

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

Кафедра зварювального виробництва

«Допущений до захисту»

Завідувач кафедри

 С. В. Драган

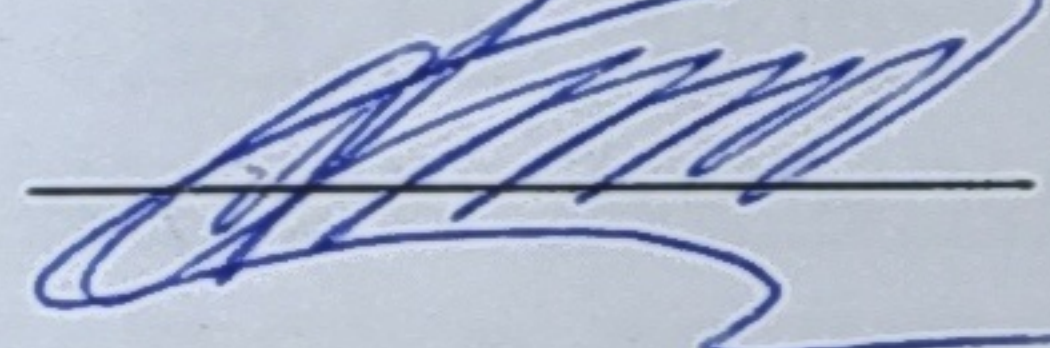
«16» 12 2024

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня вищої освіти «магістр»

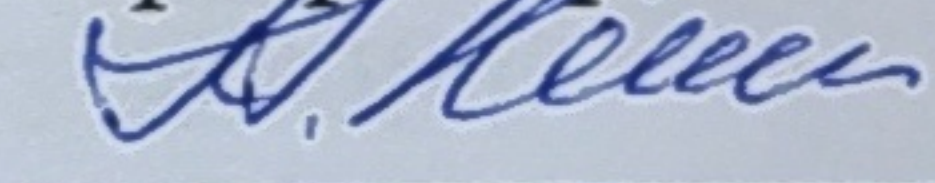
на тему: ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ЗВАРЮВАННЯ
ДЕТАЛЕЙ ГАЗОТУРБІННОГО ДВИГУНА ЗІ СПЛАВУ ЕП517

Виконав студент 6121М групи

 Антонов С. В.,

Керівник роботи

Професор, к.т.н., професор НУК

 Костін О. М.

Миколаїв 2024

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

(підпис)
«___» _____ 2024 р.

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

Студенту гр. 6121м Антонову Сергію Володимировичу

1. Тема роботи: Дослідження та розробка технології зварювання деталей газотурбінного двигуна із сплаву ЕП517-III

Керівник роботи Костін Олександр Михайлович

Затверджені наказом ректора № _____ від «___» _____ 2024 року

2. Термін подання роботи: _____

3. Вихідні дані по роботі: Матеріал дисків ступенів ротора компресора високого тиску газотурбінного двигуна з сталевго сплаву ЕП517-III

4. Перелік питань, що належать до розробки (найменування розділів)
Аналіз властивостей сплавів мартенситного класу. Огляд проблем технологій зварювання сплавів мартенситного класу. Методика проведення досліджень якості зварних з'єднань. Дослідження та розробка технології зварювання дисків ступенів ротора із сплаву ЕП517-III компресора КВТ. Вимоги охорони праці при електро- променевому зварюванні. Розрахунок економічного ефекту вибраної технології зварювання.

5. Перелік презентаційних матеріалів:

Аналіз властивостей сплавів мартенситного класу. Огляд проблем зварювання сплаву ЕП517-III. Методи контролю якості зварних швів.. Досліджувані сплави ЕП517-III. 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 _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Номер	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1.	Огляд проблем технології зварювання сплавів мартенситного класу в компресорах ГТУ.		
2.	Методика проведення досліджень якості зварних з'єднань.		
3.	Дослідження та розробка технології зварювання дисків ступенів ротора із сплаву ЕП517 компресора ГТУ		
4.	Охорона праці. Вимоги охорони праці при електро-променевому зварюванні		
5.	Розрахунок економічного ефекту вибраної технології зварювання на виробництві.		
6.	Оформлення пояснювальної записки		
7.	Презентаційні матеріали.		

Студент

_____ (підпис)

_____ (ПІБ)

Керівник роботи

_____ (підпис)

_____ (ПІБ)

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота присвячена огляду проблем зварювання сталевих корозійностійких та жароміцних сплавів сталей мартенситного класу у газотурбобудуванні при виробництві окремих вузлів газотурбінної установки, а саме ротору компресора високого тиску при зварюванні дисків барабану.

Проведено аналіз існуючих способів зварювання, визначено їх основні переваги та недоліки. За результатами аналізу зроблено висновок, що для серійного виробництва газотурбінного двигуна оптимальним варіантом є електронно-променеве зварювання у вакуумі. В роботі розглянуто склад та властивості сталевих сплавів ЕП517-Ш. Визначено режими та технологію електронно-променевого зварювання.

Розроблена комплексна методика на підставі якої проведено дослідження структурних, технологічних та експлуатаційних властивостей зварного з'єднання сплаву ЕП517-Ш.

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 чи при відсутності комплектуючих із заданого матеріалу.

Ключові слова: газотурбобудування, ротор компресора, сталеві сплави, технологія, електронно-променеве зварювання, режими, охорона праці.

					КР.131.6121м.01.05.00.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ANNOTATION

The qualification work is devoted to the review of the problems of welding corrosion-resistant and heat-resistant steel alloys of the martensitic class in gas turbine construction during the production of individual components of a gas turbine installation, namely the rotor of a high-pressure compressor during welding of drum discs.

An analysis of existing welding methods was carried out, their main advantages and disadvantages were determined. Based on the results of the analysis, it was concluded that electron beam welding in a vacuum is the optimal option for serial production of a gas turbine engine. The composition and properties of steel alloy EP517-III are considered in the work. Modes and technology of electron beam welding are determined.

A comprehensive methodology was developed on the basis of which structural, technological and operational properties of the welded joint of the EP517-III alloy were studied.

A set of occupational health and safety measures during work on electron-beam welding installations has been determined.

The results of the research, as well as the calculations of the economic part of the master's work, indicate the saving of material costs in serial production, for example, during repairs or in the absence of components from a given material.

Key words: gas turbine construction, compressor rotor, steel alloys, technology, electron-beam welding, modes, weld quality control, labor protection.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

KP.131.6121м.01.05.00.ПЗ

Арк.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1. ОГЛЯД ПРОБЛЕМ ТЕХНОЛОГІЇ ЗВАРЮВАННЯ СТАЛЕЙ МАРТЕНСИ- ТНОГО КЛАСУ	6
1.1 Використання сталей мартенситного класу в газотурбінних установках. Умови робочого середовища.....	6
1.2 Властивості і характеристики сталевих сплавів для роторів ГТУ.....	9
1.3 Огляд проблем при зварюванні сталей мартенситного класу.....	14
1.4 Висновки, мета та завдання магістерської роботи. Визначення програми дослідження.....	21
2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ ЯКОСТІ ЗВАРНИХ З'ЄД- НАНЬ.....	23
2.1 Дослідження механічних властивостей та твердості зварного шву.....	25
2.2 Металографічні дослідження, пошук макро- а мікрODEфектів, визначення мікротвердості. Висновки.....	30
3. ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ЗВАРЮВАННЯ ДИСКІВ БАРАБАНУ РОТОРА КОМПРЕСОРА ВИСОКОГО ТИСКУ ГАЗОТУРБІН- НОГО ДВИГУНА ЗІ СПЛАВУ ЕП517.....	35
3.1 Огляд способів зварювання сталі ЕП517 та їх особливості.....	35
3.2 Досліджуваний матеріал, його характеристики.....	44
3.3 Вибір способу та режимів зварювання у відповідності до програми дослі- дження	45
3.4 Програма проведення дослідження.....	48
3.5 Дослідження зварюваності ЕП517-ППО.....	50
3.6 Висновки дослідження.....	57
3.7 Дослідження зварюваності сталі ЕП517-Ш та ЕП609-Ш.....	58
3.8 Висновки дослідження.....	62
3.9 Дослідження зварювальних деформацій. Висновки.....	63
4. ОХОРОНА ПРАЦІ.....	66
4.1 Вимоги охорони праці при електронно-променевому зварюванні.....	66

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КР.131.6121м.01.05.00.ПЗ

Арк.

4.2 Розрахунок заземлення та місцевої вентиляції. Висновки.....	70
5. РОЗРАХУНОК ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СОБІВАРТОСТІ ВИБРАНОЇ ТЕХНО- ЛОГІЇ ЗВАРЮВАННЯ ДЕТАЛЕЙ ГТД	78
Висновки.....	83
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	84
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	88
ДОДАТКИ	

					<i>КР.131.6121м.01.05.00.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

В сучасній промисловості машинобудування високу ефективність мають газотурбінні установки з ККД не менше 40%. Сучасні газотурбінні установки використовуються при перекачуванні газу, на електростанціях, у суднобудуванні, авіації та ін. При виготовленні таких установок велика увага приділяється не тільки потужності, але й економічності та терміну служби. На відміну від суднобудування або авіації, на електростанціях та при перекачуванні газу до матеріалів турбіни вимоги значно зменшуються. Замість титанових сплавів BT3-1 та BT9 використовують сталі які не потребують роботи в агресивному середовищі та вони можуть мати більшу вагу, але завдяки меншій вартості виготовлення більш економічні. Тому в цій роботі ми розглянемо властивості та методи виготовлення барабанів компресорів високого тиску із сталі ЕП517 методом електронно-променевого зварювання.

Властивості сталі ЕП517 являють собою надзвичайно тверду кристалічну мікроструктура якої формується при дуже швидкому загартуванні, коли аустеніт перетворюється на мартенсит.

Мартенситне перетворення починається, коли аустеніт досягає температури початку мартенситу, і продовжується до досягнення нижньої температури перетворення. Як правило, чим вищий відсоток перетворення мартенситу, тим міцніше одержувана мартенситна сталь. Для підвищення пластичності після гарту мартенситна сталь піддається відпустці, що дозволяє виготовляти холоднокатані вироби методом роликового профілювання, навіть із сталі з дуже високою міцністю.

При виробництві холоднокатаної мартенситної сталі, рулонна холоднокатана сталь подається на лінію безперервного відпалу (CAL). На лінії CAL матеріал відпалюють, піддають загартуванню та відпустці. При швидкому загартуванні аустеніт, що утворився на лінії відпалу, перетворюється на мартенсит.

					<i>КР.131.6121м.01.05.00.ІІЗ</i>		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Студент		Антонов			ВСТУП НУК ім. адм. Макарова		
Керівник		Костін					
Завідувач		Драган					
					Літ.	Арк.	Акрушів
						6	

У процесі термообробки на лінії безперервного відпалу утворюється надміцна сталь із високою пластичністю. Завдяки малій кількості легуючих добавок (менше 2%) мартенситна сталь відрізняється гарною зварюваністю.

Властивості мартенситної сталі:

- надзвичайно висока межа плинності та межа міцності.
- чудові показники поглинання енергії та ударної в'язкості забезпечують придатність для виробництва компонентів газотурбінних установок.
- ідеальне рішення для оптимізації ваги ротору компресора.
- деталям та вузлам оптимізованої конструкції, виготовленим з мартенситної сталі, характерні самі висока міцність і невелика вага, що і для деталей та вузлів з титану
- корозійна стійкість на рівні титану дозволяє подовжити термін роботи двигунів турбіни.

					<i>KP.131.6121м.01.05.00.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1. ОГЛЯД ПРОБЛЕМ ТЕХНОЛОГІЇ ЗВАРЮВАННЯ СТАЛЕЙ МАРТЕНСИТНОГО КЛАСУ

1.1. Використання сталей мартенситного класу в газотурбінних установках. Умови робочого середовища.

У ГТУ компресор має осьову багатоступінчасту конструкцію. Завдяки такій конструкції, компресор володіє високим коефіцієнтом корисної дії, високою надійністю, високою продуктивністю.

Компресор – це машина, призначена для перетворення механічної енергії двигуна в корисну потенційну (у вигляді тиску та температури) та кінетичну (у вигляді швидкості) енергію газу.[1]

Компресор ГТУ складається з ротора та статора (корпусу). У корпусі розташовуються ряди послідовно закріплених напрямних лопаток. На дисках ротора компресора встановлені робочі лопатки. Висота робочих лопаток компресора послідовно зменшується у міру стиснення обсягу повітря. Стиснене повітря з певною температурою та тиском подається в камеру згорання.

З метою розширення області сталої роботи та підвищення ККД застосовуються двокаскадні та трикаскадні схеми осьових компресорів. У багатокаскадному компресорі кілька послідовно розташованих роторів автономно обертуються окремими турбінами (рис. 1.1).

Ротори осьового компресора виконуються барабанными, складеними з дисків. У 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 [1].

					КР.131.6121м.01.05.01.ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ОГЛЯД ПРОБЛЕМ ТЕХНОЛОГІЇ ЗВАРЮВАННЯ СТАЛЕЙ МАР- ТЕНСИТНОГО КЛАСУ		
студент		Антонов					
керівник		Костін					
Завідувач		Драган					
					Літ.	Арк.	Акрушів
					НУК ім. адм. Макарова		

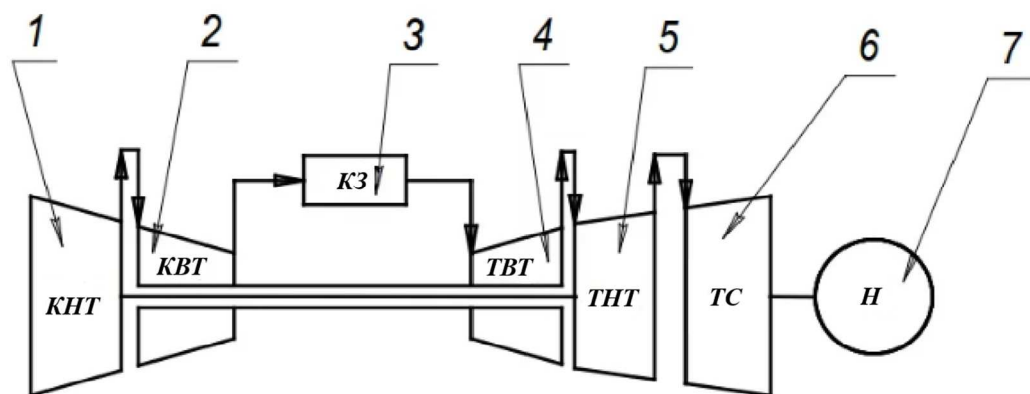


Рис. 1.1 Схема тривальної ГТУ: 1 – компресор низького тиску; 2 – компресор високого тиску; 3 – камера згоряння; 4 – турбіна високого тиску; 5 – турбіна низького тиску; 6 – турбіна силова; 7 – нагнітач

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).

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).

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 осяде 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. А сталеві ротори компресорів низького тиску захищають нанесенням фарби з умовами роботи при 160-300°C.

Елементи гідравліки також захищають від корозії спеціальними покриттями, застосовують різні промивки газоповітряного тракту або застосовують титанові сплави.

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 із-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 слідує руйнування внаслідок вібрацій, термічних деформацій, механічного та ерозійного зносу.

Дослідження морфології поверхонь оперативного руйнування хвостовика лопаток і диска компресора високого тиску (з титанового сплаву BT18У) 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.

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 [26].

Конструктивно ротори КВТ та КНТ представляють собою барабанно-дисківу конструкцію діаметром 600...700 мм, довжиною 700..800 мм, з певною кількістю дисків. Диски роторів на підставі багатолітнього досвіду та

					<i>КР.131.6121м.01.05.01.ЛЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

розрахунків в Україні виготовляють з високолегованих мартенситних сталей ЭП609 або ЭП517, а також титанових сплавів ВТЗ-1, ВТ-6, ВТ-8, ВТ-9...[26].

1.2.Властивості і характеристики сталевих сплавів для роторів ГТУ.

Використовувані матеріали в конструкціях корабельних ВМД були розроблені при співробітництві АТ НВКГ «Зоря»-«Машпроект» з такими організаціями, як ЦНДІ «Прометей», ВІАМ, ЦКТІ ім. Ползунова, ЦНДІЧерМет та Інститутом проблем міцності НАН України. Всебічний аналіз сталей та сплавів, які використовувалися вітчизняною промисловістю для виробництва парових турбін, компресорів та авіаційних двигунів, дозволив визначити основні класи металів, що застосовуються для виготовлення дисків та лопаток компресорів та турбін, а та жарових труб камер згоряння:

- для дисків компресорів титанові сплави ВТЗ-1 та ВТ-9;
- для дисків перших ступенів турбін – сплави на основі нікелю ХН77ТЮР-ВД (ЕІ437Б-ВД), ХН73МБТЮ-ВД (ЕІ698-ВД), а для дисків силових турбін сталь 08Х15Н25Т2МФР (ЕП674);
- для жарових труб камери згоряння ХН60ВТ (ВЖ98, ЕІ868), ХН75МВТЮ (ЕІ602);
- для корпусів турбін сплави на основі нікелю ХН75МБТЮ (ЕІ602), ХН62ВМЮТ-ВД (ЕП708-ВД) та сталь 15Х16К5Н2МВФАБ-Ш (ЕП866-Ш);
- для лопаток компресорів у двигунах 3 та 4 поколінь – титановий сплав ВТЗ-1 та ВТ8;
- для соплових та робочих лопаток турбін деформовані сплави на нікелевій основі ЕІ617-ВД, ЕІ826, ЕП539-ВД та литі Ні-сплави ЕК9Л, ЕП539ЛМ, ЧС70Л-ВІ, ЧС88У-ВІ, ЧС104-ВІ [14].

Перелічені сплави відрізняються стійкістю як проти високотемпературної газової корозії в середовищі продуктів згоряння рідких палив з високим вмістом сірки, і виняткової корозійної стійкістю проти впливу морської солі.

Надійна робота корабельних ГТД, спроектованих із застосуванням зазначених сплавів, підтверджена позитивним досвідом тривалої експлуатації.

					<i>КР.131.6121м.01.05.01.ІЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

З переходом на умови експлуатації у складі наземних ГТУ постало питання про доцільність подальшого застосування дорогих корозійностійких сталей та сплавів. Пошук таких сплавів проводився серед матеріалів, що мають достатню корозійну стійкість за умов наземного застосування ГТД. Вибрані сплави мали мати відносно високу жароміцність при тривалості повного ресурсу ВМД 75000...100000 годин і мати хороші технологічні властивості. Переліченим критеріям задовольняли добре освоєні на підприємстві АТ НВКГ «Зоря»-«Машпроект» стали ЕП609-Ш та ЕП961-Ш, а також нова сталь мартенситного класу ЕП517-Ш.

Впровадження у серійне виробництво сплаву ЕП517-Ш стало можливим після проведення великого комплексу конструкторсько-технологічних опрацювань з метою забезпечення тривалої та малоциклової міцності деталей, режимів зварювання, механічної обробки, виробництва необхідних сортamentів.

Спочатку сталь ЕП517-Ш передбачалося застосовувати як заміник матеріалу ЕП866-Ш статорних вузлів машини. Однак у міру вивчення механічних властивостей (тривалої міцності, структурної стабільності), режимів зварювання та механічної обробки, сплав ЕП517-Ш знайшов застосування для виготовлення дисків компресорів ГТД IV покоління, працюючих при температурах до 420°C. Сплави ЕП517-Ш та ЕП866-Ш відносяться до жароміцних сталей мартенситного класу, близькі за хімічним складом сталі ЕП866, крім підвищеного вмісту хрому (15...16,5%) і наявності кобальту (4,5...5,50%) [14].

Як відомо, у високолегованих сталях насичення хромом сприяє фазовому зміцненню. Однак це досягається при взаємодії хрому з іншими елементами. Розчинення цих елементів у карбідах хрому зменшує схильність до коагуляції карбідів і утруднює розчинність їх при високих температурах. Хром різко підвищує опір окисленню, що особливо помітно при його 5% вмісту. Така сталь придатна для роботи при температурах, аж до 650°C [14].

Підвищення жароміцності сплавів досягається помітним зниженням вмісту в них хрому, що супроводжується зменшенням його розчинності. При цьому хром або утворює самостійні фази, або сприяє їх утворенню на основі

					КР.131.6121м.01.05.01.ЛЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

α -Cr, σ -b μ -фаз, карбідів $M_{23}C_6$, M_6C та ін, які призводять до погіршення властивостей матеріалів внаслідок виникнення процесів несприятливої морфології. Тому процес тривалої витримки сталі ЕП866-Ш при високих температурах середовища сприяють її крихтуванню за рахунок утворення σ -фази.

Кобальт невеликою мірою підвищує жароміцність матеріалу і в його присутності помітно збільшуються пластичні властивості сполуки. Тому в сплаві ЕП866-Ш підвищений вміст хрому компенсовано добавкою кобальту. Легування кобальтом виправдовує себе лише за короткочасних навантажень в умовах високих температур. Підтвердженням сказаного є дані для сталей ЕП866 та ЕП 517-Ш, наведені в табл. 1.1.

Таблиця 1.1. Порівняльні дані щодо тривалої міцності сплавів (МПа).

	$G_{10^4}^{200}$	$G_{10^4}^{400}$	$G_{10^4}^{450}$	$G_{10^4}^{550}$	$G_{10^5}^{200}$	$G_{10^5}^{400}$	$G_{10^5}^{450}$	$G_{10^5}^{550}$
ЕП517-Ш диск	937	697	540	255	937	618	442	177
ЕП517-Ш корпус	937	692	510	245	937	608	438	168
ЕП866 корпус	850	700	590	340	850	700	460	260
ЕП609-Ш диск	800	505	363	113	800	417	280	30
ЕП602 корпус	696	657	560	363	687	657	555	343
ЕІ708 корпус	930	873	755	550	930	873	710	415
ЕП961-Ш диск	863	481	368	160	863	380	250	10
ВТЗ-1 диск	706	603	417	80	664	537	310	10
ВТ8 диск	632	515	486	10	580	450	420	-

Як показав досвід експлуатації, при тривалому навантаженні (понад 3000 годин) та температурах від 400...550°C, сталь ЕП866-Ш сильно схрупається за рахунок виділення σ -фази. Деградація механічних властивостей виражається

					<i>КР.131.6121м.01.05.01.ІЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

у вигляді суттєвого зниження ударної в'язкості рівня $a_n = 0,3 \text{ кгм/см}^2$ (при мінімально допустимому рівні $[a_n] = 2 \text{ кгм/см}^2$), і зростанням твердості сплаву з 311...341НВ до 440НВ. Матеріал корпусів стає надзвичайно крихкими та чутливими до зовнішніх ударних дій. У цій ситуації перехід на сталь ЕП517-Ш, яка відрізняється стабільністю механічних властивостей діапазон робочих температур і тривалості навантаження, забезпечив необхідний ресурс тих вузлів, в яких спочатку використовувалася сталь ЕП866-Ш.

Високі показники короткочасної міцності сплаву ЕП517-Ш при температурах до 200°C ($\sigma_{10^5}^{200} = 937 \text{ МПа}$) дозволили застосувати його у високонавантажених перших ступенях роторів КНД замість титанового сплаву ВТ3-1 ($\sigma_{10^5}^{200} = 664 \text{ МПа}$). При тривалій міцності ЕП517-Ш в інтервалі температур $200...350^\circ\text{C}$ стало можливим виготовлення дисків перших ступенів КВТ замість титанового сплаву ВТ9, що має тривалу міцність у цих умовах $\sigma_{10^5}^{200...350} = 780 \dots 885 \text{ МПа}$. Як приклад на рис. 1.2 приведені порівняльний аналіз конструкцій дисків 1 – 6 ступенів КВД ДН80Л, спроектованих зі сплаву ЕП517-Ш та дисків, виконаних з титанового сплаву ВТ9 виробу GT25000. Видно, що перехід на сталеві диски призводить до дворазового збільшення їх ваги в порівнянні з титановими конструкціями. Разом з тим, дані зміни не перевищують п'ятиразової різниці в ціні між сплавами ЕП517-Ш та ВТ9 [14].

Завдяки високій (порівняно з іншими сплавами такого ж класу) жароміцності та зварюваності в умовах ЕЛС та АДС, сталь ЕП517-Ш також широко застосовується для корпусів силових турбін замість сплаву ЕП866-Ш, а також діафрагм соплових апаратів турбін замість Ni-сплавів EI602-ВД та EI708-ВД.

Так для енергетичного двигуна ДГ80Л були спроектовані діафрагми соплових апаратів 2, 4, 5 та 6 ступенів турбіни з ЕП517-Ш замість Ni-сплаву ЕП708-ВД (2-й ступінь) та Ni-сплаву EI602-ВД (4, 5 та 6 ступені).

					КР.131.6121м.01.05.01.ІЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

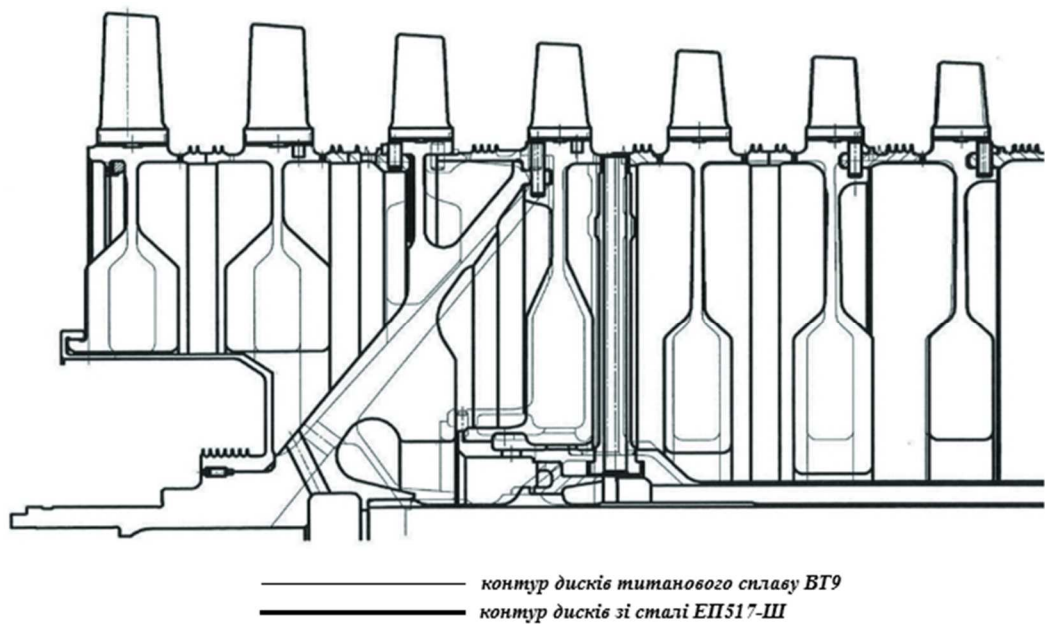


Рис. 1.2 Порівняння конструкції дисків 1-6 ст. КВД ДН80 зі сплавів
ЕП517-Ш та BT9

Як випливає із даних табл. 1.1, відносна тривала міцність ЕП517-Ш у порівнянні з EI602-ВД та ЕП708-ВД при характерній для діафрагм температурі 450°C і тривалості 10^5 годин становить відповідно $\bar{\sigma}_t^t = 0,79$ та 0,62. Несучі конічні оболонки сталевих діафрагм були потовщені в 1,3 рази від вихідної товщини, що еквівалентно відносному підвищенню жароміцності в $\bar{\sigma}_{пр} = 1.69$ разів між нікелевим сплавом та сталлю в однакових умовах. Таким чином, відносна зміна запасів по несучої здібності в діафрагмах склало

$$\bar{k}_b = (0,62 \dots 0,79) \cdot 1,69 = 1,05 \dots 1,3$$

Із всього вище сказаного можемо зробити висновок, що сталь ЕП517-Ш чудово підходить для експлуатації в роторах компресорів ГТУ стаціонарного базування за рахунок низької ціни та характеристик, які витримують умови високих температур, корозійні впливи та напруження що виникають в роботі двигунів.

					КР.131.6121м.01.05.01.ЛЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.3 Огляд проблем при зварюванні сталей мартенситного класу.

Основними факторами, що погіршують зварюваність сталей мартенситного класу, є:

1. Низька стійкість зварного з'єднання до утворення тріщин.
2. Можлива втрата корозійної стійкості металу.
3. Крихкання при експлуатації.

1.3.1. Тріщини у зварних з'єднаннях

Розрізняють три види тріщин, що утворюються при зварюванні аустенітних сталей: кристалізаційні, підсолідусні та холодні.

Перші два види поєднують назвою гарячі тріщини (ГТ). Підвищена схильність металу шва до ГТ обумовлена:

а) високим коефіцієнтом теплового розширення, малою теплопровідністю та високою релаксаційною стійкістю при високих температурах. Це призводить до високого рівня напруги та деформації при зварюванні, відпустці та експлуатації в умовах тепловмін.

б) великокристалічної (транскристалічної) стовпчастої первинної структурою з сильно вираженою ліквацийною неоднорідністю по Сг, Ni, Nb, В, С та ін.

В результаті ліквації утворюються легкоплавкі карбідні, боридні фази в потрійних стінках зерен і по траєкторіях зрощення кристалітів, що перешкоджають міграції меж зерен більш рівноважні положення. При цьому метал шва має малу пластичність в температурному інтервалі крихкості (ТІК), яка може бути вичерпана в результаті усадки шва і переміщення заготовок, що зварюються [21].

Так виникає перший тип гарячих тріщин – кристалізаційного типу, що зароджуються в залишкових плівкових виділення рідкої фази при Т до 1250 ... 1200 °С.

Другий тип гарячих тріщин (підсолідусні) виникає у твердій фазі при 1200...1000 °С внаслідок міжзерного характеру високотемпературної зварювальної деформації. Вона стимулює вихід дислокацій та домішкових атомів на

					<i>КР.131.6121м.01.05.01.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

межі зерен і створює сходинок, що розкриваються при міжзерній деформації внаслідок припливу вакансій та сегрегації домішкових атомів у мікротріщини.

Третій тип гарячих тріщин – лікваційні гарячі тріщини, що утворюються в зоні термічного впливу (ЗТВ) за рядковими виділеннями сегрегатів та домішок, а в металі шва попереднього проходу при багатошаровості зварювання – лікваційними прошарками.

Так, сульфідна евтектика $\text{Ni}_3\text{S} + \text{Ni}$ має $T_{\text{пл}} = 645^\circ\text{C}$, а евтектики системи $\text{Ni} - \text{Nb} - T_{\text{пл}} = 1270^\circ\text{C}$. Застосування аустенітних сталей, підданих ЕШП і добре очищених від шкідливих домішок, дозволяє уникнути цих тріщин.

Тріщини при післязварювальній термообробці жорстких зварних вузлів, що мають концентратори напруг (непровари, подрізи, тріщини тощо), зі сталей, що містять карбідоутворюючі елементи (Ti , Nb , Mo), на етапі нагрівання в інтервалі $650...800^\circ\text{C}$ можуть утворитися в результаті:

- зосередження деформацій металу у концентраторів напруг;
- необоротних змін у ЗТВ (зростання зерен, формування плоских карбідів по кордонах) та дисперсійного твердіння при термообробці [21].

Уникнути появи тріщин у зварних з'єднаннях аустенітних сталей можливо шляхом:

- введення другої фази за умови виділення її безпосередньо у процесі кристалізації;
- додаткового легування деякими легуючими елементами;
- подрібнення первинної структури за рахунок легування елементами-модифікаторами;
- підвищення чистоти металу за шкідливими домішками, що сприяють утворенню легкоплавких фаз;
- технологічних прийомів.

Вводячи метал шва другу фазу, домагаються руйнування його транскристалітного будови і подрібнення первинної структури. При цьому загальна довжина меж між кристалами зростає і легкоплавкі евтектики стають

					<i>KP.131.6121м.01.05.01.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

роз'єднаними. Разом з цим гальмується і переміщення недосконалостей кристалічної структури, що перешкоджає виникненню підсолідусних тріщин.

Найчастіше другою фазою служить первинний ферит, що створює 2-х фазну аустенітно-феритну структуру металу шва. Наявність первинного фериту подрібнює структуру металу, зменшує концентрацію Si, P, S та інших домішок у міжкристалічних прошарках за рахунок більшої розчинності цих елементів у фериті. Цим підвищується чистота меж кристалітів та зменшується небезпека утворення легкоплавких евтектик.

Сучасні дослідження показали, що з надання металу достатньої стійкості до утворення кристалізаційних тріщин потрібно мати у аустенітному шві 2...5% первинного фериту. Якщо фериту більше, небезпека появи гарячих тріщин зменшується, але при роботі такого металу в області високих температур може відбуватися його охрупчування, пов'язане з переходом фериту в тендітну σ -фазу, що залягає по межах зерен аустеніту.

Працюючи в агресивних середовищах $T < 400^\circ\text{C}$ допускається до 25% фериту. Щоб отримати 2-х фазну будову в наплавлений метал, вводять елементи-феритизатори (Cr, Mo, Si, Ti, Nb, Zr, V, Al та ін.) і зменшують або обмежують вміст аустенізаторів (C, Mn, N, Si, Co). Для цього використовують відому діаграму Шеффлера, тобто обчислюють Ni_e та Cr_e , і по діаграмі визначають структуру металу шва. Якщо потрібно зберегти чисто аустенітну структуру, то способом підвищення стійкості металу шва до утворення тріщин є додаткове легування такими елементами, як Mo, W, Nb, N. виникнення зародків підсолідусних тріщин. Подрібнення структури однофазних швів можна забезпечити і впливом на зварювальну ванну ультразвукових або механічних коливань частотою 20...30 КГц, а також введенням елементів-модифікаторів (Sr, Ge, Ti, B та ін.) або азоту, який є сильним аустенізатором і також сприяє подрібненню структури з допомогою збільшення центрів кристалізації як тугоплавких нітрідів. Це збільшує стійкість зварних швів проти ГТ [21].

Підвищити стійкість аустенітних швів до тріщин можна і технологічними прийомами, що знижують темп наростання внутрішніх деформацій, особливо

					КР.131.6121м.01.05.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

в тих. Велике значення набуває у своїй форма зварювальної ванни, визначальна напрям зростання осей кристалітів і орієнтацію їх меж стосовно осі шва. У вузькій, глибокій та подовженій зварювальній ванні (велика швидкість зварювання) кристаліти ростуть найбільш несприятливо – назустріч один одному з утворенням зони сплавлення в центрі шва. Формований в цьому випадку шов має низьку технологічну міцність, так як його деформаційна здатність в ТІК істотно знижується. Слід зазначити, що проблема отримання суто аустенітних швів, стійких до утворення тріщин, повністю поки що не вирішена.

1.3.2 Міжкристалічна корозія зварних з'єднань.

Міжкристалічна корозія (рис. 1.3) спостерігається:

- в основному металі на деякому віддаленні від шва;
- у металі шва;
- безпосередньо біля межі сплавлення (ножова корозія).

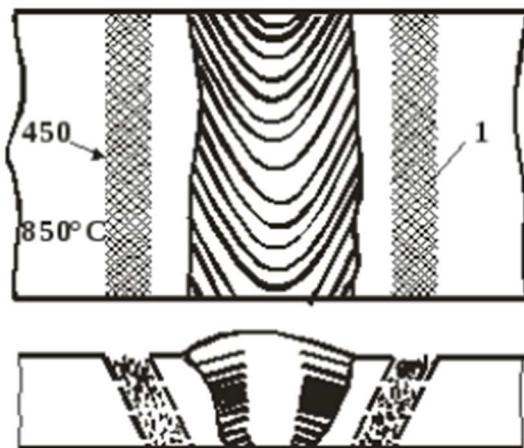


Рис 1.3 Схема міжкристалічної корозії (МКК) в основному металі

Причини, що викликають розвиток МКК різних ділянок зварного з'єднання, різні. Поява вогнищ корозії на ділянці 1 пов'язана з тривалим перебуванням металу при $T=450...850^{\circ}\text{C}$ випаданням з аустеніту комплексних карбідів, що збіднюють периферійні хромом ділянки зерен аустеніту. Це призводить до його руйнування за межами зерен [21].

При $T>850^{\circ}\text{C}$ структурних змін, що сприяють появі МКК в металі, взагалі не спостерігається, так як при тривалій витримці Сг встигає продифундувати з зерна до периферії. Для збільшення стійкості проти МКК необхідно:

- збільшити $t_{\text{кр}}$; зменшити у сталі вміст вуглецю ($< 0,03\%$);

					КР.131.6121м.01.05.01.ЛЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- легувати сталь сильнішими карбідоутворювачами, ніж Сг (Ti, С, NbС, VC). Тоді при вмісті вуглецю більше межі його розчинності в аустеніті (0,02%) вуглець виділиться не у вигляді карбідів хрому, а у вигляді карбідів TiС, NbС, але при цьому підвищиться міцність і знизиться пластичність сталі;

- отримати 2-х фазну А-Ф структуру (долегування металу шва елементами-феритизаторами);

- забезпечити високі швидкості охолодження у сфері критичних температур (500...800 °С) при зварюванні;

- провести гомогенізуючу термообробку (загартування або стабілізуючий відпал) [21].

Уникнути появи МКК у ЗТВ дозволяє:

1. Загартування на гомогенний твердий розчин. При нагріванні під загартування (вище лінії SE) карбіди хрому, що випали, розчиняються в аустеніті. Подальше швидке охолодження дозволяє отримати однорідний аустеніт.

2. Стабілізуючий (дифузійний) відпал. Нагрів при $T = 850 \dots 900 \text{ }^{\circ}\text{C}$ протягом 2 ... 3 годин з наступним остиганням на повітрі. Карбіди в цьому випадку випадають повніше, але за рахунок дифузійних процесів вміст хрому в обсязі зерна аустеніту вирівнюється і метал стає нечутливим до МКК.

3. Режим зварювання, що унеможливило перегрів металу (зварювання з малою погонною енергією, штучне охолодження металу ЗТВ).

МКК у металі шва обумовлена наявністю карбіду хрому по межах зерен або низькою стійкістю металу до впливу небезпечних температур у процесі експлуатації зварного з'єднання. Якщо $C \leq 0,02 \dots 0,03\%$, то карбіди не випадають (гранична розчинність), але практично $C = 0,08 \dots 0,12\%$.

Наявність первинного фериту в аустенітному шві збільшує стійкість до МКК, так як ферит має менш компакту упаковку атомів у кристалічній решітці, у зв'язку з чим рухливість атомів Сг і С в гранецентрованій кристалічній (ГЦК) решітці γ -заліза нижче, ніж в об'ємно-центрованій кристалічній (ОЦК) решітці α -Fe. Тому карбіди хрому розташовуються за межами феритних

					КР.131.6121м.01.05.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ділянок, де зосереджуються місця збіднення хромом. Хімічні нестійкі ділянки перемішуються тут з стійкими хімічними зернами, що служать своєрідним бар'єром проти проникнення агресивного середовища.

Слід також мати на увазі швидке відновлення необхідної концентрації хрому в збіднених ділянках за рахунок високої швидкості хрому дифузії у фериті. Для усунення МКК застосовують дифузійний відпал, вводять у метал шва активні карбідоутворювачі або створюють аустенітно-феритну структуру [21].

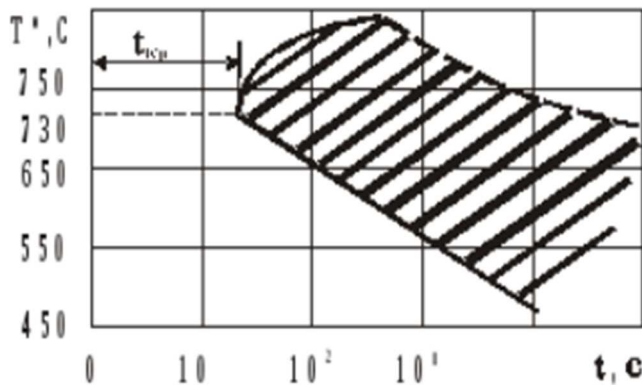


Рис. 1.4 Залежність МКК від температури та часу нагрівання

Найменший час витримки, необхідний у тому, щоб метал набув чутливості до МКК, лежить у інтервалі $T = 650...700\text{ }^{\circ}\text{C}$. Час, що відповідає цьому інтервалу, називається критичним ($t_{кр}$) (рис. 1,4).

Як нижче, і вище зазначених температур збільшується час, необхідне появи у металі чутливості до корозії.

1.3.3 Крихтування металу зварного з'єднання при експлуатації.

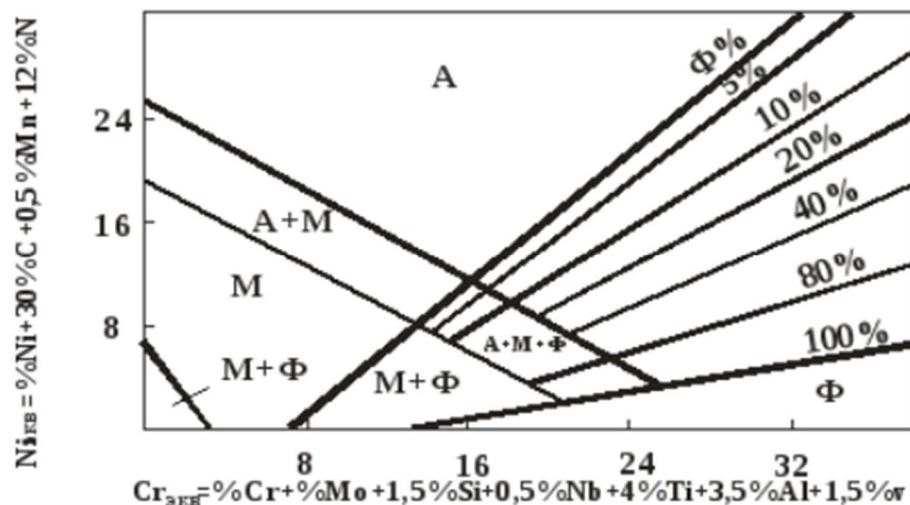


Рис. 1.5 Структурна діаграма металів (по Шеффлеру)

Під дією робочих температур та напруг у зварному з'єднанні можуть протікати процеси сигматизації, 475-градусної крихкості та радіаційне крихтування.

Сигматизація – це поява в структурі металу шва крихкої і твердої (6000...8000 МПа) немагнітної складової, яку назвали σ -фазою. Це інтерметаліди, що має складну кристалічну решітку та змінний склад. Так, σ -фаза, що утворилася у сталі 25–20 після нагрівання протягом 1000 годин, містила 51,82% Сг, 3% Ні, 1,1% Si, 0,6 % Мп, 44,67% Fe. Поява їх у швах різко знижує ударну в'язкість [21].

В аустенітних швах сталей типу 25-20 (рис. 1.5) сигматизація виникає при тривалому нагріванні при $T = 650...900\text{ }^{\circ}\text{C}$ і особливо при $800...875\text{ }^{\circ}\text{C}$. У таких швах V, Сг, Мп, W, Ні, Со, Si, Nb, Cu прискорюють сигматизацію. Вуглець перешкоджає цьому процесу.

В аустенітно-феритних швах сталей типу 18–8 (рис. 1.5) сигматизація спостерігається при тривалому нагріванні в інтервалі $500...875\text{ }^{\circ}\text{C}$ внаслідок переродження δ (α) заліза в σ -фазу. Швидкість та ступінь сигматизації значно залежить від складу фериту та характеру його легування оскільки σ -фаза утворюється безпосередньо у фериті.

Появі σ -фази в аустенітно-феритному шві сприяють елементи-феритизатори, тоді як аустенізатори, в тому числі і Мп, роблять шви менш схильними до сигматизації. Найбільш ефективний засіб боротьби з сигматизацією металу швів - нагрівання до $T = 1000 \dots 1150\text{ }^{\circ}\text{C}$, витримка 1 годину і швидке охолодження. фериту в А-Ф швах не повинно перевищувати 5%. 475-градусна крихкість пов'язана з тривалим нагріванням в інтервалі $T = 325...525\text{ }^{\circ}\text{C}$ і особливо при $475\text{ }^{\circ}\text{C}$. У цьому випадку спостерігається підвищення міцності, зменшується пластичність і особливо ударна в'язкість, падає електричний опір і стійкість до МКК 475-градусна властива А-Ф сталям. Для усунення цього виду крихкості зменшують вміст фериту до 2...5% або застосовують загартування.

					КР.131.6121м.01.05.01.ЛЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Радіаційне крихтіння відбувається під впливом нейтронів і α -частинок, та особливо зварних швів. Для гомогенних сталей це можна усунути при нагріванні до $T = 0,5 T_{пл.}$) нижче, ніж у неопромінених.

1.4 Висновки, мета та завдання магістерської роботи

Визначення програми дослідження.

Головним напрямком модернізації сучасних та проектування перспективних газотурбінних двигунів (ГТД) стаціонарного базування є підвищення їх потужності та коефіцієнту корисної дії (ККД), а також зменшення собівартості деталей шляхом заміни дорогоцінних металів на більш дешевші без втрати експлуатаційних властивостей. Підвищення робочих параметрів викликає пришвидшене зношування деталей, що може призвести до зниження ефективності установки або навіть її поломки.

Для сучасних ГТД є високотехнологічним і дорогим виробом ротори КНТ та КВТ, тому процедура заміни або ремонту цих складених одиниць 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 зі сталей мартенситного класу, найбільш відповідним для цього підходить сплав ЕП517-Ш. 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 сплаву ЕП517-Ш та особливостей його структури і особливостей функціонування, можна зробити наступні висновки:

					<i>КР.131.6121м.01.05.01.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1. Для підвищення ремонтпридатності та робочих параметрів компресора необхідно розробляти та впроваджувати технології зварювання сплаву ЕП517-Ш на ЕЛЗ.

2. Особливості сплавів мартенситного класу задають певні проблеми під час зварювання. Хімічні властивості сталі ЕП517-Ш та перетворення у процесі нагрівання потребують розробки спеціальних технологій для зварювання.

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 сплавів мартенситного класу та їх вплив на механічні властивості зварних з'єднань.

2. Провести вибір оптимальної технології зварювання дисків із сплаву ЕП517-Ш компресора високого тиску 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 сплаву ЕП517-Ш для ГТД на виробництві.

					<i>КР.131.6121м.01.05.01.ІЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ 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.

Для зварних швів відповідальних конструкцій, а саме роторів компресора виконую суцільний контроль якості. До нього входять *руйнівний* та *неруйнівний* методи перевірки.

Неруйнівні випробування не здійснює вплив на цілісність продукції та побічно характеризує її якість. До них відносять: радіографічний, радіохвильовий, ультразвуковий, магнітний, вихрострумний, акустичний, капілярний, контроль герметичності та ін.

Руйнівні випробування застосовують для отримання контрольованих кількісних показників продукції. У деяких випадках контроль проводять з частковим порушенням цілісності матеріалу виробу, тобто шляхом випробувань без руйнування виробу. До руйнівних випробувань відносять: механічні випробування, аналіз хімічного складу, випробування на корозійну стійкість.

Таблиця 2.1. Особливості руйнівних і неруйнівних методів контролю якості [6]

Руйнівні	Неруйнівні
<i>Переваги</i>	<i>Недоліки</i>
Випробування безпосередньо спрямовані на виміри міцності або експлуатаційної надійності. Вони імітують один або кілька станів. Кореляція між вимірами і експлуатаційними	Побічно оцінюють або вимірюють властивості, що не мають безпосереднього значення при експлуатації. Необхідні спеціальні дослідження для встановлення кореляційного зв'язу

					КР.131.6121м.01.05.02.ПЗ					
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ ЯКОСТІ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ			Літ.	Арк.	Акрушів
студент	Антонов									
керівник	Костін									
Завідувач	Драган									
					НУК ім. адм. Макарова					

властивостями матеріалів, як правило, тісна та не викликає розбіжностей. Вимірюють руйнівні навантаження або терміни служби до руйнування (відмова).	зку між результатами НРК і експлуатаційною надійністю або міцністю. Там, де зв'язок не доведений, призначення норм для оцінки результатів контролю утруднене. Випробування тільки якісні або альтернативні (придатний або непридатний)
<i>Недоліки</i>	<i>Переваги</i>
Випробування проводять на зразках, а не на об'єктах, фактично застосовуваних в експлуатації. Випробування можна проводити тільки вибірково — на частині виробів з партії, а якість від деталі до деталі може мінятися. При одиничних випробуваннях визначають тільки одну або кілька властивостей, що впливають на надійність виробу. Мало застосовні в умовах експлуатації без припинення роботи. Вплив експлуатації може вимірюватися тільки при вибіркового випробуванні серії виробів, що пропрацювали певний час. Вартість великого обсягу випробувань і витрата дорогих матеріалів — високі. Механічна обробка зразків трудомістка, вимагає великої витрати часу висококваліфікованих робітників	Випробування проводять безпосередньо на виробах і на їх небезпечних дільницях. Випробування можна проводити на будь-яких виробах з партії, навіть на всіх, якщо це економічно вигідно. Можна застосовувати комплекс методів, що виявляє різні властивості матеріалу або з'єднання. Застосовують в установках без припинення роботи. Повторний контроль тих самих виробів і стиків дозволяє виявляти вплив експлуатації на них. Вироби з дорогих матеріалів не руйнують. Попередня обробка виробів, час випробувань і їх вартість, як правило, значно менші, ніж при руйнівному контролі

Згідно нормативних документів, для сплаву ЕП517-Ш 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.

2.1. Дослідження механічних властивостей та твердості зварного шву.

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 циліндричного зразку до випробувань показано на рис. 2.1, а після випробувань на рис. 2.2.



Рис.2.1 – Форма циліндричного зразку до випробувань на одновісне статичне розтягнення.



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

					<i>КР.131.6121м.01.05.02.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рис. 2.3 – Стенд на одновісне статичне розтягнення при кімнатній та підвищеній температурі (система вимірювання параметрів досліджень Instron 3382).

Виробник, дата	Діапазон вимірювань		Показники то- чності
Модель Instron 3382	Максимальне навантаження, кН –	100	Похибка за- міру наванта- ження $\pm 0,5\%$ від показника, Похибка за- міру напруг $\pm 0,5\%$ від по- казника
Instron Corp.	Швидкість переміщення захватів, мм/хвил –	0,005-500	
США 2007	Повне переміщення траверси, мм –	1235	
	Діапазон температур, $^{\circ}\text{C}$ –	20-1000	
	Швидкість збору даних, кГц –	8	

Випробування на розтяг проводять на розривних або універсальних машинах або пресах із застосуванням реверсорів. ДСТУ ISO 6892-1:2019 регламентує основні вимоги до дослідних машин, містить необхідні вказівки про форму і розміри зразків, визначення понять умовної межі пропорційності $\sigma_{\text{пц}}$, умовної межі пружності $\sigma_{0,05}$, меж текучості (умовної $\sigma_{0,2}$ і фізичної σ_{T}), тимчасового опору (межі міцності) $\sigma_{\text{в}}$, справжнього опору розриву $S_{\text{к}}$, відносних

					КР.131.6121м.01.05.02.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

подовження δ і звуження ψ і, нарешті, порядок проведення випробувань та розрахунку перерахованих характеристик.

Випробування на тривалі статичне навантаження.

Цей вид випробувань оцінює терміни експлуатації металів енергоустановок, в тому числі деталі ГТУ, які працюють при високих температурах. Механічні властивості, що визначаються при тривалих навантаженнях, залежать як від внутрішніх перетворень, які прискорюються одночасним впливом підвищеної температури і навантаження, так і від впливу зовнішнього середовища або дифузійних процесів.

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

Випробування на тривалий статичний розтяг при підвищених температурах проводять на спеціальних машинах. У металознавчій практиці найбільш широко застосовують вітчизняні дослідні машини типу АИМА—5—1, АИМА—5—2, у яких навантаження подається до зразка через важелі, що забезпечують збільшення зусилля у 10—30 разів.



Рис 2.1 Машина для випробувань матеріалів на тривалу міцність та повзучість серії АИМА 5-1

					<i>КР.131.6121м.01.05.02.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

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.

Випробування на тривалу міцність проводять наступними способами:

- визначають кількість годин до руйнування зразка при даному напруженні;
- при різних постійних напруженнях і даній температурі проводять серію випробувань, а потім будують залежність часу випробування зразка до руйнування від напруження.

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

Випробування на твердість.

Метод дослідження випробування на твердість у цій дипломній роботі виконується за **Брінеллем**.

Твердість за Брінеллем (ГОСТ 9012—59) визначається вдавлуванням сталеві загартованої кульки у випробовуваний матеріал. Значенням твердості є середнє напруження, що приходить умовно на одиницю поверхні кульового відбитка, і виражається формулою:

$$HB = \frac{0.102 \cdot 2P}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (2.1)$$

де P — прикладене навантаження (сила), Н; D — діаметр кульки, мм; d — діаметр відбитка, мм.

					КР.131.6121м.01.05.02.ІЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

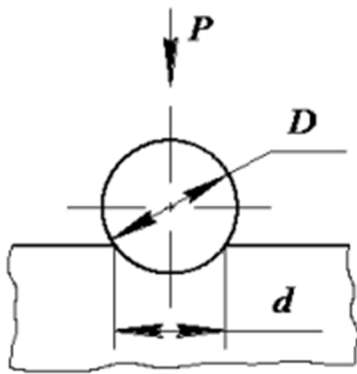


Рис. 2.4. Схема визначення твердості за Брінеллем

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 2.2. 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 4..2 <2	10 5 2,5	$P=30 D^2$	3000 750 187,5	29430 7357 1839	10
	<1400	>6 6...3 <3	10 5 2,5	$P=10 D^2$	1000 250 62,5	9810 2452 613	10
Кольорові метали	350...1300	9...6 6...3 <3	10 5 2,5	$P=10 D^2$	1000 250 62,5	9810 2452 613	30
	80...350	>6 6...3 <3	10 5 2,5	$P=2,5 D^2$	250 62,5 15,6	2452 613 153	60

Залежність між границею міцності та твердістю за Брінеллем записується у вигляді

$$\sigma_B = HB \cdot K \quad (2.2)$$

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).



Рис. 2.5 Сучасний стаціонарний твердомір UIT HBW-1 [19]

Характеристики твердоміра UIT HBW-1:

Параметри	Значення
Випробувальні навантаження, кгс	62.5; 100; 125; 187.5; 250; 500; 750; 1000; 1500; 3000
Час витримки, сек	5 - 60
Межа допустимої похибки навантажень, %	±1
Індентори, d, мм	1,6, 5, 10,

2.2 Металографічні дослідження, пошук макро- та мікродефектів, мікротвердість.

Металографічні дослідження – це комплекс випробувань та аналітичних заходів, спрямованих на дослідження макро- та мікроструктури металів для визначення дефектів при зварюванні або термічній обробці. 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. Мікроаналіз дає можливість виявляти:

- раковини;
- шлакові включення;
- порушення суцільності металу;
- тріщини та інші дефекти будови сплаву;
- хімічну і структурну неоднорідність;
- відхилення геометрії шва.

Мікроаналіз дозволяє визначити структуру металу в литому, відпаленому стані, а також різних видів термічної обробки та пластичної деформації. За допомогою мікродосліджень можна встановити якість металу, засміченість неметалевими включеннями, величину зерен металу та низку інших деталей структури.

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 рисунках 2.6 і 2.7.



Рис. 2.6. Стереомікроскоп Carl Zeiss (Stemi 2000) для макроаналізу



Рис. 2.7. Металографічний мікроскоп Carl Zeiss Axiovert 40

Порядок проведення дослідних робіт:

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

2. Вибір проби шліфа. Процес підготовки мікрошліфа починається з вирізання з деталі, зливка чи виливка зразка металу невеликих розмірів. Найзручніші розміри 15x15x15 мм, або циліндрики діаметром 10-20 мм.

3. Попередня обробка. Після вирізання зразка потрібну для дослідження поверхню необхідно вирівняти зробити плоскою за допомогою спеціального плоскошліфувального верстату.

4. Шліфування. Одержану плоску поверхню зразка шліфують наждачним папером різної зернистості з поступовим зменшенням фракції зерна. Після шліфування на поверхні зразка залишаються абразивні частки, які необхідно стерти спиртовим розчином.

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 шорсткість якої повинна бути не більше Ra0,16, вільну від рисок при дослідженні його при будь-якому збільшенні мікроскопа.

					КР.131.6121м.01.05.02.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

6. Травлення. Поверхню полірованого зразка після обстеження під мікроскопом протравлюють для виявлення границі зерен, фазових та структурних складових. Найбільш універсальними реагентами для виявлення мікроструктури високолегованої сталі є ті, які містять плавикову кислоту. Одним з таких є реагент наступного складу: 5% розчин HNO_3 в етиловому спирті; пікрат натрію (пікринова кислота та їдкий натр) – реактив для відмінності цементитів від фериту; 4% розчин пікринової кислоти у спирті; реактив для травлення жароміцних сплавів: 20 см³ концентрованої HCl і 5 гр. CuSO_4 , 20 мм³ H_2O .

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. 2.8).



Рис. 2.8 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 кгс.
- Вимірювання мікротвердості проводиться відповідно до ГОСТ 9450-76 «Вимірювання мікротвердості шляхом вдавлення алмазних наконечників».

					КР.131.6121м.01.05.02.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

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 високолегованих сталей мартенситного класу використовуємо руйнівні механічні дослідження, визначаємо твердість шву методом Брінеллю.

3. Для вивчення мікроструктури сплаву використовуються методи растрової електронної мікроскопії. Ці методи дозволяють вивчити внутрішню будову сплавів, наявність або відсутність дефектів після зварювання. Це дозволяє встановити вплив мікроструктури на фізичні та механічні характеристики дослідного матеріалу.

					<i>КР.131.6121м.01.05.02.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3. ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ЗВАРЮВАННЯ ДИСКІВ -БАРАБАНА РОТОРА КОМПРЕСОРА ВИСОКОГО ТИСКУ ГАЗО-ТУРБІННОГО ДВИГУНА ІЗ СПЛАВУ ЕП517

3.1 Огляд способів зварювання сталі ЕП517 та їх особливості.

До зварних з'єднань високолегованих сталей та сплавів крім звичайних вимог до міцності, пластичності, відсутності дефектів пред'являються специфічні вимоги, обумовлені конструкцією та властивостями зварюваного матеріалу. Вимоги до зварних з'єднань жароміцних сталей та сплавів на відміну від інших високолегованих сталей – довготривала міцність, опірність повзучості, стабільність макроструктури, і стійкість проти охрупчування в результаті довготривалого впливу високих температур та навантажень, мала чутливість до надрізу, окалиностійкість.

До основних труднощів, які доводиться переборювати при зварюванні високолегованих сталей та сплавів відносяться наступні:

- 1) забезпечення стійкості металу шву і біляшовної зони проти кристалічних тріщин;
- 2) забезпечення корозійної стійкості зварних з'єднань;
- 3) збереження властивостей металу шву та зварного з'єднання у часі під дією робочих температур та напружень;
- 4) отримання щільних швів.

При виготовленні деталей та вузлів ГТД із сталі ЕП517 використовуються наступні способи зварювання: *аргоно-дугове зварювання плавким електродом, ручне дугове зварювання покритими електродами, механізоване зварювання порошковим самозахисним електродом, електронно-променеве зварювання.*

Ці способи зварювання використовуються для певних деталей та вузлів певного діапазону товщин.

					КР.131.6121м.01.05.03.ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ЗВАРЮВАННЯ БАРАБАНА РОТОРУ КВТ ГТД	Літ.	Арк.	Акрушів
студент		Антонов						
керівник		Костін						
Завідувач		Драган						
						НУК ім. адм. Макарова		

Розглянемо стисло способи зварювання сталі ЕП517:

Ручне дугове зварювання покритими електродами виконується так само як і звичайні конструкційні сталі. Разом з цим є ряд специфічних особливостей, головні з яких:

- переважне застосування електродів з фтористо-кальцієвим покриттям;
- зварювання на постійному струмі зворотної полярності;
- зварювання короткою дугою без поперечних коливань кінця електроду;
- зварювання відносно короткими електродами на невеликих токах.[13]

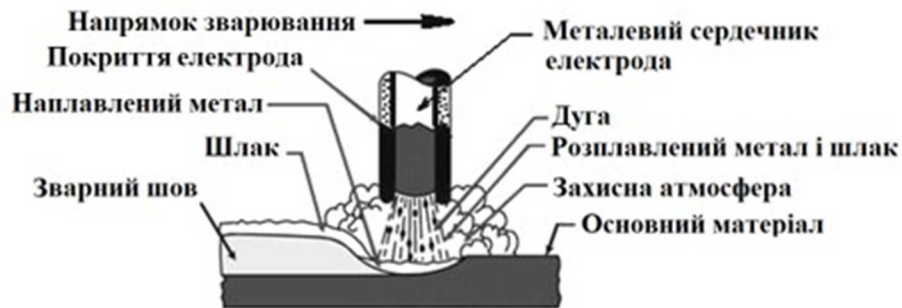


Рис. 3.1 Схема ручного дугового зварювання покритим електродом

У відповідності до ГОСТ 9466-60 та 10052-62 типи електродів для зварювання високолегованих сталей позначаються індексами Е, ЕАФ, ЕФ, та ЕА (табл. 10-24).

Розміри та загальні технічні вимоги до вказаних електродів регламентовані ГОСТ 9466-60. Умовне позначення електродів у відповідності до ГОСТу повинно включати марку електроду, тип електроду, діаметр зварної проволоки та номеру ГОСТу. Ряд марок електродів передбачений також відомчими технічними умовами.

Режими зварювання високолегованих сталей та сплавів аустенітними електродами назначають з таким розрахунком, щоб відношення величини струму до діаметру електроду не перевищувало 25-30 А/мм. При зварюванні аустенітними електродами при вертикальному або стельовому положенні силу струму зменшують на 10-30% у порівнянні з цим параметром при зварюванні в нижньому положенні. Електроди перед зварюванням щоб уникнути

					<i>КР.131.6121м.01.05.03.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

утворення пор у металі шва слід гартувати при температурі 200-450°C протягом 1-2 г.

Таблиця 3.1 Типові режими зварювання ручним дуговим зварюванням покритим електродом.

Товщина металу, мм	Діаметр електроду, мм	Сила току, А	Довжина електродного стрижня, мм
До 2	2	30-50	150-200
2-2,5	2-3	40-80	200-225
2,5-3	3	70-100	225-250
3-5	3-4	80-140	250-300
5-8	4	90-150	300-330
8-12	4-5	100-165	330-400

Аргоно-дугове зварювання плавким електродом. Особливістю аргоно-дугового зварювання є стабільність дуги, висока якість зварних з'єднань, обумовлене хорошим захистом зони зварювання від повітря, та що особливо важливо, можливістю накладення швів, які займають довільне положення у просторі. При зварювання аргоно-дуговим зварюванням використовують постійний струм зворотної полярності. [13]

Переваги аргоно-дугового зварювання на відміну від зварювання під флюсом і покритими електродами в тому, що перенесення металу в дузі повинен бути струминним, а не крапельним. Струминний процес, як відомо, можливий тільки при зварювання на струмах великої щільності. Наприклад при зварюванні проволокою діаметром 1 мм струминний процес встановлюється при силі струму 190 А. А для проволоки діаметрами 1,6 або 2 мм – при силі струму не менше 240 та 320 А відповідно.

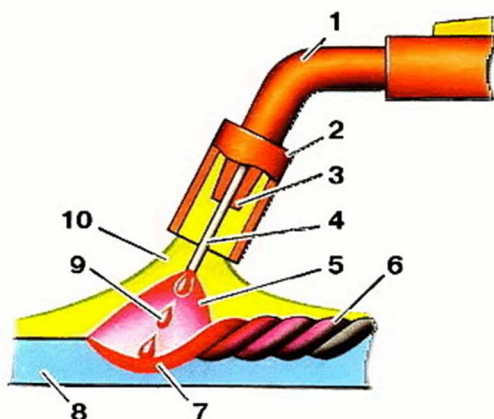


Рис. 3.2 Схема роботи пальника при аргоно-дуговому зварюванні, 1 – пальник, 2 – сопло, 3 – струмопідвідний наконечник, 4 – електродна проволока, 5 – зварна дуга, 6 – зварний шов, 7 – зварна ванна, 8- основний метал, 9 – струмінь електродного металу, 10 – газовий захист

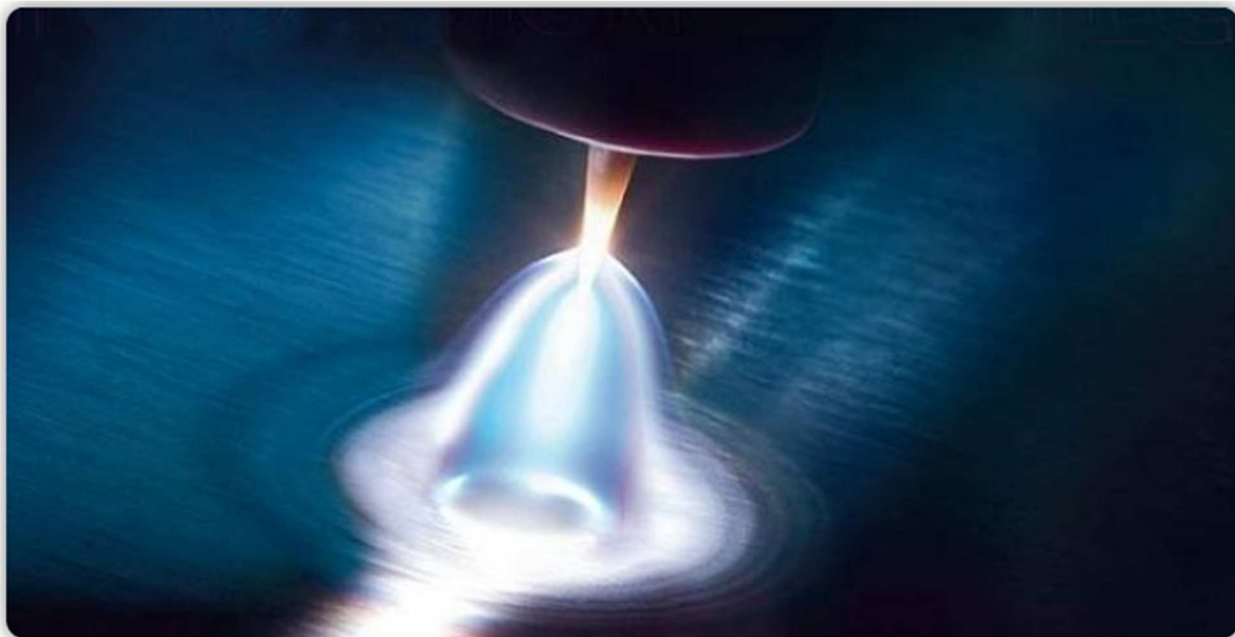


Рис. 3.3 Процес зварювання аргоно-дуговим зварюванням зблизка

Зварювання в аргоні (аргоно-дугове зварювання) ведуть дугою прямої дії електродом, що плавиться, за складом близьким до складу зварюваного металу на змінному або постійному струмі прямої полярності. Цей спосіб зварювання застосовують переважно при виготовленні конструкцій та апаратури з тонколистових високолегованих сталей, титанових та алюмінієвих сплавів.

Для забезпечення спрямованого перенесення металу у всіх простих положеннях застосовують зварювання з накладанням додаткових імпульсів.

Зварювання в захисних газах, як правило, виконують при напрузі 22—34 В. При цьому забезпечується надійний захист плавильного простору від навколишнього повітря і знижується чад елементів, що входять до складу електродного дроту. При зварюванні електродом, що плавиться — електродний дріт суцільного перерізу діаметром 0,5—4 мм (сила струму 50—700 А) і порошковий дріт.

Механізоване зварювання порошковим самозахисним електродом — це спосіб механізованого зварювання, при якому захист і легування металу шва проводиться за рахунок шихти, поміщеної в самому дроті, що складається із сталевий оболонки та неметалевого сердечника. Компоненти, що входять до складу сердечника дротів, при нагріванні в зварювальній дузі створюють

					КР.131.6121м.01.05.03.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

необхідний шлаковий і газовий захист розплавленого металу. Порошкові дроти дозволяють в широких межах варіювати своїм складом та властивостями, через що сфера їх застосування практично не має обмежень.

Зварювання порошковим самозахисним дротом - це спосіб механізованого зварювання, при якому захист і легування металу шва проводиться за рахунок шихти, вміщеної в самому дроті, що складається зі сталеві оболонки та неметалевого сердечника. Компоненти, що входять до складу сердечника дротів, при нагріванні в зварювальній дузі створюють необхідний шлаковий і газовий захист розплавленого металу. Порошкові дроти дозволяють у межах варіювати своїм складом і властивостями, через що сфера їх застосування мало обмежень. Як правило, оболонкою порошкового дроту служить вуглецева сталь, а сердечник є сумішшю металів, сплавів, а також шлакоутворюючих, газоутворюючих матеріалів, стабілізаторів дуги і спеціальних добавок.

Застосування самозахисних порошкових дротів дозволяє виключити використання важких балонів із захисним газом, редукторів і шлангів, проте існують і недоліки при використанні даного способу зварювання. Багато хто при використанні вперше зварювального порошкового самозахисного дроту скаржиться на підвищене розбризкування, труднощі з якісним формуванням зварного шва. Все це проходить з досвідом або в більш стислий термін завдяки можливості точного налаштування зварювального апарату за допомогою регулювання швидкості подачі, параметрів індуктивності, зварювального струму, напруги на дузі. Для стійкого процесу зварювання швидкість подачі дроту повинна бути приблизно рівна швидкості її плавлення. Зупинимося докладніше на такій надзвичайно корисній функції, як регулювання індуктивності. Для зменшення розбризкування металу під час зварювання необхідно зробити плавним стискаюче зусилля, що виникає при короткому замиканні. Досягається це за допомогою введення джерело зварювального струму регульованої індуктивності. Максимальна величина зусилля, що стискає, визначається рівнем струму короткого замикання, який залежить від конструкції блоку живлення. Розмір індуктивності регулює швидкість наростання стискаючого

					<i>КР.131.6121м.01.05.03.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

зусилля. При малій індуктивності крапля металу буде швидко і сильно стиснута - електрод починає бризкати (краплинний перенесення). При великій індуктивності збільшується час відділення краплі, і вона плавно переходить у зварювальну ванну (струменеве перенесення). Зварний шов виходить гладкішим і чистішим.

Варто запам'ятати ще кілька важливих нюансів при зварюванні самозахисними порошковими дротами.

- зварювання сталевих виробів провадиться тільки на постійному струмі зворотної полярності.

- рукав (шланг) пальника має бути не надто довгим, не мати згинів.

- регулярно продувати і перевіряти справність каналу, що подає.

- виліт дроту у процесі зварювання має бути постійним.

- регулювальний гвинт ступеня притискання дроту на протягувальному пристрої зварювального апарата необхідно встановити відповідно до його типу.

На відміну від зварювання в середовищі захисних газів, допускається зварювання порошковим самозахисним дротом на протягу, а також зварювання без сопла, що може суттєво полегшити виконання робіт у важкодоступних місцях.

Однак, навіть незважаючи на всі хитрощі, зварювання з деякими видами самозахисного дроту особливо на високих струмах все ж таки може супроводжуватися підвищеним розбризкуванням металу в порівнянні з класичним механізованим зварюванням суцільним дротом у середовищі захисних газів. Також зварювання металовиробів самозахисним дротом може супроводжуватись значними аерозольними виділеннями.

Рекомендується перед зварюванням налаштувати режими зварювання стосовно конкретного об'єкта зварювання. Підтримуючи рекомендований виліт, роблять пробне зварювання. За потреби коригують встановлений режим.

Довжина дуги вибирається від потужності струму. Вибір напруги дуже важливий при з'єднанні тонкого металу. Швидкість подачі витратного

					КР.131.6121м.01.05.03.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

матеріалу вибирається досвідченим шляхом. Необхідно, щоб дуга горіла при вибраному струмі та напрузі стабільно.

Щоб запобігти пористості, не рекомендується завищувати струм, також великий вплив має мала напруга дуги, неякісна збірка металоконструкцій (з великими зазорами між елементами, що зварюються).

Електронно-променеве зварювання використовує кінетичну енергію потоку електронів, що рухаються з високими швидкостями у вакуумі. Щоб зменшити втрати кінетичної енергії електронів при зіткненні з молекулами газів повітря та забезпечити хімічний та тепловий захист катода, в електронній гарматі створюють вакуум близько $10^{-4} \dots 10^{-6}$ мм рт. ст.

При зварюванні електронним променем проплавлення набуває форми конуса (рис. 3.4). Плавлення металу відбувається на передній стінці кратера, а метал, що розплавляється, переміщається по бічних стінках до задньої стінки, де і кристалізується.

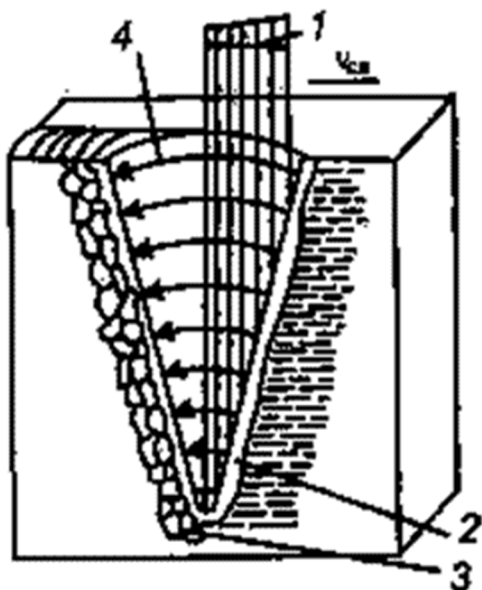


Рис. 3.4 Схема переносу рідкого металу при електронно-променевому зварюванні, 1 – електронний промінь, 2 – передня стінка кратера, 3 – зона кристалізації, 4 – шлях руху рідкого металу

Проплавлення під час електронно-променевого зварювання в основному обумовлено чотирма факторами:

- тиском потоку електронів;
- характером виділення теплоти обсягом твердого металу;
- реактивним тиском металу, що випаровується, вторинних і теплових електронів;

					КР.131.6121м.01.05.03.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- випромінюванням.

Також можна проводити зварювання безперервним електронним променем. В результаті глибина проплавлення підвищується.

Основні параметри режиму електронно-променевого зварювання:

- сила струму у промені;
- прискорююча напруга;
- швидкість переміщення променя поверхнею виробу;
- тривалість імпульсів та пауз;
- точність фокусування променя;
- ступінь вакуумізації.

Щоб переміщати промінь поверхнею виробу, можна або пересувати виріб, або сам промінь за допомогою системи, що відхиляє. Система, що відхиляє, дозволяє здійснювати коливання променя вздовж і поперек шва або по більш складній траєкторії. Низьковольтні установки використовують при зварюванні металу завтовшки понад 0,5 мм для отримання швів із ставленням глибини до ширини до 8:1. Високовольтні установки застосовують при зварюванні більш товстого металу із ставленням глибини до ширини шва до 25:1.

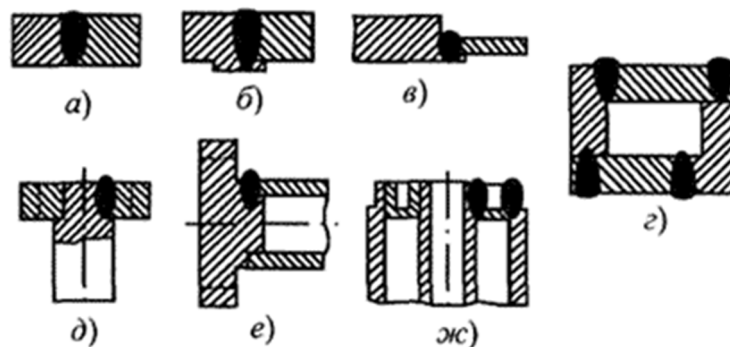


Рис. 3.5. Типи зварних з'єднань при зварюванні електронним променем:
а — стикове (можливо з бортиком для отримання опуклості шва); б - зам-
кове; в - стикове деталей різної товщини; г - кутові; д і е - стикові при зварю-
ванні шестерень; ж - стикові з відбортуванням кромки

Основні типи зварних з'єднань, що рекомендуються для електронно-променевого зварювання, наведено на малюнку 3.5. Перед зварюванням потрібно

					КР.131.6121м.01.05.03.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

провести точне складання деталей— при товщині металу до 5 мм зазор не більше 0,07 мм, при товщині до 20 мм зазор до 0,1 мм . Також важливо підтримувати точне спрямування променя по осі стику - відхилення не більше 0,2 ... 0,3 мм.

Щоб запобігти підрізам при збільшених зазорах, потрібен додатковий метал у вигляді технологічних буртиків або дроту. У останньому випадку з'являється можливість металургійного впливу на метал шва. Зміни зазору та кількості додаткового металу можуть довести частку присадного металу у шві до 50%.

Переваги зварювання електронним променем:

1) Висока концентрація введення теплоти у виріб. Теплота виділяється не тільки на поверхні виробу, а й на певній глибині обсягом основного металу. Фокусування електронного променя може створити пляму нагріву діаметром 0,0002...5 мм - це дозволяє за один прохід зварювати метали завтовшки від десятих часток міліметра до 200 мм. Так можна отримати шви, у яких співвідношення глибини провару до ширини до 20:1 і більше. З'являється можливість зварювання тугоплавких металів (вольфраму, танталу та ін.), кераміки і т.і. Зменшення протяжності зони термічного впливу знижує ймовірність рекристалізації основного металу у цій зоні.

2) Мала кількість теплоти, що вводиться. Зазвичай для рівної глибини проплавлення при електронно-променевому зварюванні потрібно вводити теплоти в 4-5 разів менше, ніж при дуговій. В результаті різко знижуються жолоблення виробу.

3) Відсутність насичення розплавленого та нагрітого металу газами. Навпаки, у ряді випадків спостерігається дегазація металу шва та підвищення його пластичних властивостей. Це призводить до високої якості зварних з'єднань на таких хімічно активних металах і сплавах, як ніобій, цирконій, титан, молібден та ін.

Недоліки електронно-променевого зварювання:

					<i>КР.131.6121м.01.05.03.ІІЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1) Можливість утворення непроварів та порожнин. У корені шва на металах з великою теплопровідністю та швах з великим ставленням глибини до ширини.

2) Тривалість приготування. Для створення вакууму у робочій камері після завантаження виробів потрібно тривалий час.

3.2 Досліджувані матеріали та їх характеристики. Зварюваність.

Відповідно до вибраної програми проводимо досліджування зварюваності між собою деталей ГТУ, а саме дисків барабану КВТ з матеріалів ЕП517. Для даної роботи пропонується роздивитись можливість зварюваності ЕП517-ППО (позапічної обробки) та ЕП517-Ш, а також провести дослід зварюваності ЕП517-Ш з ЕП609-Ш. Сталь ЕП517 відноситься до високолегованих корозійностійких жароміцних сталей мартенситного класу.

Таблиця 3.2. Порівняння хімічного складу, технологічних, механічних, фізичних властивостей сталей ЕП517-ППО, ЕП517-Ш та ЕП609-Ш.

Характеристики матеріалу

Марка:	15X12H2MBΦAB-Ш (ЕП517)
Класифікація:	Високолегований корозійностійкий жароміцний сплав мартенситного класу
Застосування:	Для високонавантажених деталей двигунів, у тому числі дисків, лопаток та інших деталей компресора, що працюють за температури до 650°C
Закордонні аналоги:	Відсутні дані

Марка:	07X12HMBΦ-Ш (ЕП609-Ш)
Класифікація:	Високолегований корозійностійкий жароміцний сплав мартенситного класу
Застосування:	Для зварних вузлів, що працюють при температурі до 600°C
Закордонні аналоги:	Відсутні дані

					КР.131.6121м.01.05.03.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Хімічний склад в % матеріалу ЕП517

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Nb	V	W
0,13÷0,18	≤0,5	≤0,5	≤0,03	≤0,015	11,0÷12,5	1,35÷1,65	1,7÷2,1	0,2÷0,35	0,18÷0,3	0,65÷1,0

Хімічний склад в % матеріалу ЕП609

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Nb	V	Ce
0,05÷0,09	≤0,06	≤0,06	≤0,03	≤0,02	10,5÷12	0,35÷0,5	1,4÷1,8	0,05÷0,15	0,15÷0,25	≤0,02

Технологічні властивості матеріалу ЕП517 та ЕП609

Зварюваність:	Задовільна зварюваність дуговими та променевими способами
---------------	---

Механічні властивості при T=20°C матеріалу ЕП517

Сортамент	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %	ψ , %	a_n , Дж/см ²	Твердість	
						D _{отв} , мм	НВ
Штанга	≥1030	≥784	≥10	≥45	≥49	3,3...3,5	341÷302

Механічні властивості при T=20°C матеріалу ЕП609

Сортамент	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %	ψ , %	a_n , Дж/см ²	Твердість	
						D _{отв} , мм	НВ
Штанга	≥833	≥736	≥12	≥55	≥688	3,3÷3,8	341÷255

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

У зв'язку з тим, що при ЕПЗ відсутні фізико-металургічні процеси (розкинення, рафінування та ін.) – цей спосіб зварювання обраний для проведення робіт і виявлення негативних факторів при зварюванні сталі ЕП517-ППО та аналізу можливості застосування при виготовленні роторів КВТ або інших деталей ГТУ.

Завдяки перевагам цього способу, а саме малого температурного впливу на зварюванні деталі у зоні зварювання можливо уникнути холодних тріщин при зварюванні. Для розуміння зон температурного впливу можна

					КР.131.6121м.01.05.03.ІЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

скористатися дослідженням АО «Мотор Січ», де проаналізоване температурне поле ротора КВТ.

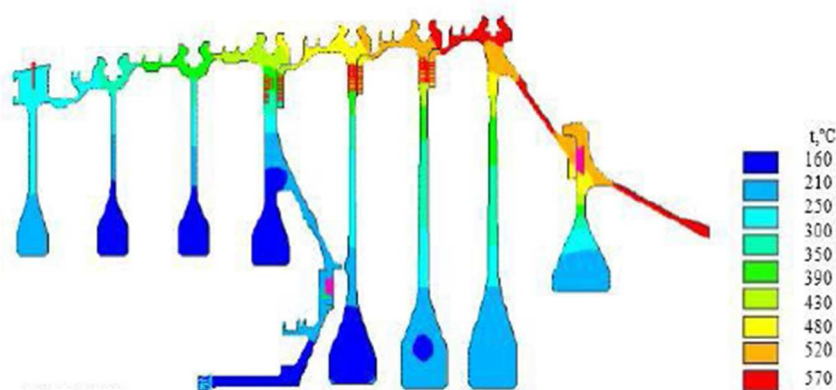


Рис. 3.6 Температурне поле компресора КВТ (7 ступенів)

Для проведення випробування використовується установка КЛ 160 яка оснащена електронно-променевим обладнанням ЕЛА 60/60 з системою захисту від пробойів. 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 3.3.

Таблиця 3.3 Параметри режиму ЕПЗ роторів

Товщина, мм	Прискорювальна напруга, кВ	Швидкість зварювання, мм/с	Відстань до гармати, мм	Ток, мА	
				Зварювання	Фокусування
10-20	60	5	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 або спиртом.

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. 3.7).

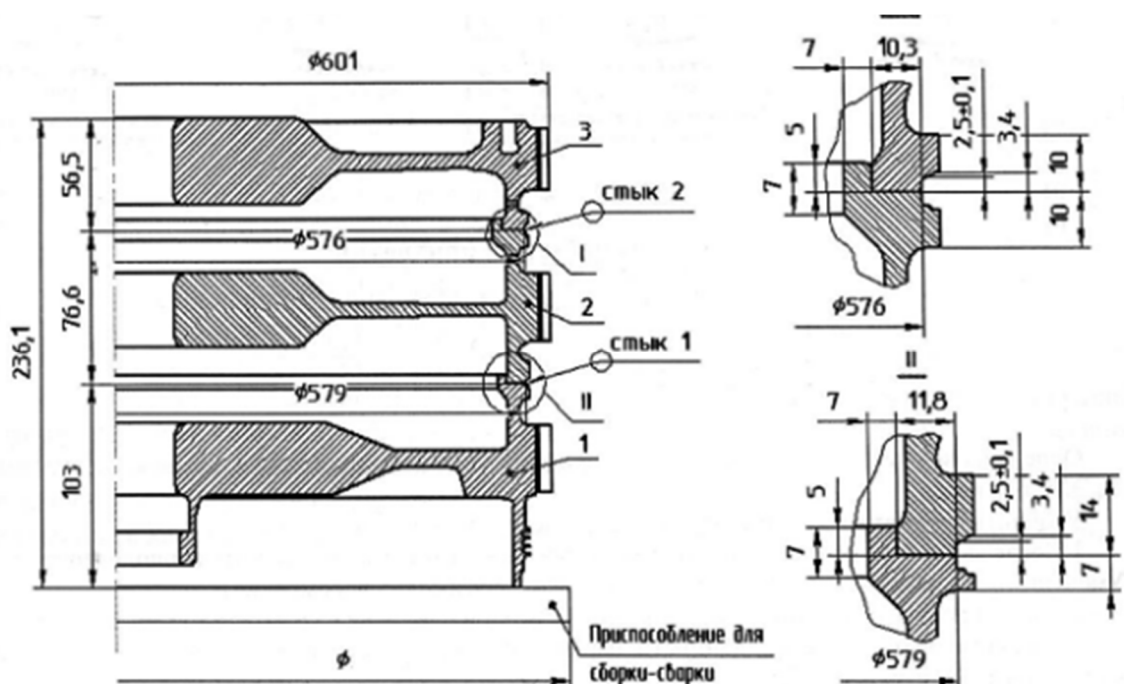


Рис. 3.7 Схема складання барабану 4-6 ступеня ротору КВТ

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

					КР.131.6121м.01.05.03.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

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.

Перед завантаженням в камеру (перед зварюванням) перевіряється чистота ротора, виявлені забруднення видаляються тампоном, змоченим ацетоном або спиртом.

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.

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.

3.4 Програма проведення дослідження (експерименту).

Мета дослідження – провести дослідження зразків, зварених з матеріалу ЕП517-ППО для вирішення можливості застосування для складання та зварювання у роторах КВТ та провести дослідження зразків після зварювання з

					КР.131.6121м.01.05.03.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

різних матеріалів ЕП517-Ш та ЕП609-Ш, для випадку можливого ремонту або виготовлення деталей з використанням різних марок матеріалу, методом електронно-променевого зварювання.

Для цього потрібно провести наступні роботи:

1. З матеріалів ЕП517-ППО виготовити деталі для чотирьох зварних зразків з різною комбінацією металів: ЗС1 із ЕП517-ППО.

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

2. Виконати перевірку хімічного складу, механічних властивостей, металографічні дослідження матеріалу ЕП517-ППО.

3. Зібрати зразки, зварити ЕПЗ за техпроцесом, виконати технологічний рентгеноконтроль, термічну обробку та остаточний рентгенівський контроль.

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

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

5.1. Для зразків з матеріалу ЕП517-ППО:

5.1.1. Визначити механічні властивості при кімнатній температурі (σ_b , $\sigma_{0,2}$, δ_5 , ψ)-З зразка. Міцність зварного шву $\sigma_b = 930$ МПа.

5.1.2. Визначення довготривалої міцності $\sigma_{100}^{550} = 593$ МПа – 3 зразка.

5.1.3. Довгострокова міцність зварного шва:

$T = 550^\circ\text{C}$, $\sigma_{\text{навант.}} = 400$ МПа, $\tau_{\text{до руйнув.}} \geq 100$ годин.

5.1.4. Випробування на ударну в'язкість (КСУ) метал шву і ЗТВ по 3 зразка.

5.1.5 Металографічні дослідження поперечного перетину зварного з'єднання на наявність дефектів (непровари, пори, тріщини).

5.1.6. Вимірювання твердості по Брінеллю основного металу, ЗТВ і зварного шву.

5.1.7. Виготовити мікрошліф поперечного перетину зварного шву з дефектом замкнення.

					<i>КР.131.6121м.01.05.03.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

6. З матеріалів ЕП517-Ш та ЕП609-Ш виготовити деталі для двох зварних зразків з різною комбінацією металів: ЗС3-1 та ЗС4-1 із ЕП517-Ш, ЗС3-2 та ЗС4-2 із ЕП609-Ш.

7. Зібрати зразки, зварити ЕПЗ за техпроцесом, виконати технологічний рентгеноконтроль, термічну обробку та остаточний рентгенівський контроль.

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

8.1. Металографічні дослідження поперечного перетину зварного з'єднання на наявність дефектів (непровари, пори, тріщини).

8.2. Вимірювання твердості по Брінеллю основного металу, ЗТВ і зварного шву.

8.3. Виготовити мікрошліф поперечного перетину зварного шву з дефектом замкнення.

9. Зробити висновки.

3.5 Дослідження зварюваності ЕП517-ППО.

Згідно програми досліджень в подальшому виготовлено заготовки зразків з матеріалів ЕП517-ППО.

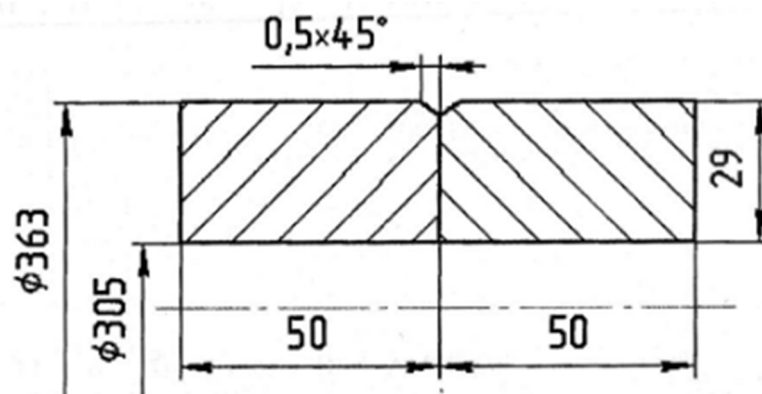


Рис. 3.8 Розміри зразка ЕП517-ППО під ЕПЗ

Перед електронно-променевим зварюванням (ЕПЗ) заготовка зразка піддано термічній обробці з контролем твердості.

1 Етап дослідження – дослідження основного матеріалу заготовки зразка ЗС1

					КР.131.6121м.01.05.03.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Хімічний склад в % матеріалу ЕП517-ППО

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Nb	V	W
0,16	0,26	0,3	0,2	0,1	11,88	1,5	1,8	0,27	0,23	0,8

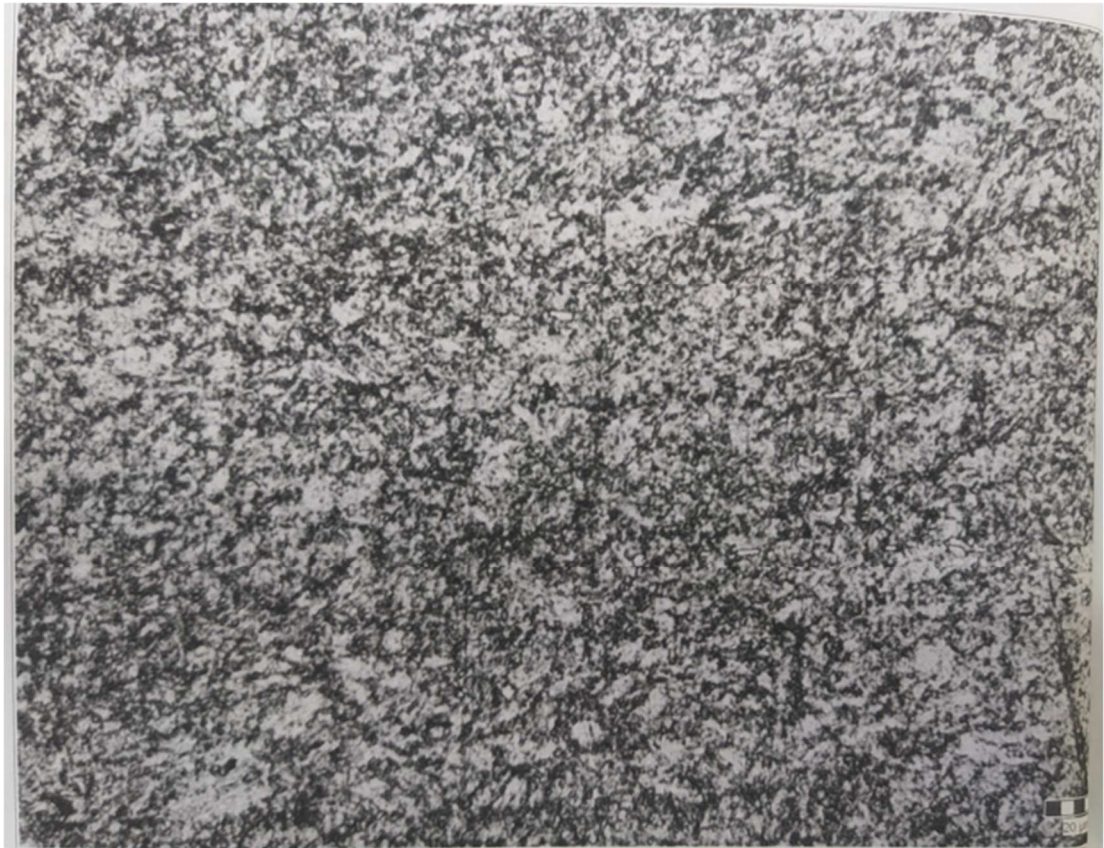


Рис. 3.9 Макроструктура сталі ЕП517-ППО

Макроструктура зразків – сорбіт, орієнтований по голкам мартенситу, що відповідає марці сталі ЕП517 в термообробленому стані (див. рис. 3.9).

Таблиця 3.4 Механічні властивості при кімнатній температурі

σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %	ψ , %	a_n , Дж/см ²	Твердість	
					D _{07B} , мм	HB
1050	900	16	58	145	3,45	311
1050	900	16	57	153		
1050	900	18	59	145		
1040	890	18	59	188		
990	840	18	61	163		
980	830	18	60	153		

					<i>KP.131.6121м.01.05.03.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 3.5 Результати випробувань на довготривалу міцність

σ, МПа	T, °C	τ, год.
4,41	550	86p (δ=15%, ψ=75%)
		97p (δ=13,5%, ψ=75%)
		100
		100
3,13	600	100
		100
		100
		100
1,96	650	100
		100
		100
		100
Для довідки – для ЕП517-Ш з И255.105.092-87		
4,41	550	≥100

Таблиця 3.6 Результати випробувань на розрив при високих температурах

T, °C	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %	ψ , %
550	65	59	20	73
	66	59	20	80
	66	60	26	77
600	54	49	20	75
	58	50	26	77
	54	47	28	80,5
650	43	38	38	87
	40	36	46	90
	40	35	48	92

2 Етап дослідження – дослідження зварюваності матеріалу

Електронно-променеве зварювання виконувалось з використання підкладки.

Обладнання для проведення ЕПЗ:

- зварна установка – КЛ-160.
- джерело живлення – ЕЛА-60/60.
- ЕПП – ЕЛА-60/60, положення – горизонтальне.

Таблиця 3.7 Пристосування і оснащення для кріплення зразка

Найменування	Позначення	Кількість, шт.
Обертач універсальний	KL160.15.01.00	1
Кубики 40x50x60 мм	11625-30	3
Підставка регульована Н=150 мм	9613-10298	3

Режими зварювання наведені в таблиці 3.8.

Таблиця 3.8

Параметри зварного стику			WD, мм	F, мм/с (м/г)	Iw, мА	If, (від- носно Ip), мА	If, мА (факт.)	Ø разв., мм	Частота разв., Гц
№	D, мм	S, мм							
Прихватка									
1	363	29	175	5 (18)	50	Ip	620	-	-
Зварювання									
1	363	29	175	2,8 (10)	170	Ip	620	2	420
Косметичний шов									
1	363	29	175	3,3 (12)	60	Ip+30	650	1,5	420

Зварювання виконується із стабільним рівномірним просипанням по підкладці. Косметичний шов виконується обов'язково. Охолодження в камері 30 хвил., в т.ч. 20 хвил. під високим вакуумом.

					КР.131.6121м.01.05.03.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.5.1 Дослідження механічних властивостей отриманого зварного з'єднання сталі ЕП517-ППО.

Після виконання зварного з'єднання та термообробки відпалу для сталі ЕП517 достатньо лабораторних досліджень – механічних властивостей, металографічних досліджень, для визначення якості зварного з'єднання, ЗТВ та основного металу.

Механічні випробування для сталі ЕП517 включають:

- на розтяг при температурі $T = 20^{\circ}\text{C}$ – 3 зразка.
- довготривалу міцність при $T = 550^{\circ}\text{C}$, $\sigma_{\text{навант.}} = 400 \text{ МПа}$, $\tau_{\text{до руйнув.}} \geq 100$ годин – 3 зразка.
- визначення твердості зварного шва, ЗТВ і основного металу зварних зразків.

Фактичні результати механічних випробувань наведені в таблиці 3.9, напрям вирізання зразків – поздовжній. Результати випробувань зварного зразка на довготривалу міцність наведені в таблиці 3.10. Результати вимірювання твердості зварного з'єднання у різних зонах наведено в таблиці 3.11.

Таблиця 3.9 Результати випробувань на розтяг та ударну в'язкість.

№ зразка	Механічні властивості при $T=20^{\circ}\text{C}$					
	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %	ψ , %	КСУ, Дж/см ² метал шву	КСУ, Дж/см ² ЗТВ
1	1160	1060	8	29	53	48
2	1155	1050	6	28	78	45
3	1170	1060	7,2	27	60	53

Таблиця 3.10 Результати випробувань на довготривалу міцність при $T=550^{\circ}\text{C}$

№ зразка	σ , МПа	$T_{\text{випр.}}$, $^{\circ}\text{C}$	τ , год	δ , %	ψ , %
1	400	550	43р	29,5	56
2	400	550	111р	10,5	42
3	400	550	100		
Вимоги згідно програми	400	550	≥ 100		

					КР.131.6121м.01.05.03.ПЗ		Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

Таблиця 3.11 Результати вимірювання твердості по Брінеллю
($d_{отв, мм/НВ}$)

№ зразка	Основний метал	ЗТВ	Зона зварного з'єднання	ЗТВ	Основний метал
1	3,4/321	3,3/341	3,0/415	3,2/363	3,4/321

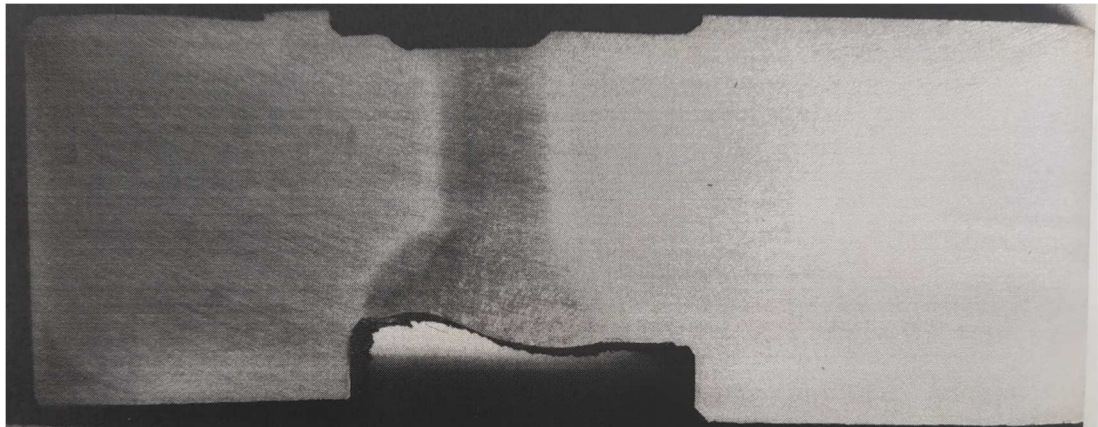


Рис. 3.10 Зварний шов

3.5.2 Дослідження макроструктури зварного шву. Металографічні дослідження.

Макродослідженням наявність дефектів у вигляді непроварів, пор, тріщин в зварному шву та ЗТВ не виявлено.

Макроструктура:

- зварного шву – троостит (рис. 3.11).
- ЗТВ – троостит і δ -ферит (рис. 3.12).
- основного металу зразка – сорбіт по мартенситу (див. рис. 3.13).

Макроструктуру зварного з'єднання, ЗТВ і основного металу див. рис. 3.11, рис. 3.12 та рис. 3.13.



Рис. 3.11 Зварний шов

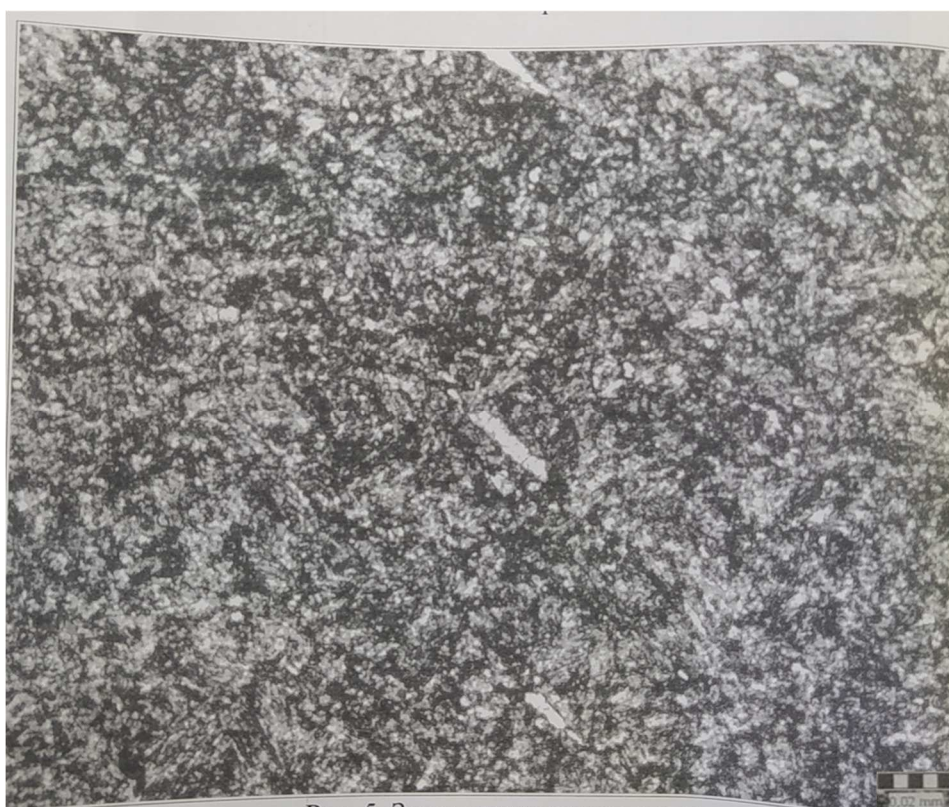


Рис. 3,12 ЗТВ

					<i>КР.131.6121м.01.05.03.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рис. 3.13 Основ-
ний метал

3.6 Висновки дослідження:

- 1) Хімічний склад зразків відповідає вимогам інструкції И255.105.092-87 для сталі ЕП517-Ш.
- 2) Дефектів металургійного характеру при проведенні дослідження сталі ЕП517-ППО не виявлено.
- 3) Механічні властивості матеріалу відповідають вимогам И255.105.092-87 для сталі ЕП517-Ш з невеликим зниженням по межі міцності при кімнатній температурі.
- 4) Ковані штанги сплаву ЕП517-ППО дозволяється використовувати для виготовлення методом розкочування для зварних з'єднань роторів КВТ та корпусних вузлів ГТД.

					<i>КР.131.6121м.01.05.03.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.7 Дослідження зварюваності сталі ЕП517-Ш та ЕП609-Ш.

Згідно програми досліджень в подальшому виготовлено заготовки зразків з матеріалів ЕП517-Ш, ЕП609-Ш.

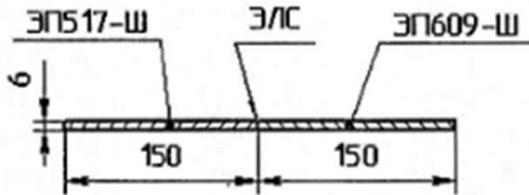


Рис. 3.14 Геометричні розміри зразка ЗСЗ-1 та ЗС4-1 під ЕПЗ у вигляді пластин

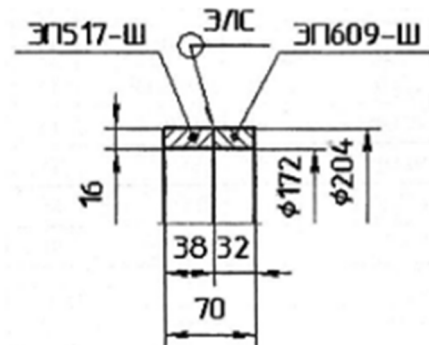


Рис. 3.15 Геометричні розміри зразка ЗСЗ-2 та ЗС4-2 під ЕПЗ у вигляді кільця

Підготовка зразків до зварювання виконана згідно вимогам виробництва ГТУ. Основний метал – у стані поставки (термообробка до зварювання не виконувалась).

Електронно-променеве зварювання виконувалось з використання підкладки.

Обладнання для проведення ЕПЗ:

- зварна установка – КЛ-190.
- джерело живлення – ЕЛА-60/60.
- ЕПП – ЕЛА-60/60, положення – горизонтальне.

Таблиця 3.12 Пристосування і оснащення для кріплення зразка

Найменування	Позначення	Кількість, шт.
Обертач з вертикальною віссю обертання (ППШ Ø1300 мм)	БСГ КЛ190.16.00.00	1
Опори регульовані Н=350 мм	9613-11197	3
Екран захисний для ППШ	12989-30	1

ЕПЗ зразків виконано горизонтальною ЕПП на режимах, представлених в табл. 3.10 та 3.11 без зауважень. При зовнішньому огляді зварних з'єднань встановлено відповідність вимогам інструкції підприємства АТ НВКГ «Зоря»-«Машпроект» И255.105.111-89.

Таблиця 3.13 Параметри режимів зварювання зразків ЗСЗ-1 та ЗСЗ-2

Параметри зварного стику			WD,	F, мм/с	Iw,	If, (від-	If, мА	Ø разв.,	Частота
№	D, мм	S, мм	мм	(м/г)	мА	носно Ip), мА	(факт.)	мм	разв., Гц
Прихватка									
1	300	6	175	7 (25)	20	Ip+10	635	-	-
Зварювання									
1	300	6	175	7 (25)	60	Ip+15	640	-	-
Косметичний шов									
1	300	6	175	7 (25)	40	Ip+25	650	-	-

Таблиця 3.14 Параметри режимів зварювання зразків ЗС4-1 та ЗС4-2

Параметри зварного стику			WD,	F, мм/с	Iw,	If, (від-	If, мА	Ø разв.,	Частота
№	D, мм	S, мм	мм	(м/г)	мА	носно Ip), мА	(факт.)	мм	разв., Гц
Прихватка									
1	204	16	175	5 (18)	50	Ip	625	-	-
Зварювання									
1	204	16	175	3,2 (12)	105	Ip+2	627	2	420
Косметичний шов									
1	204	16	175	3,3 (12)	60	Ip+25	650	1,5	420

Термообробка зразків після зварювання виконана для зняття внутрішніх напруг (проміжок часу між закінченням зварювання та відпалом – не перевищував 24 годин).

Режими відпалу:

- нагрівання до температури $690 \pm 20^{\circ}\text{C}$;
- витримка 1,5 години, охолодження.

					КР.131.6121м.01.05.03.ІІЗ				Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

Рентгеноконтроль.

Дефектів по зварним з'єднанням не виявлено по всій довжині зварного шву, крім ділянок введення-виведення променю (по краях пластин).

На знімках зварних швів зразків ЗСЗ товщиною 6 мм спостерігаються лінії по краях зони плавлення, на відстані ≈ 1 мм від середини зварного стику. На знімках зварного шва зразків ЗС4 лінії сплавлення практично не видно.

Лінії по межі литої зони зварного шва ЕПЗ характерні для усіх зварюваних сполучень металів різної щільності та бракованою ознакою не являються.

3.7.1 Металографічні дослідження.

Проведені макро і мікродослідження поперечного перетину зварних швів зразків на наявність дефектів в зварному шві, ЗТВ і основному металі.

Виконане вимірювання твердості в вищевказаних зонах.

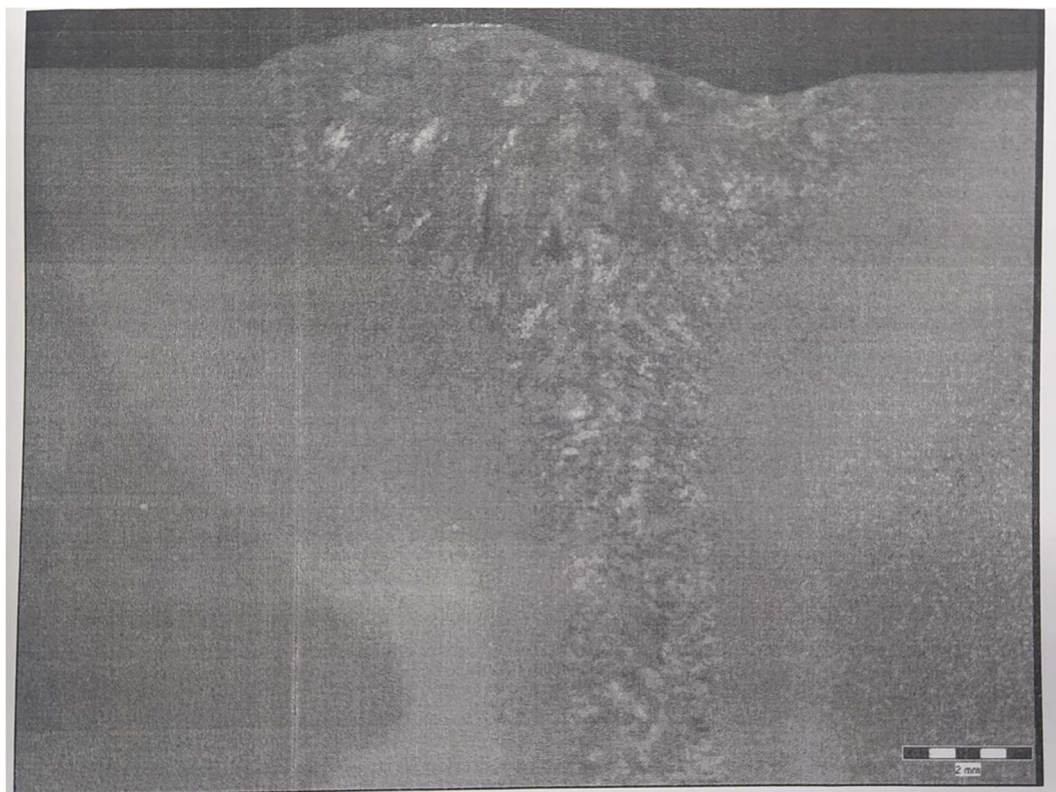


Рис. 3.16 Макроструктура зварного шву зразка ЗСЗ

					<i>КР.131.6121м.01.05.03.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рис. 3.17 Дефекти в зварному шві зразка 3СЗ

Зразок 3СЗ

Макроструктура представлена на рис. 3.16.

В структурі зварного шву виявлено одиничні пори розміром від 0,07 мм до 0,18 мм (рис. 3.17). В зоні термічного впливу (ЗТВ) і основному металі, в площині шліфу, дослідного зразку – тріщин, пор і непроварів не виявлено.

У результаті макродослідження встановлено що:

- зерна зварного шву мають дендритну структуру, стовпчасту направленість.

- макроструктура основного металі – середнє голчастий мартенсит.

Твердість зварного шву представлені в табл. 3.12.

Таблиця 3.12 Результати вимірювання твердості по Брінеллю ($d_{отв}$, мм/НВ)

№ зразка	Основний метал (ЕП517)	ЗТВ	Зона зварного з'єднання	ЗТВ	Основний метал (ЕП609)
1	3,5/302	3,3/341	3,3/341	3,6/285	3,95/235

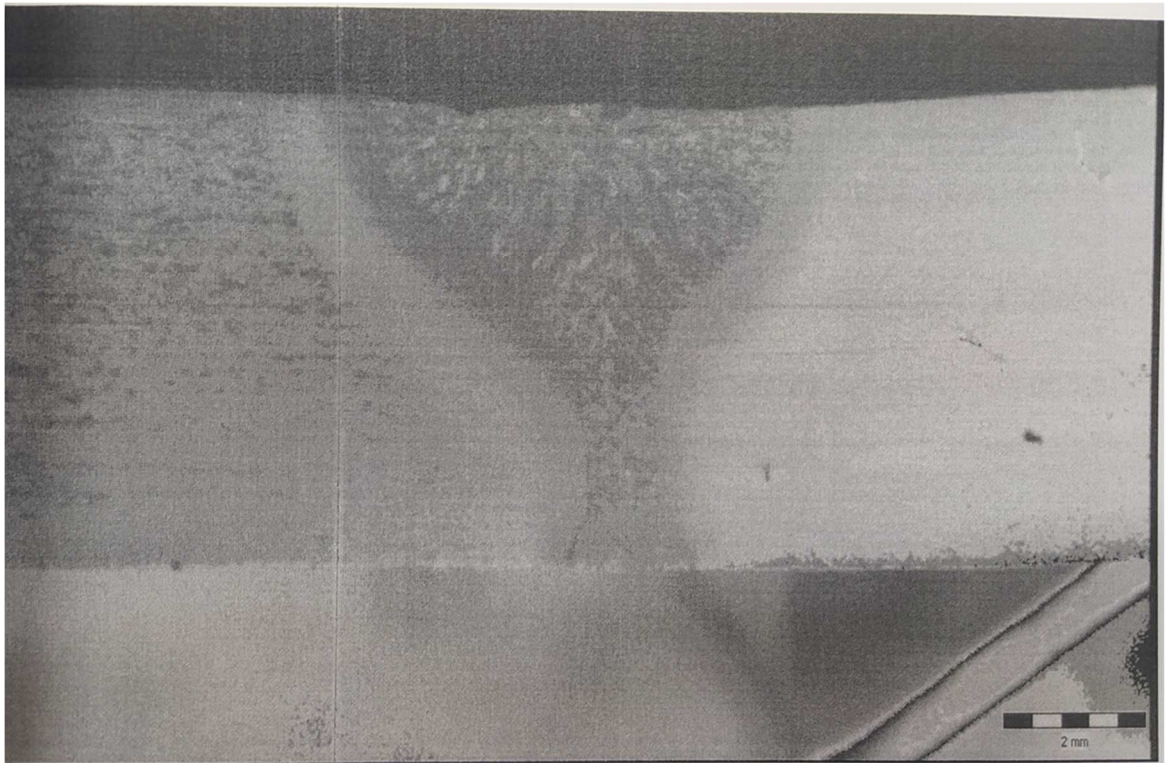


Рис. 3.18 Макроструктура зварного шву зразка ЗС4

Зразок ЗС4

В зоні зварного шву, ЗТВ та основному металі, в площині шліфу дослідного зразка – тріщин, пор, непроварів не виявлено.

У результаті макродослідження встановлено що:

- зерна зварного шву мають дендритну структуру, стовпчасту направленість.
- макроструктура основного металі – середнє голчастий мартенсит.

Твердість зварного шву представлені в табл. 3.13.

Таблиця 3.13 Результати вимірювання твердості по Брінеллю ($d_{отв}$, мм/НВ)

№ зразка	Основний метал (ЕП517)	ЗТВ	Зона зварного з'єднання	ЗТВ	Основний метал (ЕП609)
1	3,9/241	3,6/285	3,55/293	3,8/255	4,0/229

3.8 Висновки дослідження:

1) Якість зварних швів на зразках з матеріалів ЕП517-Ш та ЕП609-Ш, зварених згідно програмі досліджень зварюваності, відповідає вимогам інструкції для зварних з'єднань И255.105.111-89 для вузлів ІІІ категорії.

					КР.131.6121м.01.05.03.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2) Для вузлів III категорії зварних з'єднань допускається сполучення сплавів ЕП517-III+ЕП609-III, виконане методом ЕПЗ.

3) Сполучення ЕП517-III+ЕП609-III не підходить для складання та зварювання дисків барабану ротору КВТ, оскільки вимоги до зварного з'єднання в цих конструкціях – I категорії що не допускає наявності пор в зоні зварного шву.

3.9. Розрахунок зварювальних деформацій.

Високолеговані жароміцні корозійностійкі сталі мартенситного класу 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 пор може бути обумовлено попаданням водню в шов разом з адсорбованої 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 наявності в структурі мартенситу або голчастого бейніту. Орієнтовно мінімальна частка мартенситу у структурі перлітних сталей, за якої можливе утворення холодних тріщин становить 25-30%. Також на утворення холодних тріщин впливає високий рівень залишкових напруг, що розтягують, в зварному з'єднанні – $\sigma_{ост}$ визначається жорсткістю зварної конструкції, режимом зварювання, термічним циклом зварювання та іншими причинами.

Під час проведення металографічного аналізу в макроструктурі перерізів зварних швів всіх досліджуваних зразків зі сталі ЕП517-ППО тріщин, пор і непроварів не виявлено.

					КР.131.6121м.01.05.03.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Це пов'язано з тим, що при ЕПЗ присадний дріт або інертний газ – відсутні, зварювання проводиться у вакуумі. 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, тобто і усадка мінімальна. При товщині металу 10-11 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 джерел для визначення наявних способів зварювання сталей мартенситного класу.
2. Аналіз хімічних та механічних властивостей сталі ЕП517-ППО відповідає властивостям сталі ЕП517-Ш, та підходить для використання у експерименті з визначення зварюваності.
3. Оптимальним варіантом для зварювання на виробництві вибраної конструкції із сталі ЕП517-ППО 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 та металографічного аналізу зварюваності сталі ЕП517-ППО встановлено:
 - міцність зварного шву дорівнює міцності основного металу, розрив зразків стався по основному металу;
 - на всіх зразках у зварному з'єднанні, ЗТВ та основному металі в площині шліфу дефектів не виявлено;

					<i>КР.131.6121м.01.05.03.ІЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

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

5. За результатами дослідження механічних властивостей та металографічного аналізу зварюваності сталей ЕП517-III та ЕП609-III встановлено:

- міцність зварного шву дорівнює міцності основного металу;
- у зразках з пластин виявлені пори розмірами від 0,07 до 0,17 мм, що допускається для зварних з'єднань III категорії;
- сполучення з'єднані зі сталей ЕП517-III та ЕП609-III методом ЕПЗ дозволяється використовувати тільки для з'єднань корпусних вузлів ГТД.

Таким чином, зварюваність сплаву ЕП517-ППО способом ЕПЗ – добра. Зварювані шви дефектів не мають. Зварюваність ЕП517-III та ЕП609-III добра, але можливі дефекти у вигляді пор, що погано впливає на міцність зварного шву.

Технологія ЕПЗ така, що при зварюванні енергія концентрується практично в одній точці, а площа нагріву мінімальна, тобто і усадка 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 необхідність у проведенні розрахунку зварювальних деформацій відсутня.

					<i>КР.131.6121м.01.05.03.ІІЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

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-XII «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.

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, використовується пучок електронів. При взаємодії: пучка електронів з металом, утворюється рентгенівське випромінювання. Рентгенівське випромінювання може

					КР.131.6121м.01.05.03.ПЗ				
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					
студент		Антонов			ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ЗВАРЮВАННЯ БАРАБАНУ РОТОРУ КВТ ГТД	Літ.	Арк.	Акрушів	
керівник		Костін							
						НУК ім. адм. Макарова			
Завідувач		Драган							

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.[4]) 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.[4]) 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.[4]) 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.[4]) Зварник, який працює на ЕПЗУ, повинен знати (п.1.11.[4]):

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

					<i>КР.131.6121м.01.05.04.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- нагріта частина корпусів вакуумних насосів та рідкий азот, що заливається в пастки промаслених 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.[4])

Знаходження сторонніх осіб на робочому місці зварника на ЕПЗУ – заборонено. (п.1.16.[1])

Перед початком робіт (п.2.[4]) 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.[4]).

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!».

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 ЕПА).

Перед розбиранням ЕПГ для виконання проміжних робіт переконатися, що ЕПА відключено від мережі. При розбиранні ЕПГ, перш ніж торкнутися

					КР.131.6121м.01.05.04.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

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 3×10^{-4} мм рт. ст.;
- виникли порушення в роботі ЕПА (іскріння, пробої в високовольтному кабелі або випрямлячі, поява диму або вогню з шаф і блоків ЕПА);
- спрацювала сигналізація аварійних режимів роботи установки.

Для забезпечення пожежної безпеки необхідно (п.3.19.[4]):

- 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 пролило 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.

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

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.

					<i>КР.131.6121м.01.05.04.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

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.[4])

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 особи, 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 його дії полягає в тому, що між заземленим 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.

					<i>КР.131.6121м.01.05.04.ІЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

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 високовольні блоки 60кВ, цей факт викликає необхідність з'єднання обладнання із контуром заземлення.

Виконаємо розрахунок мінімально необхідних параметрів контуру заземлення для установки згідно з методикою [5].

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

В якості головного елемента контуру обираємо трубу діаметром $d = 5 \text{ см}$.

Для визначення опору однієї труби використаємо наступну формулу:

$$R_T = \frac{0.366\rho}{l} \left(\log \frac{2l}{d} + \frac{1}{2} \log \frac{4h+l}{4h-l} \right) \quad (4.1)$$

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

					КР.131.6121м.01.05.04.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$R_T = \frac{0.366 \cdot 2.2 \cdot 10^3}{300} \left(\log \frac{2 \cdot 300}{5} + \frac{1}{2} \log \frac{4 \cdot 230 + 300}{4 \cdot 230 - 300} \right) = 5.97 \text{ Ом}$$

Визначимо приблизну кількість n вертикальних заземлювачів:

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

$$n = \frac{5.97}{0.5} = 11.94 \text{ шт}$$

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:

$$L = 1.05 \cdot a \cdot n \quad (4.3)$$

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:

$$R_n = 0.366 \frac{\rho}{L} \log \frac{L^2}{bn} \quad (4.4)$$

де $b = 20$ см – ширина смуги, тоді:

$$R_n = 0.366 \frac{2.2 \cdot 10^3}{4095} \log \frac{4095^2}{20 \cdot 13} = 0.945 \text{ Ом}$$

Загальний опір розтіканню струму розраховується за формулою:

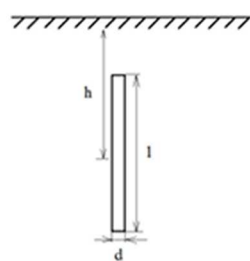
$$R_3 = \frac{1}{\frac{\eta_2}{R_n} + \frac{n \cdot \eta_1}{R_T}} \quad (4.5)$$

де $\eta_1 = 0.72$ – коефіцієнт використання заземлювачів; $\eta_2 = 0.5$ – коефіцієнт використання з'єднувальної смуги.

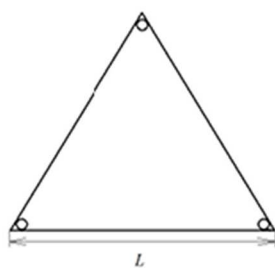
$$R_3 = \frac{1}{\frac{0.5}{0.945} + \frac{13 \cdot 0.72}{5.94}} = 0.47 \text{ Ом}$$

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.

					КР.131.6121м.01.05.04.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



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 [1].

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.

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 1 до-поміжних будівлях	До 8
Відгалужені повітропроводи в громадських 1 до-поміжних 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:

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

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

$$V = \frac{4 \cdot L}{\pi \cdot 3600 \cdot d^2} \quad (4,7)$$

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

Стінки повітропроводу будуть виготовлені з оцинкованої сталі.

Абсолютна шорсткість стін складе $0,2 \text{ мм}$. У цьому випадку поправочний коефіцієнт дорівнюватиме $C_T = 1,1$.

Втрати тиску для подолання опору тертя обчислюються за формулою:

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

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 $\zeta=0,0$;

					<i>KP.131.6121м.01.05.04.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- 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:

$$P_{MC} = \frac{\rho \lambda \xi V_B^2}{2} \quad (4.10)$$

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

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

Втрати тиску на ділянці розраховуємо за формулою:

$$P_{yч} = P_{TP} + P_{MC} \quad (4.11)$$

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

Повний опір мережі визначаємо за формулою (4.12):

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

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.

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

Розрахункова потужність вентилятора визначаємо за формулою:

$$L_{B,p} = L_C = 2600 \text{ м}^3/\text{год} \quad (4.13)$$

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.

					КР.131.6121м.01.05.04.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Необхідне значення тиску, створюваного вентилятором має бути $P_{в.р} = R_c \cdot K_{в.р}^2 \cdot L_{в.р} = 1725,3 \text{ Н/м}^2$. 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%.

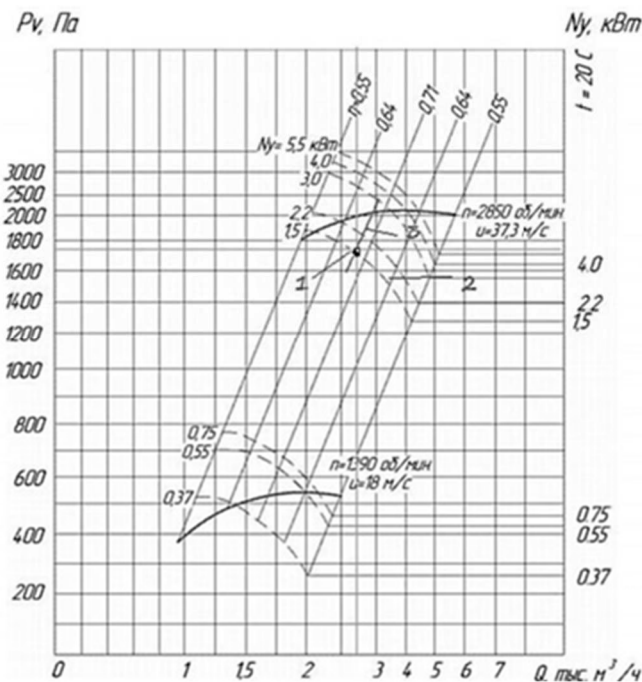


Рис. 4.2 – Технічні характеристики вентилятора ВР 280-46-2,5:

- 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 $0,1 \text{ г/м}^3$), 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	м ³ /год.	2000

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

Висновки.

1. Проаналізовано потенційні небезпеки та шкідливі чинники при електронно-променевому зварюванні сталей мартенситного класу.

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.

					<i>КР.131.6121м.01.05.04.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5. РОЗРАХУНОК ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СОБІВАРТОСТІ ВИБРАНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ЗВАРЮВАННЯ ДЕТАЛЕЙ ГТД

Доцільність використання вибраної технології зварювання деталей ГТД зі сплаву сталі ЕП517 при виготовленні або ремонті барабана ротору компресора КВТ або корпусних деталей 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 КВТ виконаним з зі сплаву ЕП517.

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

Зазвичай це витрати на:

- витрати на оплату праці;
- матеріальні витрати (за вирахуванням зворотних відходів);
- 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 КВТ задаємо наступні вихідні дані:

					<i>КР.131.6121м.01.05.05.ПЗ</i>			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
студент		Антонов			РОЗРАХУНОК ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СОБІВАРТОСТІ ТЕХНОЛОГІЇ ЗВАРЮВАННЯ ЕПЗ			
керівник		Костін						
Завідувач		Драган						
					Літ.	Арк.	Акрушів	
					НУК ім. адм. Макарова			

Таблиця 5.1 Вихідні дані для розрахунку:

№	Матеріал	ЕП517Ш	ВТЗ-1
1	Об'єм одиниць на 1 готову продукцію (1 барабан ротору)	3 д. на б-н 1-3 ст., 3 д. на б-н 4-6 ст. на 1 ротор	
2	Річна програма готової продукції при номінальному навантаженні підприємства, шт.	30	
3	Вартість зварювального устаткування, грн.: установка КЛ-160 - вартість первинна / за зносом	930 000 / 490 000	
4	Електроенергія для технологічних потреб 1 кВт-год, грн.	5,6	
5	Трудомісткість складання виробу, н-год.	1	
6	Трудомісткість зварювання виробу, н-год.	23	23
7	Часова тарифна ставка зварника, грн/год.	95,63	95,63
8	Часова тарифна ставка слюсаря, грн/год.	65	65
9	Норма амортизації, %	6,5	
10	Норма витрат на поточний ремонт обладнання, %.	5	
11	Собівартість 1 од. (грн): 1 диск із ЕП517 (1-3 ст./ 4-6 ст.) = 1050 / 1400 1 диск із ВТЗ-1 (1-3 ст./4-6 ст.) = 1780 / 2070	7350	15400

Витрати на присадні матеріали та інертну середу – не використовуються при ЕПЗ і в даному випадку не підлягають розрахунку.

Тому величина C_M буде включати лише C_i – вартість одиниці матеріалу (вартість 1 диску із сталі) для виготовлення 1 одиниці готової продукції (1 барабана ротора), n – кількість дисків:

$$C_M = \sum C_i \cdot n \quad (5.2)$$

Розрахування витрат на матеріали барабана ротора.

					КР.131.6121м.01.05.05.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Собівартість 1 од. (грн): 1 диск (для 1-3 ступені / для 4-6 ступені) = 1050 /1400.

$$C_M = 3 \cdot 1050 + 3 \cdot 1400 = 7350 \text{ грн.}$$

Розраховані витрати на матеріал заносимо в табл. 5.1.

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

$$C_{з.п.} = \sum_{i=1}^n C_{з.п.} i \quad (5,3)$$

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:

$$C_{з.п.} = (1,15 \cdot T_p \cdot \Gamma_{ст}) \cdot 1,22 \quad (5.4)$$

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:

- зварника $C_{з.п.} = (1,15 \cdot 23 \cdot 95,63) \cdot 1,22 = 3085,88$ грн.

- слюсаря $C_{з.п.} = (1,15 \cdot 1 \cdot 65) \cdot 1,22 = 91,2$ грн.

Разом $C_{з.п.} = 3085,9 + 91,2 = 3177,1$ грн.

Перевіряємо з вихідними даними:

Основна зарплата зварника: 23 н-год.*95,63 грн/год. = 2200 грн.

Додаткова зарплата зварника = 350 грн.

Відрахування на соцстрахування зварника = 520 грн.

Основна зарплата слюсаря: 1 н-год.*65 грн/год. = 65 грн.

Додаткова зарплата слюсаря = 10,4 грн.

Відрахування на соцстрахування слюсаря = 15,6 грн.

					КР.131.6121м.01.05.05.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Загалом $2200+350+580+65+10+15 = 3220$ грн.

Приймаємо $C_{з.п.} = 3220$ грн.

Витрати на технологічну електроенергію розраховуємо як:

$$C_e = W + C_e \quad (5.5)$$

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

Витрати електроенергії розраховуються за формулою:

$$W = \frac{U_d \cdot I_z}{\eta \cdot 1000} \cdot \tau + W_0(\tau_1 - \tau) \quad (5.6)$$

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); $\tau_1=\tau \cdot K_n$ 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:

$$W = \frac{60000 \cdot 0.62}{0.7 \cdot 1000} \cdot 23 + 3(23 - 16.1) = 1243 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Витрати на електроенергію дорівнюють:

$$C_e = 1243 \cdot 5,6 = 6960 \text{ грн}$$

Витрати на амортизаційні відрахування та поточний ремонт зварювального обладнання.

Загальні витрати за цією складовою технологічної собівартості розраховуються за формулою:

$$C_{об} = \sum (C_a + C_p) \quad (5.7)$$

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

$$C_a = \frac{C_{об} + C_a}{100} \quad (5.8)$$

$$C_p = \frac{C_{об} + C_p}{100} \quad (5.9)$$

					<i>KP.131.6121м.01.05.05.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$C_a = \frac{490000 \cdot 6,5}{100 \cdot 10} = 3185 \text{ грн}$$

$$C_p = \frac{490000 \cdot 5}{100 \cdot 10} = 2450 \text{ грн}$$

$$C_{об} = 3185 + 2450 = 5635 \text{ грн}$$

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

1) для сталі ЕП517Ш:

$$C_c = 5635 + (7350 + 3220 + 6960) \cdot 2 = 40695 \text{ грн}$$

2) для сплаву титану ВТЗ-1:

$$C_t = 5635 + (15440 + 3220 + 3460) \cdot 2 = 58875 \text{ грн}$$

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

1) для сталі ЕП517Ш:

$$C_{р.п.с} = 40965 \cdot 60 = 2\,441\,700 \text{ грн}$$

2) для сплаву титану ВТЗ-1:

$$C_{р.п.т} = 58875 \cdot 60 = 3\,532\,500 \text{ грн}$$

$$E = C_{р.п.т} - C_{р.п.с} \quad (5.10)$$

$$E = 3532500 - 2441700 = 1\,090\,800 \text{ грн}$$

Орієнтовна економія тільки на технологічній собівартості складає: для одного барабана ротора 18180 грн., а для річної програми 1 090 800 грн. або 44.67%.

					КР.131.6121м.01.05.05.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

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

Найменування статей витрат	Значення показника	
	На одиницю продукції	На річну програму
Річна програма випуску виробів, од.		30
Основні матеріали, грн.	7350	220 500
Заробітна плата	3220	96 600
Електроенергія	6960	208 800
Амортизаційні відрахування по обладнанню	2170	65 100
Витрати на поточний ремонт	1670	50 100
Технологічна собівартість робіт	40 965	2 441 500
Економія витрат за обраним способом	18 180	1 090 800

ВИСНОВКИ:

1. Як показує приблизний розрахунок собівартості виготовлення барабану ротору КВТ із сталі ЕП517Ш дешевше ніж виготовлення цього ж виробу із сплаву титану майже в 2 рази при вибраному способі зварювання.

2. Економія виготовлення барабану із сталі ЕП517Ш складає 44,67% технічної собівартості. Тому для виготовлення та ремонту двигунів ГТД стаціонарного базування доцільним є використання сталі ЕП517Ш з погляду економичності.

					КР.131.6121м.01.05.05.ІІЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

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 із високолегованих жароміцних конструкційних сталей мартенситного класу замість сплавів титану.

У даній магістерській роботі проведено дослідження та вибір технології зварювання дисків барабану ротора компресора високого тиску газотурбінного двигуна із сталі ЕП517-ППО та можливість зварювання сталей ЕП517-Ш та ЕП609-Ш.

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

1. Проведено порівняльний аналіз властивостей титанових сплавів і високолегованих жароміцних сталей мартенситного класу. Внаслідок своєї міцності, температурної та корозійної стійкості сталі ЕП517 являються достойним замінником титанових сплавів для виготовлення ГТУ стаціонарного базування. Властивості сталі залежать від легуючих елементів та термічної обробки. Вони визначають поліморфізм, структуру, фази та властивості кожного сплаву.

2. При аналізі проблем зварювання високолегованих сталей з'ясовано, що основними проблемами є – холодні тріщини, охрупчування металу при експлуатації та корозійна стійкість в зоні зварного шву.

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

					<i>КР.131.6121м.01.05.00.ПЗ</i>		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ		
студент		Антонов					
керівник		Костін					
Завідувач		Драган			НУК ім. адм. Макарова		

4. Проаналізовано наявні способи зварювання високолегованих жароміцних сталей мартенситного класу.

5. Проведено аналіз досліджуваних сплавів ЕП517-ППО, ЕП517-Ш та ЕП609. Обидва сплави відносяться до деформованих сплавів, клас по структурі мартенситний і мають обмежену зварюваність. По хімічному складу у ЕП609 відсутній W. 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 КЛ-190, $U_{\text{приск}} = 60$ 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), $I_{\text{сварки}} = 620$ мА, $I_{\text{фокус}} = 30$ мА, відстань до пушки 175 мм, швидкість зварювання 30 м/год.;

- зварювання $U_{\text{приск}} = 60$ кВ, $I_{\text{сварки}} = 620$ мА, $I_{\text{фокус}} = 60$ 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 сталі ЕП517-ППО встановлено:

- міцність зварного шву на розрив дорівнює $\sigma_b = 105 \geq [\sigma_b^{20}] = 106$ кгс/мм²;
- міцність при $t = 650$ °С $\sigma_b = 39$ кгс/мм². Руйнування усіх зразків відбувалося по основному металу;
- довготривала міцність при $t = 550$ °С та навантаженні $\sigma = 40$ кгс/мм² склала $[\tau] \geq 100$ год. Руйнування зразків відбулося по основному металу.

9. За результатами дослідження металографічного аналізу сталі ЕП517-ППО встановлено:

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

					<i>КР.131.6121м.01.05.00.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- твердість шву 388 НВ > 321 НВ основного металу; мікротвердість шву від 368 до 450 μН, що ≥ 360...375 μН основного металу;

- в зоні ЗТВ шву зерна рівновісні, мають структуру трооститу, 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 сплаву ЕП517-ППО 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 min, усадка min (0,42 мм).

4) При товщині металу 8,5 мм і жорсткому закріпленні дисків при зварюванні min короблення, відсутні кутові деформації, метал не деформується. Через це необхідність у розрахунку зварювальних деформацій відсутня.

11. За результатами дослідження металографічного аналізу сталі ЕП517-ППО встановлено:

- в макроструктурі перерізів усіх зварних швів, основному металі, зоні термічного впливу, в площині шліфу – виявлено пори розмірами від 0,07 до 0,18 мм;

- твердість шву 302 НВ > 341 НВ основного металу; мікротвердість шву від 285 до 341 μН, що ≈ 302...341 μН основного металу;

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

					<i>КР.131.6121м.01.05.00.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

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

Зварюваність сплаву ЕП517-Ш та ЕП609-Ш способом ЕПЗ – добра.

12. Охорона праці при роботах на установках ЕПЗ регламентована нормативами та посадовими інструкціями. Звернута увага на електробезпеку (високий струм 30-60 кВ) та рентгенівське випромінювання. Зроблено розрахунок місцевого заземлення установки КЛ-190 та місцевої вентиляції.

13. Економічні розрахунки показали, що технологічна собівартість складально-зварювальних робіт одиниці продукції за розробленою технологією зварювання складає 40 965 грн., річної програми – 2 441 500 грн.

Економія витрат у порівнянні з виготовленням деталей з титанового сплаву на одиницю продукції склала 18180 грн., за річною програмою 1 090 800 грн.

Таким чином, вибрана технологія зварювання та заміна дисків барабану ротору компресора ГТУ з титанового сплаву на високолеговану жароміцну корозійностійку сталь мартенситного класу ЕП517 є оправданою, економічно обґрунтованою та доцільною.

					<i>КР.131.6121м.01.05.00.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Загальна будова і принцип дії ГТД та його складових частин – 2021 р. / [Електронний ресурс] – Режим доступу : <https://mirmarine.net/svm/seu/664-obshchee-ustroystvo-i-printsip-deystviya-gtd-i-ego-sostavnykh-chastej>
2. 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.
3. 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.
4. Інструкція з охорони праці №256 для зварника на електронно- променевих зварювальних установках. / Інструкція / ДП НВКГ «Зоря- Машпроект», 2021, 23 с.
5. Лабораторні та практичні роботи по курсу «Охорона праці» / Під ред. В.Н. Матвієнко. – Миколаїв: НУК ім.адм.Макарова. – 1978. –86 с.
6. 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.
7. Гасило Ю.А. Контроль якості зварювання. Т. 2. Руйнівні методи контролю: навчальний посібник / Ю. А. Гасило. — Кам’янське : ДДТУ, 2018. — 154 с.
8. Дубовий О.М. Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни «Прикладне матеріалознавство» / методичні вказівки / О. М.Дубовий, Н. Ю. Лебедева, – Миколаїв: Видавництво НУК, 2017. – с.30-49.
9. Системи вентиляції та кондиціонування / Вентиляція зварювального цеху. / [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.ads-vent.ru/blog/ventilyaciya-svarochnogo-ceha>

					<i>КР.131.6121м.01.05.00.ПЗ</i>		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
студент		Антонов			СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ		
керівник		Костін					
Завідувач		Драган			НУК ім. адм. Макарова		

10. Вентиляція зварювального цеху – вимоги і норми, приклади розрахунків. / Промислова вентиляція. / [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://rsvggroup/ventilyatsiya/svarochnogo-tseha.html>
11. Звіт дослідження зварюваності матеріалів ЕП517-III та ЕП609-III / відділ зварювання / АТ НВКГ «Зоря»-«Машпроект».
12. Звід дослідження зварюваності сплаву ЕП517-ППО / відділ зварювання / АТ НВКГ «Зоря»-«Машпроект».
13. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением под ред. Патона Б.Е. «Машиностроение» - 1974 р., 768 с.
14. Романов, В. & Коваль, В. (2010). Применение новых материалов при конвертации корабельных и авиационных ГТД в стационарные ГТУ. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3/2(45) 2010г., С.4–7 <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2010.2748>
15. Волкова Н.А. Материаловедение. Лабораторный практикум. / Н.А. Волкова, А.В. Козырь, И.Ю. Бочкарева – Благовещенск: Амурский гос. ун-т., 2008г., 84 с.
16. Конищев Б.П. ТЕОРИЯ СВАРОЧНЫХ ПРОЦЕССОВ Основы металловедения сварки (Физические процессы в металлах при сварке) – Нижний Новгород – 2011 г.
17. Напівавтоматичне зварювання дротом без захисного газу: особливості та технологія / [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://eweld.com.ua/ua/index.php?route=blog/article&article_id=64
18. Марочник сталі / [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://evek.org/materials/stal-07h12nmbf-ep609.html>
19. Вимірювання твердості за Брінеллем / [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://ukrintech.com.ua/yak-vymiryaty-tverdost-materialu-za-dopomohoiu-tverdomira-za-brinelem>
20. ДСТУ ISO 6892-1:2019 «Металеві матеріали, випробування на розтяг» Національний стандарт України / 70 с.

					КР.131.6121м.01.05.00.ІІЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

21. Бондаренко Л.Ю. ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ З МЕХАНІКИ МАТЕРІАЛІВ І КОНСТРУКЦІЙ / Л.Ю. Бондаренко, О.О. Вершков, Г.В. Антонова / [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://elib.tsatu.edu.ua/dep/mtf/tm_4/index.html

22. Випробування сталі на розтяг / [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://metinvest-smc.com/ua/articles/viprobuvannia-stali-na-roztiag/?srsltid=AfmBOorNmXIfh3APck60GoWrNrcMbvYAQM87XAiwNKNQkqP4q9h8OozS>

23. Марочник сталі / [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://auremo.org/materials/stal-15h12n2mvfab-ep517.html>

24. Абрашин, А.В. Сварка специальных сталей и сплавов: учеб. пособие. – Брянск: БГТУ, 2005. – 116 с.

25. Лобанов Л. М. Образование холодных трещин в сварных соединениях высокопрочных сталей с пределом текучести 350...850 МПа / Л. М. Лобанов, В. Д. Позняков, О. В. Махненко // Автоматическая сварка. - 2013. - № 7. - С. 8-13. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/as_2013_7_3.

26. 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.

					<i>КР.131.6121м.01.05.00.ІІЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		