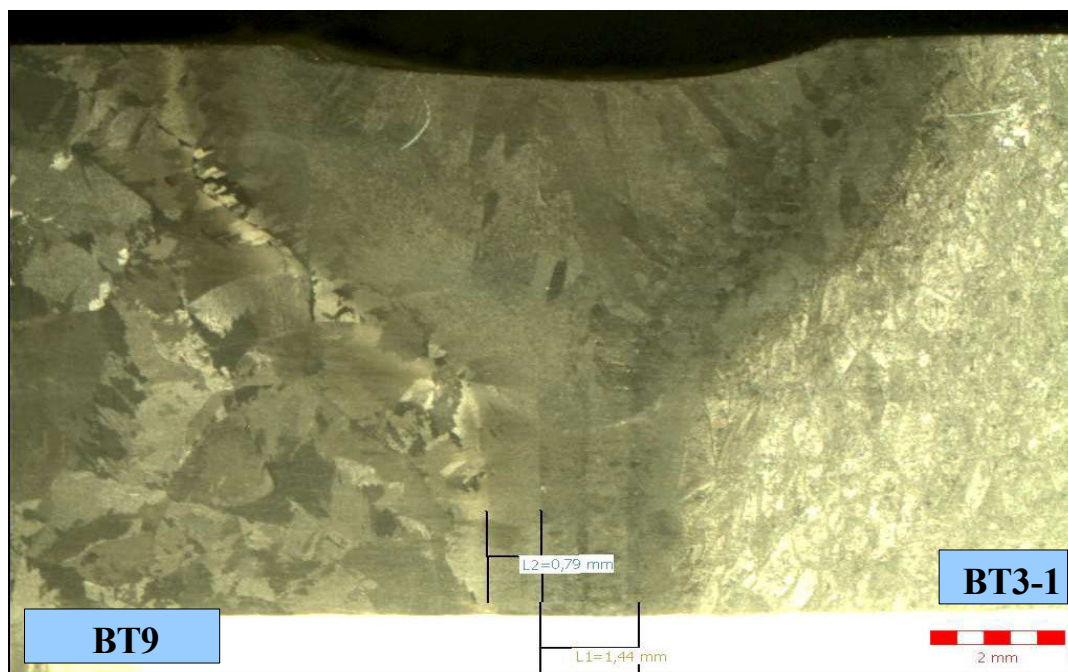


Рис.3.24. Зварне з'єднання кільця №9183 x10

Для проведення мікродослідження із зварних кілець №9182, 9183 були вирізані в поперечному напрямку (відносно осі шва) темплети. По місцю зрізу темплетів були виготовлені мікрошліфи.

Дефектів в центрі зварного шва, в зоні термічного впливу і основного металу в площині шліфу, досліджуваних зразків не виявлено:

1) в зоні термічного впливу досліджуваних зразків зерна рівновісні. Зерна зварного шва мають дендритну структуру, стовпчасту направленість. Мікроструктура в ЗТВ і зварному шві відповідає допустимій мікроструктурі 9-типної шкали мікроструктур ОСТ1 90197 для матеріалів ВТЗ-1 і ВТ9, рис.3.23 – 3.28.

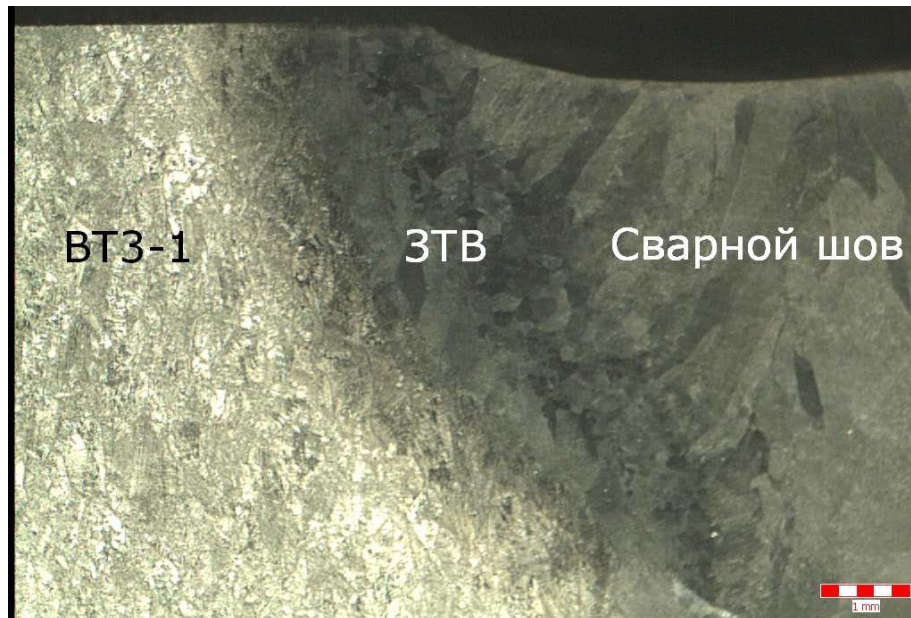


Рис. 3.25. Макроструктура ЗТВ на зразках №9182, 9183 з боку матеріалу ВТЗ-1 x16

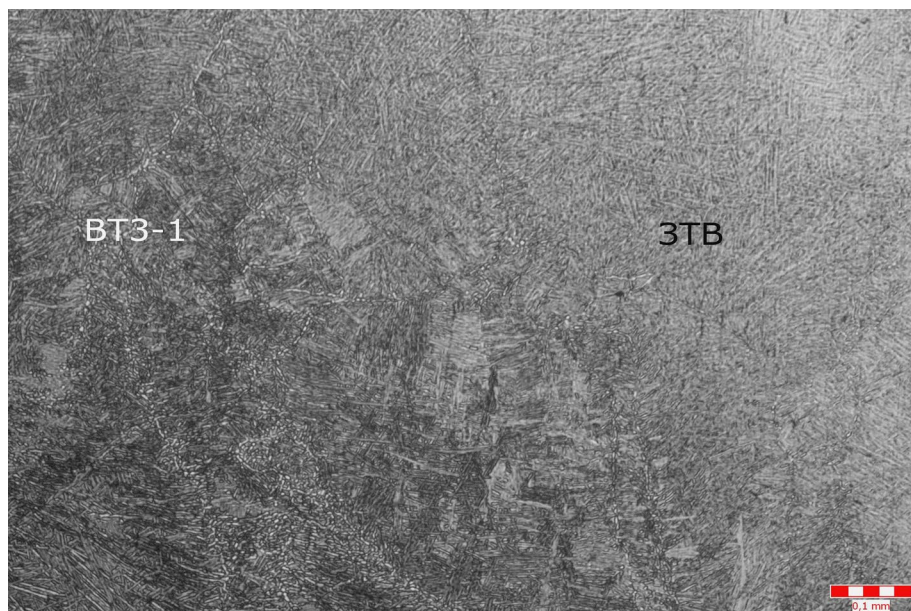


Рис. 3.26. Мікроструктура ЗТВ на зразках №9182, 9183 з боку матеріалу ВТЗ-1 x100

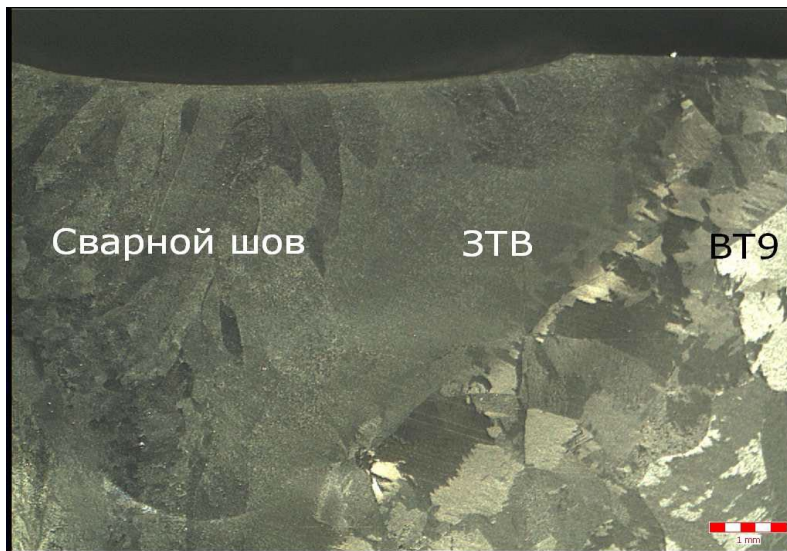


Рис. 3.27. Макроструктура ЗТВ на зразках №9182, 9183 з боку матеріалу VT9 x16



Рис. 3.28. Мікроструктура ЗТВ на зразках №9182, 9183 з боку матеріалу VT9 x100

2) структура основного металу кільця з боку матеріалу VT3-1 однорідна, дрібноігольчата. Мікроструктура відповідає 3а типу, 9-типної шкали мікроструктур ОСТ1 90197, задовільна. (Згідно вимогам И255.105.091-87 мікроструктура кільця зі сплаву VT3-1 повинна бути 1а-6а, крім 5б типів шкали мікроструктур ОСТ1 90197), рис.3.29.

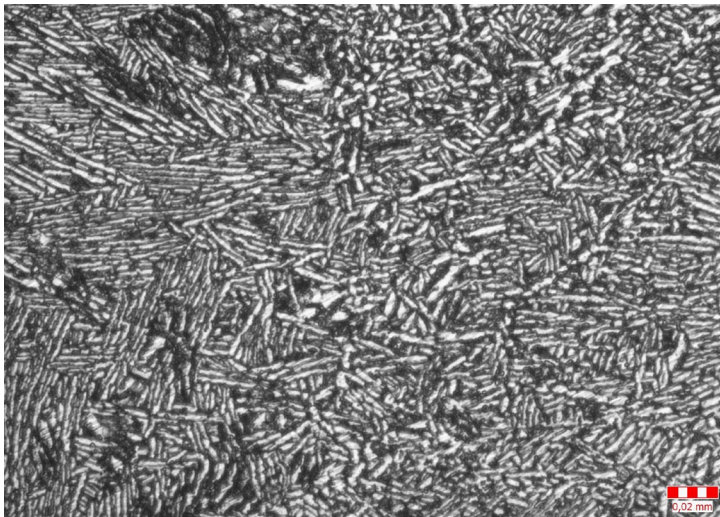


Рис.3.29. Мікроструктура основного матеріалу VT3-1 в зразках №9182, 9183 x500

3) структура основного металу кільця з боку матеріалу ВТ9 - рівновісна. Мікроструктура відповідає 5 типу, 9-типної шкали мікроструктур ОСТ1 90197, задовільна. (Згідно вимогам И255.105.091-87 мікроструктура кільця із сплаву ВТ9 повинна відповідати шкалі №1 типів шкал мікроструктур ОСТ1 90197), рис.3.30.

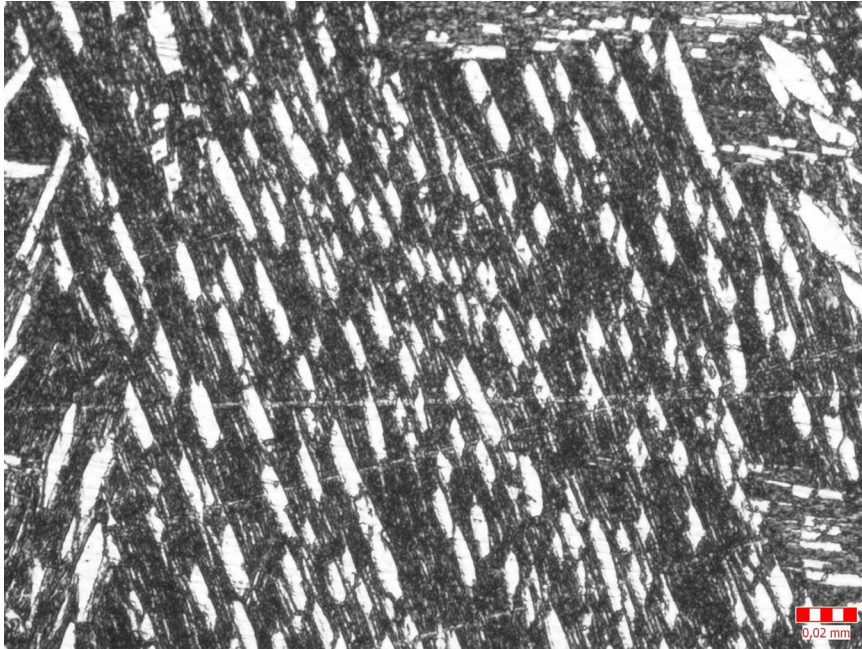


Рис.3.30. Мікроструктура основного матеріалу ВТ9 в зразках №9182, 9183 x500

Мікротвердість основного матеріалу зразків кілець, зони термічного впливу і зварного шва в перерізі на зразках вимірювалася на приборі ПМТ-3М методом вдавлювання алмазного наконечника при навантаженні 0,100 кгс по ГОСТ9450. Мікротвердість різних зон зразків і діаграма їх розподілу представлені в таблиці 3.11-3.12, і діаграмі рис.3.31.

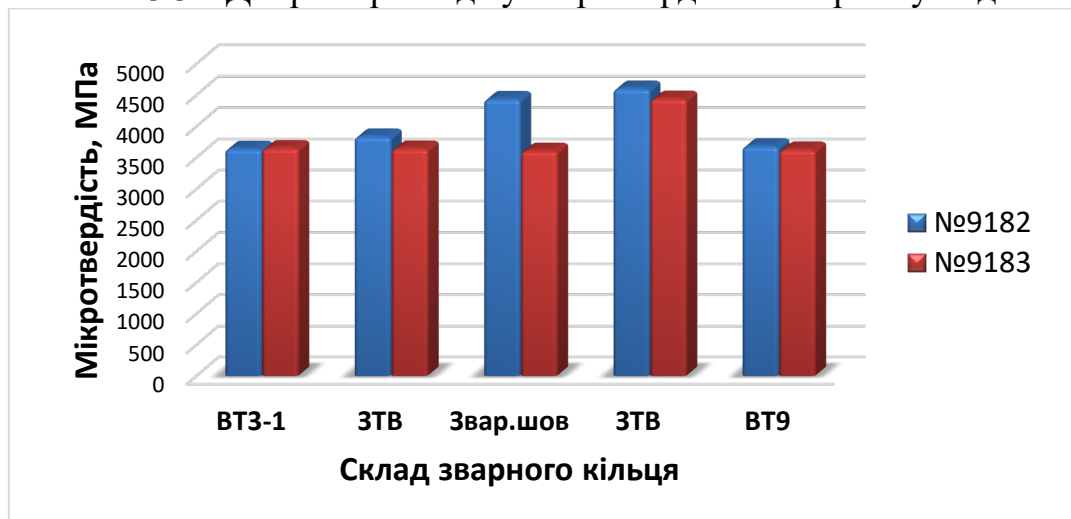
Таблиця 3.11. Значення мікротвердості в різних зонах зварного кільця зразка №9182

№ зразка	Осн.матер.ВТ3-1 МПа	ЗТВ МПа	Зварний шов МПа	ЗТВ МПа	Осн.матер.ВТ9 МПа
№9182	3864	3864	4472	4619	3864
	3550	3756	4217	4344	3648
	3550	3864	4619	4766	3550
	3570	3864	4413	4668	3648
Середнє значення	3638	3834	4433	4599	3678

Таблиця 3.12. Значення мікротвердості в різних зонах зварного кільця зразка №9183

№ зразка	Осн.матер.ВТЗ-1 МПа	ЗТВ МПа	Зварний шов МПа	ЗТВ МПа	Осн.матер.ВТ9 МПа
№9183	3648	3452	3864	4344	3648
	3550	3864	3648	4472	3746
	3864	3648	3550	4472	3550
	3530	3599	3364	4462	3550
Середнє значення	3648	3641	3606	4438	3624

Рис.3.31. Діаграма розподілу мікротвердості в зварному з'єднанні.



Висновки досліджень:

1. Механічні властивості зварних зразків по тимчасовому опору на розрив і тривалої міцності відповідають вимогам, встановленим в програмі дослідження.

2 На всіх досліджуваних зразках кілець дефектів у зварному шві, основному металі, зоні термічного впливу або в площині шліфа – не виявлено.

3. Основний матеріал обох кілець відповідає вимогам інструкції И255.105.091 для сплаву ВТЗ-1 і ВТ9 за хімічним складом, макро- і мікроструктурою.

4. Зварюваність комбінації матеріалів ВТЗ-1+ВТ9 добра. Зварні шви не мали дефектів (оцінка зварних швів проводилася за першою категорією перевірки).

5. Механічні властивості зварних зразків відповідають вимогам програми досліджень. Розрив зразків проходив по основному матеріалу ВТ9.

3.7. Розрахунок зварювальних деформацій.

Сплави титану не схильні до утворення кристалізаційних (гарячих) тріщин в металі шва. Найбільш поширеними дефектами є пори і холодні тріщини. Пори в зварних з'єднаннях найчастіше розташовуються у вигляді ланцюжка уздовж зони злиття.

Вони знижують статичну і динамічну міцність з'єднань. Утворення пір може бути обумовлено попаданням водню в шов разом з адсорбованою вологою на присадному дроті, флюсу, краях зварюваних виробів або з атмосфери при порушенні захисту. Для отримання непористих швів треба забезпечити необхідну чистоту основного металу і зварювальних витратних матеріалів, зварювання повинне проводитися на оптимальних режимах з дотриманням всіх вимог технологічних процесів.

Холодні тріщини виникають в результаті підвищеного вмісту водню в зварному з'єднанні в поєднанні з розтягувальними напруженнями першого типу (залишковими зварювальними напруженнями і зовнішніми навантаженнями). Тріщини такого типу можуть виникати відразу після зварювання, а також після загартовування зварюваних виробів до декількох років (відстрочений процес руйнування).[11, 14]

Під час проведення металографічного аналізу в макроструктурі перерізів зварних швів всіх досліджуємих зразків тріщин, пор і непроварів не виявлено.

Це пов'язано з тим, що при ЕПЗ присадний дріт або інертний газ – відсутні, зварювання проводиться у вакуумі. Надходження водню або кисню до зварного шва відсутнє. Диски барабану ротора укладаються в спеціальну складально-зварювальну оснастку з невеликим натягом. Таким чином зварний шов формується за рахунок самих зварювальних матеріалів. Технологія ЕПЗ така, що при зварюванні енергія концентрується практично в одній точці, а площа нагріву мінімальна. При товщині металу 8,5 мм і жорсткому закріпленні дисків в пристосуванні, при зварюванні мінімальне короблення, відсутні кутові деформації. Через це метал не деформується при зварюванні. Тому розрахунок зварювальних деформацій в даній роботі не проводився.

Висновки.

1. Проведено аналіз літературних даних на наявні способи зварювання титанових сплавів та їх вплив на механічні властивості зварних з'єднань.

2. Порівняльний аналіз характеристик визначених сплавів свідчить, що ці сплави мають приблизно однакові характеристики і відносяться до сплавів з $\alpha+\beta$ структурою і мають обмежену зварюваність, що означає на дотримання жорстких умов технології зварювання.

3. Оптимальним варіантом для зварювання на виробництві вибраної конструкції із титанових сплавів BT3-1 та BT9 з точки зору її технічних і технологічних можливостей є електронно-променеве зварювання (ЕПЗ). Дистанційне ведення зварювання дозволяє дозовано вводити енергію в стик, дає глибоке одностороннє проникнення, невелику зону термічного впливу (ЗТВ), мінімальні деформації, надійний захист зварювальної ванни. Призначено режим зварювання та визначено програму дослідження.

4. За результатами дослідження механічних властивостей, спектрального аналізу та металографічного аналізу встановлено:

- міцність зварного шву дорівнює міцності основного металу. Розрив усіх зразків стався по основному металу;

- на всіх зразках у зварному шві, основному металі, зоні термічного впливу, в площині шліфу дефектів не виявлено;

- основний метал та метал зварного шву задовольняє вимогам інструкцій та програмі дослідження по хімічному складу, макро- та мікроструктурі.

Таким чином, зварюваність сплавів BT3-1 та BT9 способом ЕПЗ – добра. Зварювані шви дефектів не мають.

Технологія ЕПЗ така, що при зварюванні енергія концентрується практично в одній точці, а площа нагріву мінімальна. При товщині металу 8,5 мм і жорсткому закріпленні дисків в пристосуванні, при зварюванні мінімальне короблення, відсутні кутові деформації. Через це метал фактично не деформується при зварюванні. Тому необхідність у проведенні розрахунку зварювальних деформацій відсутня.

4. ОХОРОНА ПРАЦІ.

4.1. Вимоги охорони праці при електронно-променевому зварюванні.

Загальні вимоги з охорони праці в Україні регламентовані Законом України від 14.10.1992 № 2694-ХІІ «Про охорону праці» та відповідними нормативними актами (інструкціями, наказами) профільних Міністерств, відомств.

Так, наприклад Наказом від 20.08.2014 № 579 Міністерства енергетики та вугільної промисловості України «Про затвердження Правил охорони праці під час оброблення і використання алюмінієвих і титанових сплавів» визначено основні вимоги під час обробки титанових сплавів.

Зварювальні роботи проводяться відповідно до вимог Наказу МНС України від 14.12.2012 року № 1425 «Про затвердження Правил охорони праці під час зварювання металів».

На підставі відповідних нормативних актів кожне підприємство видає свої накази та інструкції з охорони праці, що стосуються усіх аспектів починаючи з робочого одягу, правил безпеки при переміщенні по підприємству, пожежної безпеки ... та закінчуючи інструкціями з безпеки і правил охорони праці на кожному робочому місці відповідно до робіт, що виконуються.

Для проведення дослідницької частини в рамках даної роботи використовувалось різноманітне промислове та лабораторне обладнання.

Наприклад, використовувалася електронно-променева зварювальна установка, для якої правила охорони праці для зварника регламентовано виробничою Інструкцією [26].

Так, даною Інструкцією визначено наступні основні моменти.

Електронно-променеве зварювання - це процес, що здійснюється у вакуумі, при якому для розплавлення металу та утворення зварного шва,

					КР.131.6121м.05.04.ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Студент	Сичов				ОХОРОНА ПРАЦІ	Літ.	Аркуш	Аркушів
Керівник	Костін						75	98
Консул.						НУК ім.адм.Макарова		
Н. Контр.								
Зав.каф.	Драган							

використовується пучок електронів. При взаємодії: пучка електронів з металом, утворюється рентгенівське випромінювання. Рентгенівське випромінювання може негативно впливати на організм людини, якщо його інтенсивність перевищує допустиму норму. Тому, конструкція електронно-променевої установки повинна передбачати захист від рентгенівського випромінювання, що утворюється при ЕПЗ, до допустимого нормами рівня.(п.1.3.[26])

Перед введенням в експлуатацію, після ремонту, заміни вузлів і розбирання вакуумної камери, а також не рідше одного разу на рік повинно проводитися вимірювання потужності дози невикористаного рентгенівського випромінювання на відстані 50 мм від корпусу електронно-променевої гармати (далі - ЕПГ) (для ЕПГ стаціонарно встановлених на вакуумних камерах), ілюмінаторів, вакуумних вводів та вакуумних ламп.

Згідно з НРБУ-97 потужність дози рентгенівського випромінювання для ЕПЗУ не повинна перевищувати 1 мкЗв/год (Зв – зіверт) при максимальному струму зварювання.(п.1.4.[26])

Установки призначені для ЕПЗ, повинні бути розміщені на окремій ділянці, забезпечені огорожею, механічним або електричним блокуванням, що унеможливило доторкання до частин установок, які знаходяться під напругою. (п.1.5.[26])

Зварники на ЕПЗУ можуть бути допущені до самостійного виконання робіт після проходження стажування в установленому порядку. Для виконання робіт з використанням рідкого азоту допускаються працівники, які пройшли навчання, перевірку знань та інструктаж з питань охорони праці згідно з інструкцією «ТИ НПКГ-215-2011 Азот жидкий. Применение для сборки соединений с гарантированным натягом». (п.1.4.[26])

Зварник, який працює на ЕПЗУ, повинен знати (п.1.11.[26]):

- будову установок та обладнання;
- схему електричного живлення;
- систему охолодження та управління подачі води;

					КР.131.6121м.05.04.ПЗ	Арк.
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		76

- вимоги безпеки з експлуатації електроустаткування.

Під час виконання робіт на ЕПЗУ, або в аварійних випадках, можливий вплив постійних виробничих шкідливих і небезпечних факторів:

- рухомі механізми маніпуляторів, візків, дверей вакуумних камер і механічний вплив в разі падіння деталей, що зварюються (можливе травмування);
- нагріта частина корпусів вакуумних насосів та рідкий азот, що заливається в пастки паромасляних насосів (можливе отримання опіків);
- яскраве свічення зварювальної ванни (можливе ураження органів зору);
- електричний струм (можливе ураження електричним струмом високої напруги 30 кВ та 60 кВ). (п.1.13-1.14.[26])

Знаходження сторонніх осіб на робочому місці зварника на ЕПЗУ – заборонено. (п.1.16.[26])

Перед початком робіт (п.2.[26]) необхідно перевірити наявність і справність обладнання, засобів захисту, чистоту робочого місця, дозволу на проведення робіт.

Під час виконання робіт необхідно виконувати наступні вимоги (п.3.[26]).

При виконанні зварювання на ЕПЗУ в окремому приміщенні, обов'язкова присутність другої особи, крім особи, яка безпосередньо виконує зварювальні роботи.

Не залишати установку без нагляду під час її роботи. Не вмикати і не працювати на установці при відсутності зливу охолоджувальної рідини з ЕПГ або будь-якого з агрегатів вакуумної системи установки.

При виконанні робіт з використанням рідкого азоту, очі повинні бути захищені захисними окулярами. Операції з переливання рідкого азоту необхідно виконувати в рукавичках зварника шорних з крагами.

Перед кожним вмиканням ЕПА (У-250А, ЭЛА-30 ЭЛА-60/60, ЭЛА-60Б, КЛ-160, БСГ-КЛ190) попередити про це всіх присутніх поблизу установки вигуком: «Увага! Вмикаю!».

					КР.131.6121м.05.04.ПЗ	Арк.
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		77

При виникненні несправності в процесі зварювання, в першу чергу вимкнути прискорюючу напругу (натисніть кнопку «ОТКЛ. 30 кВ», «ОТКЛ. 60 кВ», «УСКОРЯЮЩЕЕ- ОТКЛ.» на пульті зварника або пульті управління ЕЛА).

Перед розбиранням ЕПГ для виконання проміжних робіт переконатися, що ЕПА відключено від мережі. При розбиранні ЕПГ, перш ніж торкнутися руками катодного вузла, розрядити ємність високовольтного кабелю, за допомогою високовольтної штанги, шляхом багаторазового (3 – 5 разів) з'єднання венельта з корпусом ЕПГ.

Слід припинити роботу на установці, якщо:

- відсутня подача води охолодження форвакуумних насосів;
- температура води в системі охолодження паромасляних насосів та ЕПГ перевищує + 25 °С;
- під час зварювання відбулося погіршення вакууму в камері установки до величини більш, ніж 0,04 Па (3×10^{-4} мм рт. ст.);
- виникли порушення в роботі ЕПА (іскріння, пробої в високовольтному кабелі або випрямлювачі, поява диму або вогню з шаф і блоків ЕПА);
- спрацювала сигналізація аварійних режимів роботи установки.

Для забезпечення пожежної безпеки необхідно (п.3.19.[26]):

- знати місце розташування засобів пожежогасіння та вміти ними користуватися;
- не палити на робочому місці самому та іншим особам;
- на робочому місці заборонене знаходження легкозаймистих речовин і рідин; після знежирення деталей ацетоном, спиртом, їх залишки та використані серветки прибрати у спеціально відведене місце;
- мастильні матеріали, вакуумне масло та інші речовини, які пролиті на підлогу, зібрати сухою ганчіркою, яка добре вбирає.

У разі виявлення фактів порушення технологічного процесу, або будь-якої небезпеки для оточуючих, негайно поінформувати про те, що трапилося майстра для вживання термінових заходів.

					КР.131.6121м.05.04.ПЗ	Арк.
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		78

Вимоги безпеки після закінчення роботи. (п.4.[26])

Після закінчення роботи у вакуумній камері необхідно створити попереднє розрідження за допомогою форвакуумного насосу. У такому стані вакуумні камери повинні знаходитися постійно, до наступного виконання процесу ЕПЗ.

Вимкнути електронагрівачі паромасляних насосів і продовжити відкачування насосів впродовж 60 -70 хвилин, для охолодження масла.

Провести відключення насосів вакуумної системи згідно з правилами експлуатації ЕПЗУ, перекрите воду у системі охолодження ЕПЗУ. Вимкнути всі системи ЕПЗУ. Вимкнути автоматичний вимикач силової шафи ЕПА і загальний рубильник шафи розподільної даної ЕПЗУ.

Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях (п.5.[26])

До аварійних ситуацій на ділянці ЕПЗ може бути віднесено:

- припинення подачі електроенергії;
- припинення подачі води для охолодження насосів та ЕПГ;
- розгерметизація під час роботи, зварювальних камер;
- займання електрообладнання.

При всіх випадках вжити заходи з виключення та охолодження обладнання, припинити виконання робіт.

Про всі випадки виникнення аварійних ситуацій повідомити майстра або особі, яка його заміщає.

Працівники також повинні знати правила ***домедичної допомоги*** при кровотечах, травмах, пораненнях, переломах, травматичних шоках, опіках, обмороженнях, сонячному та тепловому ударах, укусі небезпечних тварин, вміти проводити штучне дихання та непрямий масаж серця.

4.2. Розрахунок заземлення та місцевої вентиляції.

Розрахунок заземлення.

Одним із методів захисту людини від ураження електричним струмом є захисне заземлення, яке призначене для зниження електричного струму, що виникає на металевих частинах обладнання, до безпечного рівня. Принцип

					КР.131.6121м.05.04.ПЗ	Арк.
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		79

його дії полягає в тому, що між заземлюваним корпусом обладнання та землею створюється металеве з'єднання високої провідності, тому струм, що проходить через тіло людини, стає безпечним для життя.

Напруга дотику буде тим меншою, чим меншим є опір заземлення. Згідно правил експлуатації електроустановок (ПУЕ) опір не повинен перевищувати 4 Ом в установках із напругою до 1000 В та 0,5 Ом в установках із напругою вищою за 1000 В.

Заземленню підлягають всі електроустановки вище 440 В постійного та 380 В змінного струму в приміщеннях із підвищеною небезпекою заземлення виконують при напрузі 42 В та вище змінного струму та 110 В і вище постійного струму.

В будівлях прокладають магістраль заземлення, яку з'єднують із заземлювачем не менше ніж у 2-х місцях. В якості природних заземлювачів рекомендують використовувати заземлювачі опор повітряних ліній електропередач, з'єднаних грозозахисними лініями. Або використовують штучні заземлювачі: стрижні з кутової сталі 50x50, 60x60, 75x75 з товщиною стінки не менше 4 мм, довжиною 2,5-3 м; сталеві труби діаметром 50-60 мм, довжиною 2,5-3 м з товщиною стінки не менше 3,5 мм; пруткова сталь діаметром не менше 10 мм, довжиною до 10 м і більше.

Потужність установки електронно-променевого зварювання УЛС-1 складає 300 КВт, до її складу входить: джерело живлення ЭЛА 60/60 з напругою – 60 кВ, струмом – 500 мА; шафа керування, що містить прилади виміру та контролю. До складу обладнання входять високовольтні блоки 60кВ, цей факт викликає необхідність з'єднання обладнання із контуром заземлення. Виконаємо розрахунок мінімально необхідних параметрів контуру заземлення для установки згідно з методикою [27].

Для визначення ефективності контуру заземлення необхідно розрахувати його опір розтіканню струму R_z та порівняти із допустимим опором, згідно вимог ПУЕ $R_{\text{доп}} = 0,5$ Ом. Умова відповідності контуру: $R_z < R_{\text{доп}}$.

В якості головного елемента контуру обираємо трубу діаметром $d = 5$ см.

Для визначення опору однієї труби використаємо наступну формулу:

					КР.131.6121м.05.04.ПЗ	Арк.
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		80

$$R_T = \frac{0,366 \rho}{l} \left[\lg \frac{2l}{d} + \frac{1}{2} \lg \frac{4h+l}{4h-l} \right] \text{ Ом}, \quad (4.1)$$

де $\rho = 2,2 \cdot 10^3$ Ом - питомий опір ґрунту (замірювався за допомогою вимірювача опору М-416); $l = 300$ см – довжина труби; $h = 230$ см – глибина закладеної труби від поверхні землі до середини труби.

$$R_T = \frac{0,366 \cdot 2,2 \cdot 10^3}{300} \left[\lg \frac{2 \cdot 300}{5} + \frac{1}{2} \lg \frac{4 \cdot 230 + 300}{4 \cdot 230 - 300} \right] = 5,97 \text{ Ом}$$

Визначимо приблизну кількість n вертикальних заземлювачів:

$$n = \frac{R_T}{R_{\text{доп}}} \text{ шт} \quad (4.2)$$

$$n = \frac{5,97}{0,5} = 11,94 \text{ шт}$$

Приймаємо $n = 13$ труб, труби розташовуємо трикутниками при цьому відстань між ними дорівнює довжині труби. Далі треба розрахувати довжину полоси, яка з'єднує вертикальні заземлювачі:

$$L = 1,05 \cdot a \cdot n \text{ м}, \quad (4.3)$$

де $a = 300$ см – довжина між трубами, тоді:

$$L = 1,05 \cdot 300 \cdot 13 = 4095 \text{ см}$$

Розрахуємо опір розтіканню струму лінії заземлюючої смуги:

$$R_n = 0,366 \frac{\rho}{L} \lg \frac{L^2}{bn} \text{ Ом}, \quad (4.4)$$

де $b = 20$ см – ширина смуги, тоді:

$$R_n = 0,366 \frac{2,2 \cdot 10^3}{4095} \lg \frac{4095^2}{20 \cdot 13} = 0,945 \text{ Ом}$$

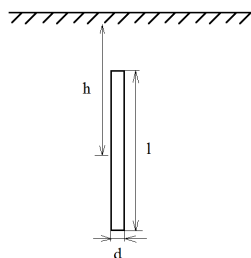
Загальний опір розтіканню струму розраховується за формулою:

$$R_3 = \frac{1}{\frac{\eta_2}{R_n} + \frac{\eta_1}{R_T}} \text{ Ом}, \quad (4.5)$$

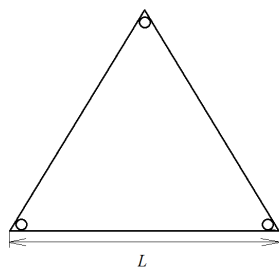
де $\eta_1 = 0,72$ – коефіцієнт використання заземлювачів; $\eta_2 = 0,5$ – коефіцієнт використання з'єднувальної смуги.

$$R_3 = \frac{1}{\frac{0,5}{0,945} + \frac{13 \cdot 0,72}{5,97}} = 0,47 \text{ Ом}$$

Таким чином загальний опір розтіканню струму $R_3 = 0,47 < R_{\text{доп}} = 0,5$, тобто параметри даного контуру можна вважати задовільними для заземлення наявного високовольтного устаткування. Схематичне зображення контуру заземлення зображено на рисунку 4.1.



а)



б)

Рис. 4.1 Контур заземлення:
а) схема залягання електродів в землі;
б) схематичне розташування електродів, з'єднаних смугою.

Розрахунок місцевої вентиляції.

Місцева вентиляція надзвичайно ефективна в тих випадках, коли зони забруднення повітря локалізовані. Така система в основному використовується на виробництві.

Проведемо орієнтовний розрахунок місцевої вентиляції за методикою [22].

Приймаємо допустимі максимальні та мінімальні швидкості руху повітря в повітропроводі мережі. Максимальну швидкість руху повітря в лініях приймаємо відповідно до таблиці 4.1, в гілках - швидкість повітря повинна бути менше, ніж в магістралях [21].

Таблиця 4.1 – Швидкість руху повітря, що допускається в повітропроводах припливно-витяжних систем при механічному спонуканні

Елемент системи	Швидкість, м/с
Магістральні повітропроводи в промислових будівлях	До 12
Відгалужені повітропроводи в промислових будівлях	До 6
Магістральні повітропроводи в громадських і допоміжних будівлях	До 8
Відгалужені повітропроводи в громадських і допоміжних будівлях	До 5

Для вентиляції цієї зони плануємо повітропровід з одним місцевим відсмоктуванням. Забруднене повітря проходить по трубопроводу, очищається на фільтрі і виводиться в атмосферу. Розрахунковий діаметр повітропроводу розраховується за формулою:

$$d_p = \sqrt{\frac{4 \cdot L}{3600 \cdot \pi \cdot V_{\text{пр}}}}, \text{ м} \quad (4.6)$$

де L – витрата повітря на ділянці, приймаємо $2600 \text{ м}^3/\text{год}$; $V_{\text{пр}}$ – прийнята швидкість руху повітря на ділянці – 12 м/с

$$d_p = \sqrt{\frac{4 \cdot 2600}{3600 \cdot 3,14 \cdot 12}} = 0,275 \text{ м}$$

Згідно з ГОСТ 24751-81 підбираємо трубопроводи номінального діаметра, який повинен бути більше або дорівнювати розрахунковому. Діаметр повітропроводу приймаємо рівним 280 мм. Фізична швидкість руху повітря визначається за формулою:

$$V = \frac{4 \cdot L}{\pi \cdot 3600 \cdot d^2}, \text{ м/с} \quad (4.7)$$

$$V = \frac{4 \cdot 2600}{3,14 \cdot 3600 \cdot 0,28^2} = 11,7 \text{ м/с}$$

Стінки повітропроводу будуть виготовлені з оцинкованої сталі. Абсолютна шорсткість стін складе 0,2 мм. У цьому випадку поправочний коефіцієнт дорівнюватиме $C_T = 1,1$.

Втрати тиску для подолання опору тертя обчислюються за формулою:

$$P_{\text{тр}} = C_T \cdot l \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot V^2 \quad \text{м/с} \quad (4.8)$$

де, $\lambda = 0,05$ – коефіцієнт гідравлічних втрат; l – довжина прямолінійної ділянки, м; ρ – щільність повітря для нормальних умов, $\rho = 1,2 \text{ кг/м}^3$;

$$P_{\text{тр}} = 1,1 \cdot 10 \cdot 0,05 \cdot \frac{1,2}{0,3 \cdot 2} \cdot 11,7^2 = 150,58 \text{ Н/м}^2$$

Також необхідно враховувати ділянки з місцевим опором.

На ділянці розрізняють такі місцеві опори:

- місцеве всмоктування з коефіцієнтом місцевого опору $\zeta = 1,3$;
- відгалуження під кутом 90° з відношенням $= 1,0$, що має коефіцієнт $\zeta = 0,4$;
- індивідуальна заслінка з коефіцієнтом $\zeta = 0,0-100$ в залежності від ступеня відкриття; у робочому режимі коефіцієнт опору приймається рівним $\zeta = 0,0$;
- дифузор з парасолькою з коефіцієнтом тертя $\zeta = 0,8$.

Сума локальних опорів тоді дорівнюватиме:

$$\sum \zeta = 1,3 + 0,4 + 0,8 + 0,0 = 2,5 \quad (4.9)$$

Розрахунок втрат тиску для подолання місцевих опорів проводимо за формулою:

$$P_{\text{мс}} = \frac{\rho \cdot \lambda \cdot \xi \cdot V^2}{2} \quad (4.10)$$

де, $\lambda = 0,05$ – коефіцієнт гідравлічних втрат; ξ – коефіцієнт місцевого опору; ρ – щільність повітря, кг/м^3 .

$$P_{\text{мс}} = 0,05 \cdot 1,2 \frac{2,5}{2} \cdot 11,7^2 = 10,26 \text{ Н/м}^2$$

Втрати тиску на ділянці розраховуємо за формулою:

$$P_{\text{уч}} = P_{\text{тр}} + P_{\text{мс}} \quad (4.11)$$

$$P_{\text{уч}} = 150,58 + 10,26 = 160,84 \text{ Н/м}^2$$

Повний опір мережі визначаємо за формулою (10):

$$R_c = \frac{P}{L^2} \quad (4.12)$$

де P – повна втрата тиску мережі на подолання опору тертя і місцевих опорів, Н/м^2 ; L – витрата повітря в мережі, $\text{м}^3/\text{с}$; R_c – коефіцієнт, що характеризує геометрію та аеродинаміку мережі.

$$R_c = 160,84 / (2600/3600)^2 = 308,1 \text{ Н} \cdot \text{с}^2/\text{м}^8$$

Розрахункова потужність вентилятора визначаємо за формулою:

$$L_{\text{в.р}} = L_c = 2600 \text{ м}^3/\text{год} \quad (4.13)$$

При визначенні режиму роботи вентилятора методом накладення характеристик визначаємо наступні параметри: потужність, тиск, ККД вентилятора, кутова швидкість, частота обертання ротора вентилятора.

Для вибору вентилятору рекомендовано побудувати характеристику мережі. Необхідне значення тиску, створюваного вентилятором має бути $P_{\text{в.р}} = R_c \cdot K_{\text{в.р}}^2 \cdot L_{\text{в.р}} = 1725,3 \text{ Н/м}^2$. Проводимо вибір вентилятора, який буде працювати під таким навантаженням. Для роботи будемо спиратися на експлуатаційні характеристики вентилятора ВР 280-46-2,5.

Характеристики вентилятора показані на рис.4.2.

Швидкість обертання вентилятора складе 2800 об/хвил. Потужність вентилятора складе 1,5 кВт, ККД = 69%.

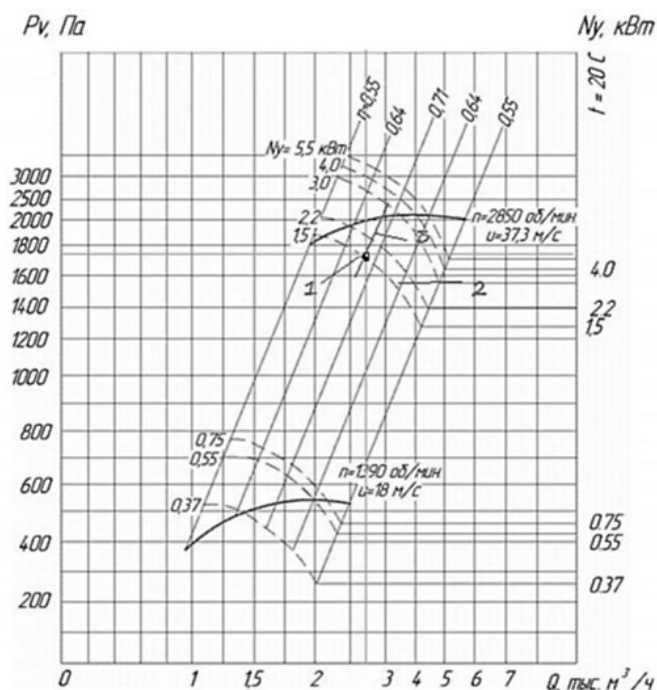


Рис. 4.2 – Технічні характеристики вентилятора ВР 280-46-2,5:
 1 – розрахунковий режим роботи,
 2 – характеристика вентилятора,
 3 – характеристика мережі

Відцентровий вентилятор ВР 280-46-2,5 призначений для вентиляції повітря в найрізноманітніших за площею і призначенням приміщеннях. Встановлюється в звичайних системах вентиляції та опалення. Використовується на виробничих технологічних установках.

Відцентрові вентилятори цього типу призначені для переміщення пилових повітряних мас і газоповітряних сумішей (з вмістом пилу до 0,1 г/м³), з температурою до 80°C для стандартних вентиляторів і до 120°C для термостійких, безволокнистих, липких, вибухонебезпечних компонентів.

Таблиця 4.2. Технічні характеристики відцентрового вентилятора ВР 280-46-2,5

Характеристики	Одиниця виміру	Значення
Габаритні розміри	мм	460x190x198
Маса	кг	53
Потужність	кВт	7,5
Частота обертання	об./хвил	3000
Повний тиск	Па	1600-2000
Максимальна продуктивність	м³/год.	2000

Для очищення повітря приймаємо фільтр «Циклон» НИОГаз продуктивністю 2000 м³/год.

Висновки.

1. Проаналізовано потенційні небезпеки та шкідливі чинники при електронно-променевому зварюванні титанових сплавів.

2. Встановлено, що на підставі відповідних нормативних актів кожне підприємство видає свої накази та інструкції з охорони праці, що стосуються усіх аспектів починаючи з робочого одягу, правил безпеки при переміщенні по підприємству, пожежної безпеки ... та закінчуючи інструкціями з безпеки і правил охорони праці на кожному робочому місці відповідно до робіт, що виконуються.

3. Розроблені правила безпеки при їх дотриманні дозволяють нівелювати небезпеку отримання травм, шкоди здоров'ю в результаті впливу постійних виробничих шкідливих і небезпечних факторів та при виникненні небезпечних і аварійних ситуацій.

4. Проведено розрахунок місцевої вентиляції та розраховані основні параметри контуру заземлення, як захисного фактору при роботі із приладами високої напруги. Розрахунок виконаний згідно вимог ПУЕ та відповідає нормативам охорони праці.

5. Отримані параметри дозволяють нівелювати небезпеку отримання травм в результаті ураження струмом високої напруги при виникненні аварійних ситуацій.

5. РОЗРАХУНОК ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СОБІВАРТОСТІ ТА ЕКОНОМІЧНОГО ЕФЕКТУ ВІД ВИБРАНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ЗВАРЮВАННЯ ДИСКІВ БАРАБАНА РОТОРА КНТ

Доцільність використання вибраної технології зварювання дисків з різних сплавів титану при виготовленні або ремонті барабана ротору компресора КНТ газотурбінного двигуна на виробництві визначаємо за допомогою розрахунку технологічної собівартості продукції. Оскільки йдеться про серійне виробництво, то розрахунок собівартості будемо вести у порівнянні із барабаном ротору КНТ виконаним з одного титанового сплаву ВТ9.

Технологічна собівартість – це сума поточних витрат виробництва, які безпосередньо пов’язані з виконанням варіанту технологічного процесу.

Зазвичай це витрати на:

- матеріальні витрати (за вирахуванням зворотних відходів);
- витрати на оплату праці;
- відрахування на соціальні потреби;
- амортизація основних фондів;
- інші витрати.

Величину технологічної собівартості продукції розраховуємо за формулою:

$$C_T = C_M + C_{з.п.} + C_e + C_{об} \quad (5.1)$$

де C_M – витрати на основні та допоміжні матеріали; $C_{з.п.}$ – витрати на заробітну плату; C_e – витрати на технологічну електроенергію; $C_{об}$ – витрати на амортизаційне відрахування, поточне обслуговування та ремонт зварювального устаткування.

Для розрахунку технологічної собівартості разової та річної програми випуску барабанів ротору компресора КНТ задамося наступними вихідними даними:

					КР.131.6121м.05.05.ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Студент		Сичов			РОЗРАХУНОК ЕКОНОМІЧНОЇ ДОЦІЛЬНОСТІ ВИБРАНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ЗВАРЮВАННЯ			
Керівник		Костін						
Консул.								
Н. Контр.								
Зав.каф.		Драган						
					Літ.	Аркуш	Аркушів	
							87	98
					НУК ім.адм.Макарова			

Таблиця 5.1. Вихідні дані для розрахунку:

		BT9	BT3-1+BT9
1.	Об'єм одиниць на одну готову продукцію (на 1 барабан ротору).	7 дисків на 1 ротор	4д. BT3-1 3д. BT9
2.	Річна програма готової продукції при номінальному навантаженні підприємства, шт.	30	30
3.	Вартість зварювального устаткування, грн.: установка УЛС-1 - вартість первинна / за зносом	734 000 / 334 000	734 000 / 334 000
4.	Електроенергія для технологічних потреб 1 кВт-год, грн.	5,6	5,6
5.	Трудомісткість складання виробу, н-год.	1	1
6.	Трудомісткість зварювання виробу, н-год.	14	14
7.	Часова тарифна ставка зварника, грн/год.	88,57	88,57
8.	Часова тарифна ставка слюсаря, грн/год.	50	50
9.	Норма амортизації, %	6,5	6,5
10.	Норма витрат на поточний ремонт обладнання, %.	5	5
11.	Собівартість 1 од. (грн): - 1 диск із BT3-1 (1-3ст./4-7ст)= 1780 / 2070 - 1 диск із BT9 (1-3ст./4-7ст)= 2000 / 2360	15 400	14420

Витрати на присадні матеріали та інертну середу – відсутні і в даному випадку не розраховуються.

Тому величина C_m буде включати лише Π_i – вартість одиниці матеріалу (вартість 1 титанового диску) для виготовлення 1 одиниці готової продукції (1 барабана ротора), n – кількість дисків:

$$C_m = \sum \Pi_i * n \quad (5.2)$$

Розрахування витрат на матеріали барабана ротора.

Собівартість 1 од. (грн):

- 1 диск із BT3-1 (для 1-3 ступені / для 4-7 ступені) = 1780 / 2070

- 1 диск із BT9 (для 1-3 ступені / для 4-7 ступені) = 2000 / 2360

а) вартість матеріалу для барабана ротора із сплаву BT9

$$C_m = 3 \text{ од.} * 2000 \text{ грн.} + 4 \text{ од.} * 2360 \text{ грн.} = 15\,400 \text{ грн.}$$

б) вартість матеріалу для барабана ротора із сплавів BT3-1 (1, 2, 5, 7 ступені) + BT9 (3, 4, 6 ступені)

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КР.131.6121м.05.05.ПЗ

Арк.

88

$$C_M = 2\text{од.} \cdot 1780 \text{ грн.} + 1\text{од.} \cdot 2000 \text{ грн.} + 2\text{од.} \cdot 2070 \text{ грн.} + 2 \text{ од.} \cdot 2360 \text{ грн.} = 14\,420 \text{ грн.}$$

Розраховані витрати на матеріал заносимо в табл.5.1.

Витрати на заробітну плату розраховуємо, як суму повних витрат на заробітну плату основних виробничих робочих, що беруть участь у виконанні технологічного процесу

$$C_{з.п.} = \sum_{i=1}^n C_{з.п.} i \quad (5.2)$$

де $C_{з.п.} i$ – повні витрати на заробітну плату (основну, додаткову та єдиний соціальний внесок (ЄСВ)) робочих при виконанні i -ої операції; n – число операцій техпроцесу.

Повні витрати на заробітну плату робочих при виконанні i -ої операції розраховуємо за формулою:

$$C_{з.п.} = (1,15 \cdot T_p \cdot \Gamma_{ст}) \cdot 1,22, \quad (5.3)$$

де 1,15 – рівень додаткової з.п.; T_p – трудомісткість виконання операції, н-год; $\Gamma_{ст}$ – середня годинна тарифна ставка, грн/год; 1,22 – єдиний соціальний внесок. Трудомісткість зварювання і складання барабана відома (табл.5.1.)

Тому заробітна плата за виготовлення 1 конструкції буде становити:

$$\text{зварника } C_{з.п.} = (1,15 \cdot 14 \cdot 88,57) \cdot 1,22 = 1740 \text{ грн.}$$

$$\text{слюсаря } C_{з.п.} = (1,15 \cdot 1 \cdot 50) \cdot 1,22 = 70 \text{ грн.}$$

$$\text{Разом } C_{з.п.} = 1740 + 70 = 1810 \text{ грн.}$$

Перевіряємо з вихідними даними:

$$\text{Основна зарплата зварника: } 14 \text{ н-год.} \cdot 88,57 \text{ грн/год.} = 1240 \text{ грн.}$$

$$\text{Додаткова зарплата зварника} = 200 \text{ грн.}$$

$$\text{Відрахування на соцстрахування зварника} = 320 \text{ грн.}$$

$$\text{Основна зарплата слюсаря: } 1 \text{ н-год.} \cdot 50 \text{ грн/год.} = 50 \text{ грн.}$$

$$\text{Додаткова зарплата слюсаря} = 8 \text{ грн.}$$

$$\text{Відрахування на соцстрахування слюсаря} = 12 \text{ грн.}$$

$$\text{Загалом } 1240 + 200 + 320 + 50 + 8 + 12 = 1830 \text{ грн.}$$

$$\text{Приймаємо } C_{з.п.} = 1830 \text{ грн.}$$

Витрати на технологічну електроенергію розраховуємо як

$$C_e = W \cdot C_e \quad (5.4)$$

де W – повні витрати електроенергії на зварювання, кВт-год; C_e – вартість 1 кВт-год електроенергії, грн.

Витрати електроенергії розраховуються за формулою:

$$W = \frac{U_d \cdot I_z}{\eta \cdot 1000} \cdot \tau + W_0(\tau_1 - \tau), \quad (5.5)$$

де U_d – напруга дуги, В; I_z – зварювальний струм, А; η – ККД зварювального поста, приймаємо 0,7; W_0 – потужність, що витрачається джерелом живлення під час холостого ходу, приймаємо $W_0=3$ кВт; τ – час горіння дуги (основний час); $\tau_1=\tau/K_n$ повний час зварювання з урахуванням коефіцієнта K_n використання зварювального поста ($K_n=0,5\dots 0,8$) $K_n=0,7$.

Витрати електроенергії на зварювання дисків в ротор:

$$W = \frac{60000 \cdot 0,5}{0,7 \cdot 1000} \cdot 14 + 3 \cdot (20 - 14) = 618 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Витрати на електроенергію будуть дорівнювати:

$$C_e = 618 \cdot 5,6 = 3460 \text{ грн.}$$

Витрати на амортизаційні відрахування та поточний ремонт зварювального обладнання.

Загальні витрати за цією складовою технологічної собівартості розраховуються за формулою

$$C_{об} = \Sigma(C_a + C_p) \quad (5.6)$$

де C_a та C_p – амортизаційні відрахування та витрати на поточний ремонт обладнання відповідно.

$$C_a = \frac{C_{об} \cdot H_a}{100} = \frac{334000 \cdot 6,5}{100 \cdot 10} = 2170 \text{ грн;}$$

$$C_p = \frac{C_{об} \cdot H_p}{100} = \frac{334000 \cdot 5}{100 \cdot 10} = 1670 \text{ грн;}$$

$$C_{об} = 2170 + 1670 = 3840 \text{ грн.}$$

Таким чином, технологічна собівартість виготовлення разової програми продукції у вигляді 2 одиниць (барабан + його зразок-свідок) буде коштувати:

а) для барабана ротору із сплаву ВТ9

$$C_{T9} = 3840 + (15400 + 1830 + 3460) \cdot 2 = 45\,220 \text{ грн.}$$

б) для барабана ротору із сплавів ВТ3-1+ВТ9

$$C_{T3-9} = 3840 + (14420 + 1830 + 3460) \cdot 2 = 43\,260 \text{ грн.}$$

Технологічна собівартість виготовлення річної програми продукції у вигляді 30 + 30 одиниць (барабан ротору+ його зразок-свідок) буде коштувати:

а) для барабана ротору із сплаву ВТ9

$$C_{T9} = 45\,220 \cdot 60 = 2\,713\,200 \text{ грн.}$$

б) для барабана ротору із сплавів ВТ3-1+ВТ9

$$C_{T3-9} = 43\,260 \cdot 60 = 2\,595\,600 \text{ грн.}$$

$$E = C_{T9} - C_{T3-9} = 2\,713\,200 - 2\,595\,600 = 117\,600 \text{ грн.}$$

Орієнтовна економія тільки на технологічній собівартості складає: для одного барабана ротора 1960 грн., а для річної програми 117 600 грн. або 2,74%.

Таблиця 5.2. Зведені витрати на технологічну собівартість складання і зварювання барабану ротора компресора КНТ

Найменування статей витрат	Значення показника		
	На одиницю продукції із ВТ9	На одиницю продукції із ВТ3-1+ВТ9	На річну програму
Річна програма випуску виробів, од.			30
Основні матеріали, грн.	15 400	14 420	432 600
Заробітна плата, грн.	3660	3660	109 800
Електроенергія, грн.	6920	6920	207 600
Амортизаційні відрахування по обладнанню	2170	2170	65 100
Витрати на поточний ремонт	1670	1670	50 100
Технологічна собівартість робіт	45 220	43 260	2 595 600
Економія витрат за обраним способом	0	1 960	117 600

ВИСНОВКИ

1. Приблизний розрахунок економічної частини показує, що при збереженні механічних та технологічних властивостей готової продукції, тобто властивостей барабана ротора компресора КНТ виконаного з дисків різних титанових сплавів, тільки на окремому вузлі досягається економія матеріальних витрат.

2. В розрізі даного вузла економія невелика, лише приблизно 2,74% технологічної собівартості. Однак, при комплексному підході до питань економії матеріальних витрат у серійному виробництві, наприклад при ремонті газотурбінних установок, або коли відсутні комплектуючі із заданих матеріалів, такий підхід із заміною одного титанового сплаву іншим є оправданим, економічно обґрунтованим та доцільним.

					КР.131.6121м.05.05.ПЗ	Арк.
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		92

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.

Сучасна газотурбінна установка (ГТУ) є високотехнологічним і дуже дорогим виробом. Актуальним є питання зменшення вартості, підвищення ресурсу роботи, ремонтпридатності ГТУ. Одним із шляхів вирішення цієї проблеми є застосування зварних з'єднань деталей та вузлів з різних сплавів.

У даній магістерській роботі проведено дослідження та вибір технології зварювання дисків барабану ротора компресора низького тиску газотурбінного двигуна із різних титанових сплавів BT3-1 та BT-9.

За результатами досліджень були вирішені поставлені задачі і зроблено наступні висновки.

1. Проведено аналіз властивостей титанових сплавів. Внаслідок своєї міцності, температурної та корозійної стійкості титанові сплави залишаються основним конструкційним матеріалом для деталей вузлів ГТУ (до 40%). Властивості сплавів залежать від легуючих елементів та термічної обробки. Вони визначають поліморфізм, структуру, фази та властивості кожного сплаву. Переважають у компресорах ГТД сплави псевдо- α та $(\alpha+\beta)$ -класу.

2. При аналізі проблем зварювання титанових сплавів з'ясовано, що основними проблемами є - висока активність титану до атмосферних газів (кисень, азот, водень) при підвищених температурах (600 і 400°C), значна схильність до зростання структурних зерен при нагріванні. Ці газы викликають крихке руйнування, підвищують схильність до холодних тріщин. Поширеніший дефект – пори, які викликаються воднем і киснем, і залежать від теплоти при зварюванні. Тріщини та пори найчастіше виникали в тих з'єднаннях, де порушували технологію захисту шва в процесі зварювання.

3. Визначено методи контролю якості зварних з'єднань з титану для дослідження – механічних характеристик, твердості, спектрального аналізу, проведення металографічних досліджень.

					КР.131.6121м.05.00.ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Студент	Сичов				ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ		
Керівник	Костін						
Консул.							
Н. Контр.							
Зав.каф.	Драган						
						Літ.	Аркуш
							93
							98
						НУК	
						ім. адм. Макарова	

4. Проаналізовано наявні способи зварювання титанових сплавів.

5. Проведено аналіз досліджуваних сплавів ВТЗ-1 та ВТ9. Обидва сплави відносяться до деформуємих сплавів, клас по структурі ($\alpha+\beta$) і мають обмежену зварюваність. По хімічному складу у ВТ9 відсутній Cr, та інші концентрації Fe (заліза) і Zr (цирконію). Механічні властивості та мікроструктура показує ідентичність сплавів.

6. Розроблена програма дослідження (експерименту).

7. За вибраним способом зварювання (ЕПЗ) визначено технологію та призначено режими зварювання (універсальна установка УЛС-1, $U_{\text{приск}} = 60$ кВ, вакуум в камері $8 \cdot 10^{-3}$ мм.рт.ст. ($1,06 \cdot 10^{-2}$ Па):

- прихватка (4 шт. по 20 мм діаметрально протилежно), $I_{\text{звар}}=30$ мА, $I_{\text{фокус}}=620$ мА, відстань до пушки 175 мм, швидкість зварювання 30 м/год.;

- зварювання $I_{\text{звар}}=60$ мА, $I_{\text{фокус}}=620$ мА, відстань до пушки 175 мм, швидкість зварювання 30 м/год. (8,3 мм/хвил.).

Зазначено на ретельну очистку і знежирення деталей перед зварюванням, жорстке закріплення дисків з натягом у спеціальному складально-зварювальному пристрої (зазор не більше 0,02 мм, натяг 0,03...0,06), зварювання виробу здійснювати по уточненим на зразку-свідку параметрам.

8. За результатами дослідження механічних властивостей встановлено:

- міцність зварного шву на розрив дорівнює $\sigma_B=1030 \geq [\sigma_B^{20}]=927$ МПа;
- міцність при $t=500$ °С $\sigma_B=696$ МПа (ВТЗ-1) та $\sigma_B=677$ МПа (ВТ9)

Руйнування усіх зразків відбувалося по основному металу;

- довготривала міцність при $t=450$ °С та навантаженні $\sigma=540$ МПа склала $\tau = 161$ год. та 229 год. $\geq [\tau]=100$ год. Зразки знято без руйнування.

9. За результатами дослідження спектрального та металографічного аналізу встановлено:

- в макроструктурі перерізів усіх зварних швів, основному металі, зоні термічного впливу, в площині шліфу – тріщин, пор, непроварів не виявлено;

- твердість шву 388 НВ > 321 НВ основного металу; мікротвердість шву від 368 до 450 μ Н, що $\geq 360...375$ μ Н основного металу;

- в зоні ЗТВ шву зерна рівновісні, мають дендритну структуру, стовпчасту направленість, мікроструктура відповідає допустимій мікроструктурі 9-типної шкали мікроструктур ОСТ1 90197.

Експериментально підтверджено, що основний метал та метал зварного шву задовольняє вимогам інструкцій та програмі дослідження по хімічному складу, макро- та мікроструктурі.

Зварюваність сплавів ВТЗ-1 та ВТ9 способом ЕПЗ – добра.

10. При дослідженні зварювальних деформацій металографічний аналіз показав - в структурі перерізів зварних швів всіх зразків тріщин, пор і непроварів не виявлено. Причини цього: 1) Зварювання у вакуумі. Надходження водню чи кисню відсутнє. 2) Диски кріплять жорстко в спец. оснастку з натягом. Шов формується із самих матеріалів. 3) Площа нагріву мінімальна – розгортання проміня 1,5 мм. 4) При товщині металу 8,5 мм і жорсткому закріпленні дисків при зварюванні мінімальне короблення, відсутні кутові деформації, метал не деформується. Через це необхідність у розрахунку зварювальних деформацій відсутня.

11. Охорона праці при роботах на установках ЕПЗ регламентована нормативами та посадовими інструкціями. Звернуто увагу на електробезпеку (високий струм 30-60 кВ) та рентгенівське випромінювання. Зроблено розрахунок місцевого заземлення установки УЛС-1 та місцевої вентиляції.

12. Економічні розрахунки показали, що технологічна собівартість складально-зварювальних робіт одиниці продукції за розробленою технологією зварювання складає 43 260 грн., річної програми – 2 595 600 грн. Економія витрат на одиницю продукції склала 1 960 грн., за річною програмою 117 600 грн.

Таким чином, вибрана технологія зварювання та заміна дисків барабану ротору компресора ГТУ з одного титанового сплаву на інший є оправданою, економічно обґрунтованою та доцільною.

					КР.131.6121м.05.00.ПЗ	Арк.
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		95

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Ilyin, A. A. Titanium alloys. Composition, structure, properties: Reference book / Ilyin A. A., Kolachev B. A., Polkin I. S. / М. : VILS–MATI, 2009, 520 p.
2. Бутенко Ю.В. Виробництво зварних конструкцій в судовому газотурбобудуванні / Ю.В.Бутенко, В.Ф.Квасницький, В.В.Квасницький, А.Ю.Бутенко/– Миколаїв: НУК. 2014 – 168 с.
3. Загальна будова і принцип дії ГТД та його складових частин / відкритий інтернет ресурс: <https://mirmarine.net/svm/seu/664-obshchee-ustrojstvo-i-printsip-dejstviya-gtd-i-ego-sostavnykh-chastej>
4. «Особенности руйнування двофазних титанових сплавів в повітряній атмосфері і корозійноактивних середовищах / тема дисертації і автореферату/, кандидат наук Напрієнко Сергій Олександрович / 05.16.2001: <https://www.dissercat.com/content/osobennosti-razrusheniya-dvukhfaznykh-titanovykh-splavov-v-vozdushnoi-atmosfere-i-korroziionn>
5. Pavlova T.V. Titanium alloys for gas turbine engines / T.V. Pavlova, O.S. Kashapov, N.A. Nochovna / Article / journal "All materials. Encyclopedic Reference Book", № 5, 2012, VIAM.
6. Квасницький В.В. Розробка припою для жароміцних сплавів на основі інтерметаліду Ni_3Al (Текст)/ В.В. Квасницький, В.М. Коржик, В.Ф. Квасницький, Г.П.Мяльніца, Чунлін Дун, Т.В. Прядко, М.В. Матвієнко, Є.А.Бутурля // Стаття, НУК, - Миколаїв, 2020, с. 32.
7. Технологія зварювання титана та його сплавів /Стаття/ відкритий інтернет ресурс: <https://weldering.com/tehnologiya-svarki-titana-splavov-0>
8. Features of titanium welding / Article/ open Internet resource: https://metallischekiy-portal/articles/svarka/svarka_titana/osobennosti_svarki_titana

					КР.131.6121м.05.00.ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Студент	Сичов				Список використаної літератури		Літ.	Аркуш
Керівник	Костін							96
Консул.								98
Н. Контр.							НУК ім.адм. Макарова	
Зав.каф.	Драган							

9. Павленко Д.В. Перспективні матеріали і технології для деталей ротора компресора ГТД / Д. В. Павленко, Т. И. Прибора, В. Ю. Коцюба, С. Н. Пахолка / журнал / Авіаційно-космічна техніка і технологія. - 2016. - № 8. - С. 128–138.
10. Конструкція компресора низького тиску /довідник/ відкритий інтернет ресурс: <https://studfile.net/preview/6653934/page:8/>
11. Технологія зварювання титана та його сплавів /Стаття/ відкритий інтернет ресурс: <http://www.autowelding/publ/1/1/1/2-1-0-178>
12. Гуревич С.М. Металургія і технологія зварювання титана та його сплавів / С.М. Гуревич, В.Н. Замков, В.Е. Блащук и др. // 2-е вид., доп. и перероб. – К.: Наук. думка, 1986. – 240 с.
13. Гуревич С.М. Довідник по зварюванню кольорових металів [Текст]/ С.М. Гуревич: відп.ред. Замков В.Н. –2-е вид., перероб. И доп. – Київ.:Наук.думка, 1990. –512 с.
14. Волченко В.Н. Зварювання і зварювальні матеріали. (Текст). Довідник / Під заг. ред. В.Н. Волченко. – М.: «Металургія», том 1, 1991, – 528 с.; том 2, 1996, - 574 с.
15. Технологія зварювання титану та його сплавів /Стаття/ відкритий інтернет ресурс: <https://svarkaipayka/tehnologia/drugoe/tehnologiya-svarki-titana-i-ego-splavov.html>
16. Технологія зварювання титану /Довідник/ відкритий інтернет ресурс: <http://weldzone.info/technology/materials/153-svarka-titana-i-ego-splavov-/915-texnologiya-svarki-titana>
17. Зварювання титана в середовищі аргона / Стаття/ відкритий інтернет ресурс: <https://svarkagid/tehnologii/kak-svarit-titan-v-srede-argona.html>
18. Гуревич С.М. Зварювання високоміцних титанових сплавів /[Текст] / С.М.Гуревич, Ф.Р.Куліков, В.Н.Замков, Ю.Г.Кирилов, Н.А.Кушниренко. –М.: Машинобудування, 1975. –150 с.
19. Третьяков Ф.Е. Зварювання плавленням титану та його сплавів /[Текст]/ Ф.Е.Третьяков. – М.: Машинобудування, 1967. –143 с.
20. Шоршоров М.Х. Зварювання титана та його сплавів [Текст] / М.Х.Шоршоров, Г.В.Назаров. –М.: Машгіз, 1959. –133 с.

21. Зварювання титанових сплавів гібридним способом з використанням випромінювання Nd:YAG-лазера і дуги з неплавким електродом /Стаття, 2020/ відкритий інтернет ресурс: <http://svarka-24.info/svarka-titanovykh-splavov-gibridnym-sposobom/>

22. Назімов О.П. Дифузійне зварювання промислових титанових сплавів /[Текст]/ О.П.Назімов, Ю.В.Горшков, Н.Г.Белих, А.А.Ільїн //Автоматичне зварювання. –1979. –№9 (318). –с.47–51.

23. Марочник сталі та сплавів / Довідник/ відкритий інтернет ресурс: <http://www.splav-kharkov.com/>

24. Yashin M.S. Investigation of the structure and properties of VT3-1 alloy in relation to the technology of obtaining stampings of discs and blades / Article / Yashin M.S., Kapitanenko D.V.//Scientific and Technical Journal "Proceedings of VIAM", 2023, №8: http://www.viam-works./en/articles?art_id=2056

25. Звіт дослідження зварюваності матеріалів VT3-1 + VT9/ відділ зварювання/ ДП НВКГ «Зоря-Машпроект».

26. Інструкція з охорони праці №256 для зварника на електронно-променевих зварювальних установках. / Інструкція / ДП НВКГ «Зоря-Машпроект», 2021, с.23

27. Лабораторні та практичні роботи по курсу «Охорона праці» / Під ред. В.Н. Матвієнко. – Миколаїв: НУК ім.адм.Макарова. – 1978. –86с.

28. Камель Г. І. Контроль якості зварювання. Неруйнівні методи контролю / Навчальний посібник / Г. І. Камель, Ю. А. Гасило, П. С. Івченко, Р. Я. Романюк. — Кам'янське: ДДТУ, 2018, том 1. — 241 с.

29. Дубовий О.М. Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни «Прикладне матеріалознавство» / методичні вказівки / О.М.Дубовий, Н. Ю. Лебедєва, – Миколаїв: Видавництво НУК, 2017. – с.49

30. Системи вентиляції та кондиціонування [Електронний ресурс] / Вентиляція зварювального цеху. / – Режим доступу: <http://www.ads-vent/blog/ventilyaciya-svarochnogo-ceha>.

31. Вентиляція зварювального цеху – вимоги і норми, приклади розрахунків. [Електронний ресурс] / Промислова вентиляція. – Режим доступу: <https://rsvgroupp/ventilyatsiya/svarochnogo-tseha.html>.