

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Приладобудівний факультет  
(повна назва інституту/факультету)

Кафедра приладів та систем неруйнівного контролю  
(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ (підпис) \_\_\_\_\_ (ініціали, прізвище)

“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**Дипломний проект**  
на здобуття ступеня бакалавра

зі спеціальності (спеціалізації) \_\_\_\_\_  
(код та назва спеціальності)

на тему: Вихрострумний товщиномір для контролю термопокриття лопаток турбін

Виконав : студент IV курсу, групи

ПК-51  
(шифр групи)

\_\_\_\_\_ Романюк Тетяна Анатоліївна \_\_\_\_\_  
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Керівник \_\_\_\_\_ д. т. н., професор Куц Ю.В. \_\_\_\_\_  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Консультант Графічний \_\_\_\_\_ ст. викл. Богдан Г.А. \_\_\_\_\_  
(назва розділу) (посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ініціали) (підпис)

Консультант Розробка ел. схеми \_\_\_\_\_ к.т.н., доцент Баженов В.Г. \_\_\_\_\_  
(назва розділу) (посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ініціали) (підпис)

Рецензент \_\_\_\_\_  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у цьому дипломному проекті немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Київ – 2019 року

## ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4		Завдання на дипломний проект	2	
2	A4	ДП ПК51.12.000 ПЗ	Пояснювальна записка	56	
3	A2	ДП ПК51. 01.000 ТК	Складальний кресленик. Трансформаторний вихрострумний перетворювач	1	
4	A3	ДП ПК51. 02.000 ТК	Деталювання. Каркас котушки	1	
5	A4	ДП ПК51. 03.000 ТК	Деталювання. Кришка	1	
6	A4	ДП ПК51. 04.000 ТК	Деталювання. Корпус	1	
7	A1	ДП ПК51. 05.000 ТК	Схема електрична принципова	1	
8	A2	ДП ПК51. 06.000 ТК	Схема структурна	1	
9	A2	ДП ПК51. 07.000 ТК	Схема функціональна	1	

				<b>ДП ПК51.12.000.00</b>		
	ПІБ	Підп.	Дата			
Розробн.	Романюк Т.А.			Відомість дипломного проекту	Лист	Листів
Керівн.	Куц Ю.В.				1	1
Консульт.					КПІ ім. Ігоря	
Н/контр.	Лашко О.В.					

Зав.каф.	Протасов А.Г.				Сікорського Каф. ПСНК Гр. ПК-51
----------	---------------	--	--	--	---------------------------------------

**Пояснювальна записка  
до дипломного проекту  
на тему: «Вихрострумний товщиномір для контролю  
термопокриття лопаток турбін»**

Київ – 2019 року

**Національний технічний університет України**  
**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

**Приладобудівний факультет**

**Кафедра приладів та систем неруйнівного контролю**

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Напрямок підготовки (програма професійного спрямування) – 6.051003  
«Приладобудування»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Протасов А.Г.

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**ЗАВДАННЯ**

**на дипломний проект студенту**

**Романюк Тетяни Анатоліївни**

1. Тема проекту «Вихрострумний товщиномір для вимірювання термопокриття лопатки турбін», керівник проекту Куц Юрій Васильович, доктор технічних наук, професор, затверджені наказом по університету від «27» травня 2019 р. № 1384-с

2. Термін подання студентом проекту 10 травня 2019

3. Вихідні дані до проекту: товщина покриття – 0,2...0,8 мм.

4. Зміст пояснювальної записки

Вступ

1. Аналітичний огляд

2. Аналіз методів і засобів електромагнітного контролю товщини

неелектропровідних покриттів на електропровідній основі

3. Розрахунок вихрострумного товщиноміра захисних термопокриттів лопаток турбін

Висновок

Список використаних джерел

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) 7 креслеників

1 – Схема електрична принципова

2 – Схема електрична функціональна

3 – Схема електрична структурна

4 – Трансформаторний вихрострумний перетворювач

5 – Каркас котушки

6 – Корпус

7 - Кришка

6. Консультанти розділів проекту\*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис
Графічний	ст. викл. Богдан Г.А.	
Електричний	к.т.н. , доцент Баженов В.Г.	

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

#### Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Формулювання завдання проекту	28.02.2019	
2	Проведення аналітичного огляду	15.03.2019	
3	Розрахунок компонентів	25.04.2019	
4	Оформлення пояснювальної записки	09.05.2019	
5	Розробка креслеників	3.06.2019	

Студент

Романюк Т.А

Керівник проекту

Куц Ю.В.

\_\_\_\_\_

## Анотація

У цій роботі був спроектований вихрострумний товщиномір для контролю лопаток турбін. У вступі обґрунтовується актуальність і необхідність розробки.

У першому розділі було наведено аналітичний огляд, в якому були розглянуті: лопатки турбін та умови їх експлуатації, матеріали які використовуються для виготовлення. Також було розглянуто захисні покриття лопаток. З запропонованих варіантів було обрано термопокриття.

У другому розділі був проведений аналіз методів і засобів магнітного контролю товщини неелектропровідних покриттів на електропровідній основі. Були наведені деякі моделі товщиномірів з їх характеристиками.

У третьому розділі проведено було розрахунок вихрострумного товщиноміра захисних термопокриттів лопаток турбін. Зокрема розраховано систему ВСП об'єкта контролю. Розроблено функціональну схему, структурну та електричну принципову.

У висновку наведено основні результати, отримані в ході виконання дипломного проекту.

Сторінок основного тексту 56, використаних джерел 16, графічна частина складається з семи креслень. Схема електрична принципова – А1, функціональна схема – А2, структурна схема – А2, складальний кресленик – А2, деталювання: Корпус котушки – А3, Кришка – А4, Корпус – А4.

## Summary

In this work, a vortex current thickness gauge was designed to control turbine blades. In conducting substantiates the relevance and necessity of development.

The first section provided an analytical review, which considered: turbine blades and conditions for their operation, materials used for manufacturing. Protective coverings of the shoulder blades were also considered. From the offered variants the thermal cover was chosen.

In the second section the analysis of methods and means of magnetic control of the thickness of non-conductive coatings on the conductive basis was carried out. There were some models of thickness gauges with their characteristics.

In the third section, the calculation of the eddy current thickness gauge of the protective thermal protection of the blades of turbines was carried out. In particular, the system of the GSP of the object of control has been calculated. The functional scheme, structural and electrical principle are developed.

The conclusion gives the main results obtained during the completion of the diploma project.

The pages of main text 56, used sources 16, the graphic part consists of seven drawings. The circuit is electric principle - A1, functional diagram - A2, structural scheme - A2, assembly drawing - A2, details: Coil body - A3, Cover - A4, Case - A4.

## Зміст

<b>ВСТУП</b> .....	8
<b>РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД</b> .....	10
<b>1.1. Актуальність завдання вихрострумового вимірювання товщини</b> ....	10
<b>1.2. Лопатка турбіни та умови її експлуатації</b> .....	11
<b>1.3. Матеріал лопатки та технологічний процес її виготовлення</b> .....	18
<b>1.4. Захисні покриття</b> .....	21
<b>Висновки до I розділу</b> .....	30
<b>РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО КОНТРОЛЮ ТОВЩИНИ НЕЕЛЕКТРОПРОВІДНИХ ПОКРИТТІВ НА ЕЛЕКТРОПРОВІДНІЙ ОСНОВІ</b> .....	31
<b>2.1. Аналіз існуючих методів вимірювання товщини</b> .....	31
<b>2.2. Товщиноміри покриттів</b> .....	37
<b>2.2.1. Товщиномір покриттів ТП-44М</b> .....	37
<b>2.2.3 Товщиномір покриттів і плівок СМ-8828</b> .....	41
<b>2.2.4 Товщиномір покриттів ТМ-4Т</b> .....	42
<b>Висновки до 2 розділу</b> .....	43
<b>РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНОК ВИХРОСТРУМОВОГО ТОВЩИНОМІРА ЗАХИСНИХ ТЕРМОПОКРИТТІВ ЛОПАТОК ТУРБІН</b> .....	44
<b>3.1 Розрахунок системи ВСП-ОК</b> .....	44

					<b>ПК 51.120000.000ПЗ</b>			
<b>Змн.</b>	<b>Арк.</b>	<b>№ докум.</b>	<b>Підпис</b>	<b>Дата</b>				
<i>Розроб.</i>		<i>Романюк Т.А.</i>			<i>Вихрострумовий товщиномір для контролю термопокриття лопаток турбін</i>	<b>Лім.</b>	<b>Арк.</b>	<b>Акрушів</b>
<i>Перевір.</i>		<i>Куц Ю.В.</i>						56
<i>Н. Контр.</i>						<b>ПБФ, ПК-51</b>		
<i>Затверд.</i>		<i>Куц Ю.В.</i>				<i>Пояснювальна записка</i>		



<b>3.2. Розробка структурної схеми цифрового товщиноміра.....</b>	<b>50</b>
<b>3.3. Розробка електричної принципової схеми.....</b>	<b>51</b>
<b>3.3.1 DS1090.....</b>	<b>51</b>
<b>3.3.2 AD8515.....</b>	<b>51</b>
<b>3.3.3 ADC12081.....</b>	<b>52</b>
<b>3.3.4. AS6C8016.....</b>	<b>52</b>
<b>3.3.5 STM32F103.....</b>	<b>53</b>
<b>Висновки до 3 розділу.....</b>	<b>53</b>
<b>ВИСНОВКИ.....</b>	<b>54</b>
<b>Список використаних джерел.....</b>	<b>55</b>

**Перелік умовних позначень, символів, скорочень і термінів:**

НК - неруйнівний контроль;

ВСК - вихрострумний контроль;

ВТП - вихрострумний перетворювач;

ОК - об'єкт контролю;

АЦП - аналого-цифровий перетворювач;

ПК - персональний комп'ютер;

УЗК - ультразвуковий контроль;

ЦОС - цифрова обробка сигналів.

					ПК51.12.0000.000 ПЗ	Арк.
						7
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ВСТУП

Для вимірювання лінійних розмірів в системі СІ використовується як основна одиниця метр (м); в машинобудування та неруйнівному контролі також використовують дольні одиниці – міліметр (мм), мікромметр (мкм). Міліметр (від мілі та метр) – одиниця виміру, що становить 1/1000 метра. Мікромметр або мікрон (мкм,  $\mu\text{m}$ , мк,  $\mu$ ) – це одиниця вимірювання, що дорівнює  $10^{-6}$  метра.

Метр є одним з семи основних одиниць міжнародної системи. Оскільки точність будь-якого вимірювання значною мірою визначається точністю засобів вимірювання, розробка прецизійних методів та засобів вимірювання різних фізичних величин, в тому числі і лінійних розмірів, є актуальним інженерним завданням.

Товщиномір – це вимірювальний пристрій, що дозволяє вимірювати товщину різних елементів виробів з високою точністю. Такі засоби використовуються при проведенні контрольних-вимірювальних робіт. Вони використовуються для вимірювання товщини металевих виробів і їх елементів, захисних покриттів у вигляді лаків, фарб, епоксидної смоли, оксидної плівки на внутрішніх поверхнях труб (для таких покриттів найчастіше використовують вихрострумові товщиноміри). Один з основних параметрів товщиноміра є похибка вимірювання, що виникає, як правило, внаслідок впливу чинників, дію яких в процесі вимірювання неможливо передбачити заздалегідь.

У вихрострумових товщиномірах, розрахованих на контроль об'єктів пласкої форми, використовують накладні вихрострумові перетворювачі (ВСП), що дає змогу оцінювати товщину об'єкта в локальній зоні. Структурні схеми товщиномірів визначаються способом виділення корисної інформації та відрізняються від схем дефектоскопів, як правило,

					ПК51.12.0000.000 ПЗ	Арк.
						8
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

відсутністю блоків, що застосовуються при модуляційному способі отримання корисної інформації.

Похибка вимірювання вихрострумових товщиномірів залежить від шорсткості поверхні, змін електромагнітних параметрів матеріалу і близькості краю об'єкта, варіації зазору між ВСП і об'єктом, перекосом ВСП при установці його на контрольовану поверхню і тощо.

Вихрострумові товщиноміри діелектричних покриттів на електропровідній основі представляють собою по суті вимірювачі зазору. Вибравши досить велике значення узагальненого параметра контролю, можна отримати хорошу чутливість до зазору за малої похибки, викликані впливом варіації товщини основи. Завдяки цьому вдається створити товщиноміри без застосування спеціальних схем, призначених для ослаблення впливу чинників, що впливають на покази приладів.

Метою даного дипломного проекту є розроблення структурної, функціональної та принципової схеми приладу вимірювання товщини захисних термопокриттів лопаток турбін.

					ПК51.12.0000.000 ПЗ	Арк.
						9
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД.

### 1.1. Актуальність завдання вихрострумове вимірювання товщини

Товщина покриття відіграє важливу роль у якості виробу, може бути виміряна за допомогою багатьох різних інструментів.

Ознаки, які визначають, який метод є кращим для вимірювання конкретного покриття, включають тип покриття, матеріал підкладки, діапазон товщини покриття, розмір і форму деталі і вартість обладнання.

Вихрострумові методи використовуються для неруйнівного вимірювання товщини непровідних покриттів на основах з кольорових металів. Котушка з тонкого дроту, яка проводить високочастотний змінний струм, використовується для створення змінного магнітного поля на поверхні зонда приладу.

Характеристики основи і відстань від зонда до основи (товщина покриття) впливають на величину вихрових струмів. Вихрові струми створюють своє власне (направлене у зворотному напрямі) електромагнітне поле, яке може сприйматися збуджуючою котушкою або другою, вимірювальною, котушкою.

Вихрострумові вимірювачі товщини покриття використовуються для вимірювання товщини покриття на всіх кольорових металах. Вони можуть мати опції для зберігання результатів вимірювань або миттєвого аналізу показань і виведення їх на принтер або передачі у комп'ютер для подальшого вивчення. Типовий допуск на вимірювання товщини покриття складає плюс або мінус 1%. Вимірювання чутливі до шорсткості поверхні, кривизни, товщини та типу металевої основи і відстані від краю.

Однак в деяких випадках дія цих чинників може бути компенсована або зменшена за допомогою спеціальних засобів. Наприклад, двополісний зонд може зменшити вплив шорсткості поверхні основи. Кривизна деталі або деталей також може бути скомпенсована осьовим вимірювальним

					ПК51.12.0000.000 ПЗ	Арк.
						10
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

щупом з одним наконечником з підпружиненою вимірювальною частиною.

Цей тип зонда є ідеальним для контролю алюмінієвих шторок або вигнутих автомобільних компонентів кузова. На додаток до отримання показань на ділянках без покриття можна використовувати прокладки, зазвичай зроблений з майлара, для калібрування датчика та підвищення точності вимірювання.

Стандартні методи для застосування і виконання цього тесту доступні в ASTM B 244, ASTM D 1400 і ISO 2360.

Деякі датчики об'єднують принципи магнітного і вихрового методів в одному пристрої. Деякі спрощують задачу вимірювання товщини на різних основах, автоматично перемикаючись з одного принципу роботи на інший, залежно від матеріалу основи.



Рис 1.1 – Ілюстрація процесу вимірювання товщини покриття

## 1.2. Лопатка турбіни та умови її експлуатації

Турбіни - це лопаткові машини, в яких кінетична енергія робочого тіла перетворюється в механічну роботу на валу. Потік робочого тіла має вплив на лопатки, що закріплені по колу ротора та вводять їх в рух. Відповідно турбіни перетворюють енергію газу в корисну роботу.

					ПК51.12.0000.000 ПЗ	Арк.
						11
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Робочі лопатки є відповідальними деталями, поломка яких практично завжди тягне за собою серйозну аварію турбіни. Робота лопаток протікає в критично важких умовах (висока і змінна температура, змінна дія струменя пари, дія відцентрової сили і т.д); тому до конструкції лопаток, матеріалу, технології виготовлення та їх монтажу пред'являються особливо високі вимоги [1].



Рис. 1.2 – Приклад лопатки турбіни

Одна з різновидів конструкцій лопаток, зображена на рис 1.2.

Зазвичай лопатки поділяють на довгі та короткі. Короткі лопатки виконують з постійним по висоті профілем, довгі – зі змінним. Довгі лопатки доводиться виконувати закрученими відповідно до трикутників швидкостей, що змінюються по висоті. Одночасно необхідно зменшувати їх площу від кореневого перерізу до периферійного для того, щоб зменшити відцентрову силу робочої частини лопатки і напруги в кореновому перерізі і в хвостовику. Довжина лопаток турбіни для різних двигунів укладена в межах 40 ... 350 мм, закрутка пера досягає 60 °. Перо, робочої лопатки турбіни має складну просторову аеродинамічну форму зі змінними профілями поперечних перерізів. Перетину пера повернені відносно один одного, створюючи його закрутку.

					ПК51.12.0000.000 ПЗ	Арк.
						12
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У турбінному виробництві, лопатка турбіни високого тиску отримала найбільшу увагу дослідників, тому що це надзвичайно складне завдання. Здатність працювати за підвищених температур газу виникає в результаті поєднання поліпшених матеріалів і розробки більш складних пристроїв для внутрішнього і зовнішнього охолодження. В даний час лопатки турбін високого тиску отримують стиснене повітря, що відходить від компресора, і подається в лопатки турбіни, хоча просвердлені на них невеликі отвори (рис.1.3), з метою встановлення захисного шару на краю лопаток і гарантування того, що гарячі гази не могли безпосередньо впливати на них [5].

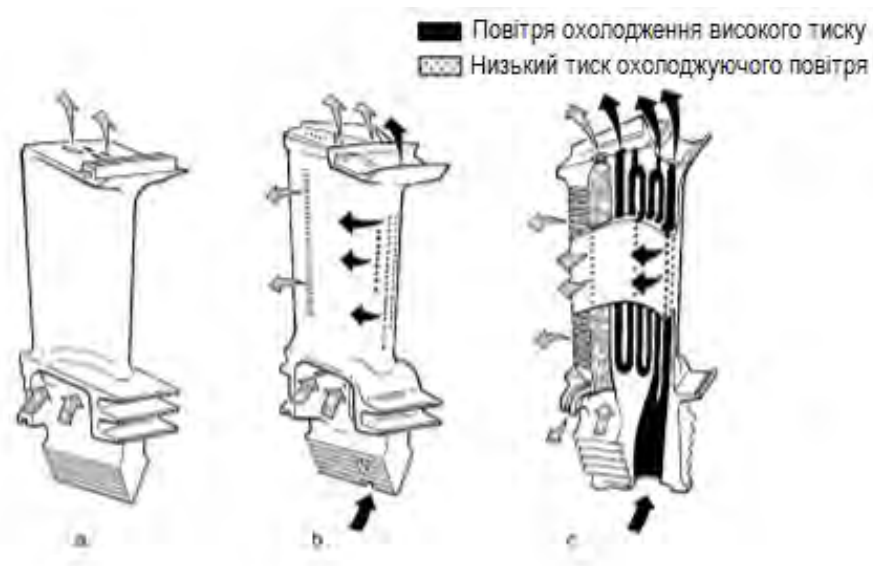


Рис. 1.3 - Лопатки турбіни високого тиску з внутрішнім охолодженням

Сучасні титанові сплави дозволяють виготовити лопатки довжиною до 1500 мм. Але в цьому випадку обмеженням є міцність ротора, діаметр якого доводиться збільшувати, але тоді необхідно зменшувати довжину лопатки для збереження їх співвідношення з міркувань аеродинаміки, інакше збільшення довжини лопатки неефективно. Тому існує обмеження довжини лопатки, більше якої вона не може ефективно працювати.



Надійність, довговічність, ремонтпридатність і інші якісні показники турбін багато в чому визначаються їх лопатковим апаратом. Тому до конструкцій лопаток пред'являють чіткі технічні вимоги зокрема до матеріалів і їх стану, точності розмірів і геометричної форми лопаток.

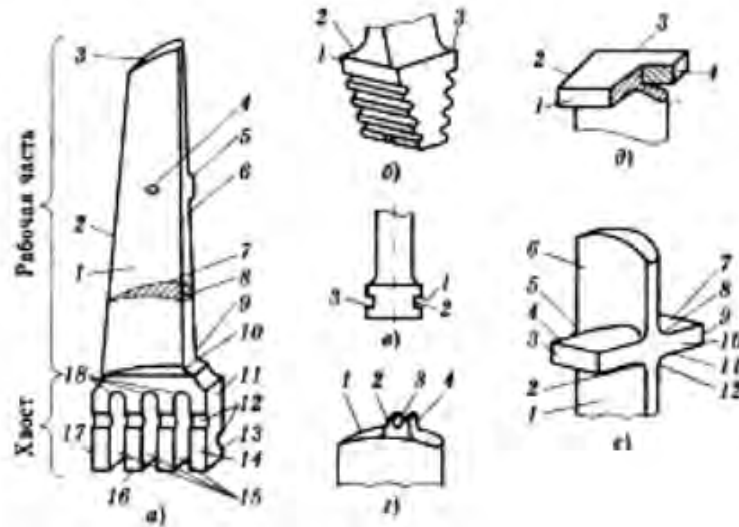


Рис. 1.4 – Приклад конструкції робочої лопатки і елементів конструкції лопаток

На (рис. 1.4) позначено:

**а – лопатка з вильчатим хвостом:** 1 – внутрішня поверхня; 2 – вихідна кромка; 3 – зовнішня поверхня; 4 – отвір під дріт; 5 – потовщення; 6 – вхідна кромка; 7 – зовнішній профіль перетину; 8 – внутрішній профіль перетину; 9 – зовнішній жолобник; 10 – внутрішній жолобник; 11 – вхідна площина хвоста; 12 – отвори під заклепки; 13 – зовнішня радіальна площина хвоста; 14 – внутрішня радіальна площина хвоста; 15 – пази хвоста; 16 – торець хвоста; 17 – вихідна площина хвоста; 18 – вершина пазів хвоста;

**б – ялинкового профілю полка, перехід полки в робочу частину:** 1 – внутрішня площа полки; 2 – перехідний жолобник; 3 – зовнішня площа полки;

**в – хвіст пазового двостороннього профілю, поверхні профілю:** 1 – верхні, 2 – бічні, 3 – нижні;

**г – голова з шипом:** 1 – торець головки; 2 – внутрішня поверхня шипа; 3 – зовнішня поверхня шипа; 4 – вхідна поверхня шипа;

**д – бандажна полка:** 1 – внутрішня площина бандажної полки; 2 – вхідна площина бандажної полиці; 3 – зовнішня площина бандажної полки; 4 – вхідна площина бандажної полки;

**е – перемичка двох'ярусної лопатки:** 1 – нижній ярус; 2 – внутрішній нижній жолобник; 3 – внутрішня площина перемички; 4 – вихідна площина перемички; 5 – внутрішній верхній жолобник перемички; 6 – верхній ярус; 7 – зовнішня площина перемички; 8 – зовнішній верхній жолобник перемички; 9 – зовнішня площина перемички; 10 – вхідна площина перемички; 11 – зовнішня площина нижнього ярусу; 12 – зовнішній жолобник нижньої перемички.

Технічні умови на вироби лопаток часто обмежуються вказівкою шорсткості поверхні і її мікротвердості. Параметри шорсткості поверхні призначаються конструктором залежно від умов роботи. При складанні креслень звертають увагу на поверхні, дотичні до інших деталей, зокрема на поверхні, що труться.

Результати дослідів показують, що шорсткість поверхонь суттєво збільшується внаслідок корозії та ерозії, а також відкладення солей. Орієнтовні дані значення абсолютної шорсткості лопаток наведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1. Орієнтовні значення абсолютної шорсткості лопаток

Стан поверхні лопаток	Шліфова- ні та поліровані лопатки	Фрезерова- ні тягнені лопатки	Координовані поверхні лопаток	Лопатки		
				Точног о лиття	Грубого лиття	Занесені солями
Середня висота виступів шорсткості $R_a, \text{мм}$	0,001- 0,002	0,015- 0,025	0,01- 0,03	0,015 -0,03	0,06 - 0,25	0,1- 0,4

Параметри шорсткості поверхонь робочої частини і перехідних галтелів зазвичай задаються в межах  $R_a = 1,25 - 0,63$  мкм, у ряді випадків  $R_a = 0,63 - 0,32$  мкм, а профільних поверхонь хвостів лопаток  $R_a = 1,25 - 0,63$  мкм. В той же час шорсткість турбінних лопаток чинить сильний вплив на аеродинамічну ефективність і теплове навантаження лопаток.

Застосування теплозахисних покриттів (ТЗП) лопаток турбін на основі нікелевого сплаву допомагає захистити поверхню від високотемпературної корозії в результаті дії високих температур, крім того, знижує температуру металу лопаток і збільшує їх ресурс [2]. Стеліт – сплав на основі кобальту (60-65 %), що містить 25-28 % хрому і 4-5 % вольфраму. Він має високу твердість і дуже високу корозійну стійкість. На даний момент при проектуванні і виготовленні лопаток турбін перспективних газотурбінних двигунів значна роль відведена мінімізації шорсткості поверхні лопаток.

Лопатка приєднується до диска робочого колеса турбіни. Основні конструкторські бази сполучення хвоста з диском відносяться до профільних поверхонь хвоста, а допоміжні конструкторські бази – до профільних поверхонь паза або гребеня диска.

Лопатка турбіни є окремим компонентом, що утворює секцію турбіни газової турбіни або парової турбіни. Лопатки відповідають за вилучення енергії з високотемпературного газу високого тиску, що виробляється камерою згоряння. Лопатки турбіни часто є обмежувальною складовою газових турбін [3]. Щоб вижити в цьому важкому середовищі, лопатки турбін часто використовують екзотичні матеріали, такі як суперсплави і різні методи охолодження, до прикладу внутрішні повітряні канали, охолодження прикордонного шару і покриття теплового бар'єру. Втомленість лопатей є основним джерелом відмов у парових турбінах та газових турбінах. Втома обумовлена механічною напруженістю, викликаною вібрацією і резонансом в робочій зоні машин. Для захисту

					ПК51.12.0000.000 ПЗ	Арк.
						16
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

лопаток від цих високих динамічних напружень використовуються демпфери тертя [4].

Сили, що діють на робочі лопатки двигуна під час роботи, періодично змінюються. Якщо частота збуджуючих коливань співпадає з частотою власних коливань лопаток, виникне резонанс. В такому випадку напруги в лопатках стрімко збільшуються, і відмовідно може відбутись поломка лопаток по перу або по замковій частині. Періодичність сил, що викликають вимушені коливання лопаток, пояснюється неоднорідністю потоку в проточній частині, пов'язаній з кінцевим числом статорних деталей. Це форсунки і жарові труби камери згоряння, соплові лопатки, стійки в проміжній або задній опорі, лопатки спрямляючого апарату за турбіною і т.д.

Злам у лопатках при цьому носить лавиноподібний характер. Поломка однієї лопатки зазвичай призводить до пошкодження і руйнування інших лопаток в робочому колесі і навіть лопаток наступних ступенів (рис.1.5). Можливість виникнення резонансу зазвичай наперед аналізується і виключається під час проектування.

У виробництві використовують такі способи забезпечення втомної міцності лопаток:

- підвищення втомної міцності «ялинкового» замку лопаток шляхом обробки (зміцнення) його мікрокульками;
- контроль частоти власних коливань бесполочних лопаток;
- контроль втомної міцності лопаток під час їх виготовленні.

Проте надійність цих методів не є високою настільки, щоб цілком викреслити можливість виникнення резонансу або забезпечити рівень вібронапруг. Тому при доведенні турбіни проводиться тензовимір (вимір вібраційних напружень на лопатках) на основі попереднього розрахункового аналізу найбільш небезпечних місць. У разі виявлення неприпустимо високого рівня напружень або необхідності знизити ризик їх

					ПК51.12.0000.000 ПЗ	Арк.
						17
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

збільшення проводиться вибір найбільш надійних, прийнятних за собівартістю і термінів реалізації заходів для боротьби з потенційним дефектом.

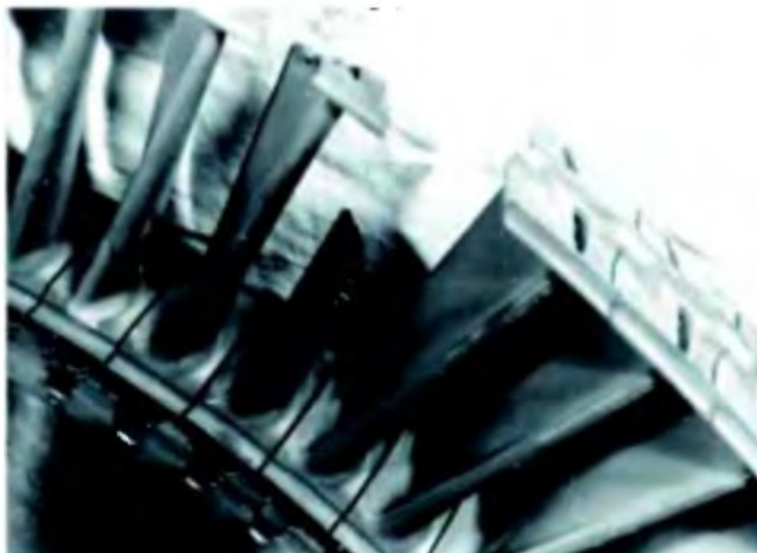


Рис. 1.5 - Обрив верхньої половини профільної частини робочої лопатки другого ступеня турбогвинтового двигуна і опосередковані збитки бандажних полиць інших лопаток

Зменшення резонансних напруг без дороговартісного і тривалого перепроєктування робочої лопатки можливе за рахунок збільшення рівня демпфування або за рахунок зменшення рівня збудливих сил.

### **1.3. Матеріал лопатки та технологічний процес її виготовлення**

Матеріали, що використовуються при виготовленні лопаток, переважно включають залізо, нікель і кобальт з хромом, який утворює один з основних легуючих елементів, завдяки високій стійкості до окислення. Інші легуючі елементи включають більшість металів періодичної таблиці.

					ПК51.12.0000.000 ПЗ	Арк.
						18
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Переважно лопатки турбіни виготовляються з нержавіючої сталі, титану, нікелевих сплавів і керамічного матеріалу.

Турбіна завжди розташована після камери згоряння, і температура, якій здатні протистояти лопатки турбіни на першому етапі, є основним показником технологічного рівня двигуна. Ці лопатки піддаються впливу температур до 2000°C; температура плавлення сталі становить близько 1100°C, а нікель може мати набагато більшу температуру – до 1700°C.

Використання матеріалу з високою температурою плавлення є одним із способів вирішення цієї проблеми, крім цього існують способи зниження ефективної температури над поверхнею металу, що ґрунтуються на використанні охолодження плівки.

На (рис. 1.6) можна побачити отвори в лопаті, де "охолоджуюче повітря" (400°C) витікає з леза, створюючи ефективно плівку, яка обходить лопатку, захищаючи її від зовнішньої температури.



Рис. 1.6 – Приклад лопаті з отворами

Сучасні газові турбіни мають найсучаснішу та найскладнішу технологію у всіх аспектах. Як було згадано раніше, найнебезпечнішою точкою є така, що знаходиться на вході турбіни, тому що з нею пов'язано кілька труднощів (температура 1400 С - 1500 С, високий тиск, висока швидкість обертання, вібрація, малі області циркуляції, і т.і.). Вищевказані

					ПК51.12.0000.000 ПЗ	Арк.
						19
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

фактори чинять вплив на деградацію поверхні лопаті. Їх небезпечність на якісному рівні оцінено в таблиці 1.2. [2].

Таблиця 1.2. Оцінка ступеня «тяжкості» різних поверхневих проблем, пов'язаних із застосування турбін

	<b>Окислення</b>	<b>Гаряча корозія</b>	<b>Взаємна дифузія</b>	<b>Термічна втома</b>
<b>Літаки</b>	Важкий	Помірний	Важкий	Важкий
<b>Наземний генератор електроенергії</b>	Помірний	Важкий	Помірний	Легкий
<b>Морські двигуни</b>	Помірний	Важкий	Легкий	Помірний

Для подолання цих бар'єрів лопатки турбін виготовляються з використанням сучасних матеріалів і сучасних сплавів (супер-сплавів), які містять до десяти різних легуючих елементів, але їх мікроструктура дуже проста, вона складається з прямокутних блоків, укладених у звичайний масив з вузькими смугами цементу для того, щоб тримати їх разом. Цей матеріал (цемент) змінювався за рахунок включення танталу, раніше в ньому використовувалася інтерметалічна форма титану [3]. Ця зміна дала поліпшену міцність при високій температурі, а також поліпшила стійкість до окислення. Однак найбільша зміна відбулася у нікелі за присутності високого рівня вольфраму та ренію. Ці елементи дуже ефективні при зміцненні розчину. Починаючи з 1950-х років, еволюція від кованого до традиційно відлитого, від спрямованого затвердіння до монокристалічних лопаток турбіни дозволила підвищити допустимі температури металу на 250°C. З іншого боку, розвиток охолодження майже вдвічі збільшив цю величину з огляду на температуру вхідного газу турбіни. Важливий останній внесок припав на вирівнювання зерна сплаву в монокристалічній лопаті, що дозволило ретельніше контролювати пружні властивості матеріалу.

Ці властивості, в свою чергу, контролюють природні частоти коливань лопаті. Зменшення кількості охолоджуючого повітря дозволяє підвищити продуктивність турбін, наприклад, двигун Rolls-Royce використовує близько 5% повітря компресора для охолодження ряду лопаток турбін високого тиску. З іншого боку, монокристалічний сплав здатний працювати за температури приблизно на 35°C вищої, ніж його попередник.

#### 1.4. Захисні покриття

В даний час для захисту лопаток турбіни газотурбінних двигунів різного призначення все більш широке застосування знаходять теплозахисні покриття. В якості захисного керамічного шару використовують діоксид цирконію, стабілізований ітрієм ( $ZrO_2 + Y_2O_3$ ). Відомо, що керамічний шар, що осідає на метал, не має значної взаємної дифузії. В результаті низької адгезійної міцності між шарами і різниці температурних коефіцієнтів лінійного розширення відбувається відкол керамічного шару [6-8], що різко знижує захисні властивості такого покриття. Для поліпшення адгезійної міцності керамічного шару проводять підготовку поверхні деталі перед нанесенням керамічного шару. Якість підготовки поверхні і її шорсткість впливають на адгезійну міцність керамічного і металевих шарів покриття. З метою оцінки впливу якості підготовки поверхні в роботах [6-8] провели ряд експериментів. Для проведення експерименту були вирізані 3 пластини з жаростійкого нікелевого сплаву ЖС6У розміром  $125 \times 40 \times 3$  мм. Керамічне покриття  $ZrO_2 (7Y_2O_3)$  наносили на електронно-променевої установки УЕ-175 за існуючою технологією. Підготовку поверхні зразків проводили за різними технологіями:

1) пневмогідроструйна обробка - обробка поверхні деталі твердими частинками, розганяється струменем стисненого повітря в середовищі

					ПК51.12.0000.000 ПЗ	Арк.
						21
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



робочої рідини; обдування поверхні лопатки повітрям ( $P_m=(1.5-2.0)*105N/m^2$ ); ультразвукове промивання в УЗВ-16М;

2) шліфування за класичною технологією із застосуванням наждачного паперу, завершальна стадія - полірування алмазною пастою; обдування поверхні лопатки повітрям; ультразвукове промивання в УЗВ-16М;

3) грубе шліфування - зернистість наждачного паперу Р220; обдування поверхні лопатки повітрям; ультразвукове промивання в УЗВ-16М.

Зразки для напилення керамічного покриття розташовувались відносно тигля під прямим кутом, для чого їх встановлювали на оснащення перпендикулярно умовній лінії напрямку конденсації осідаючого покриття (рис. 1.7).

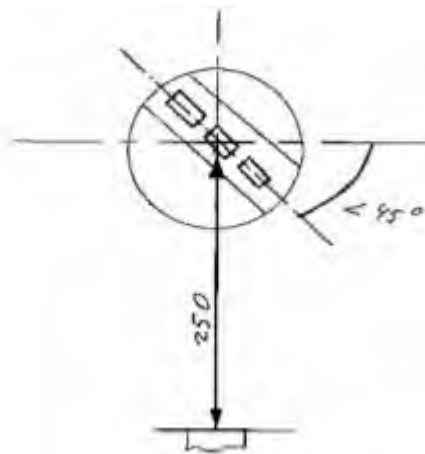


Рис. 1.7 - Схема взаємного розташування зразків на оснащенні і тигля

Напилення проводилося при постійній температурі без обертання. Зовнішній вигляд пластин після нанесення керамічного шару представлено на (рис. 1.8). Як видно з (рис. 1.8), якісне покриття вийшло тільки на поверхні зразка, підготовленого за технологією № 1. На двох інших зразках при охолодженні відбулося лущення кераміки. Після підготовки зразків за різними технологіями на зразках отримуємо поверхню з різною шорсткістю.

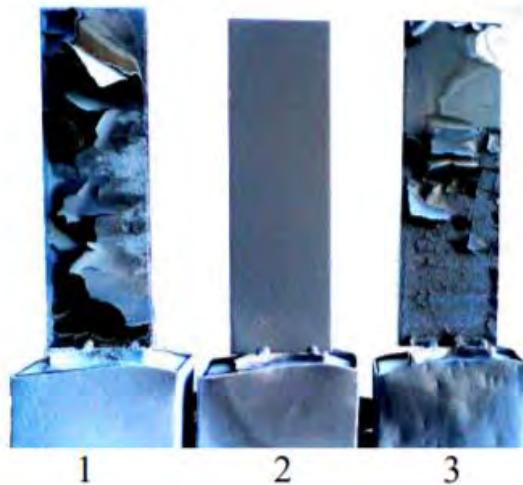


Рис. 1.8 - Зовнішній вигляд зразків після нанесення керамічного шару:  
1 - після полірування; 2 - після піскоструювання; 3 - після грубого шліфування.

Керамічний шар, що наноситься електронно-променевим методом, формується у вигляді стовпчикової структури певної товщини. Стовпи, осідаючи на метал, адгезійно «зачіпляються» за мікро нерівності поверхні. Оскільки після обробки поверхні мають різну шорсткість, то і адгезійна міцність керамічного шару різна. Встановлено, що при високому ступені шорсткості товщина стовпів вище цих нерівностей і не відбувається зчеплення. При грубій обробці поверхні стовпи по товщині менше западин і не відбувається адгезійного зчеплення. При співмірності товщини стовпів і розмірів нерівностей поверхні відбувається задовільна адгезія керамічного шару до металевого шару. Таким чином, якість підготовки поверхні чинить істотний вплив на адгезійну міцність осідаючого керамічного шару.

Застосування теплозахисних багатошарових покриттів дозволяє вирішити проблему зниження температури деталей ГТД в умовах високих температур. Це пов'язано з дуже низькою теплопровідністю кераміки (наприклад  $ZrO_2$ ) [9], що дозволяє ефективно ізолювати компоненти турбіни двигуна від температур, що перевищують критичні для

конкретного жароміцного сплаву. Отже, це дає змогу або збільшити час роботи деталей ГТД за даних температур, або підняти температуру газу перед турбіною, що підвищує коефіцієнт її корисної дії. Однак при нанесенні таких покриттів необхідно забезпечити високу адгезію теплозахисного покриття і матеріалу лопатки, тому при їх конструюванні застосовують нанесення декількох шарів (керамічного і металевого) які забезпечують захист від газової корозії і хороше зчеплення матеріалів (рис. 1.8). У зв'язку зі значною різницею між коефіцієнтами термічного лінійного розширення кераміки і жароміцного сплаву, що може призводити до сколювання верхнього шару, завдання контролю якості таких покриттів є вельми актуальним [10].

Прийнято вважати, що в якості верхнього шару ТЗП доцільно застосовувати кераміку на основі цирконію, стабілізованого оксидом ітрію ( $ZrO_2$ ,  $Y_2O_3$ ) [9], а в якості нижнього підшару рекомендується використовувати жаростійкий матеріал.

Нанесення керамічного шару дозволяє забезпечити зниження температури на поверхні металу деталі, а жаростійкий шар забезпечує захист поверхні від високотемпературної корозії (кераміка цього не забезпечує) і підвищує адгезію матеріалів (рис. 1.9).

Використання різних технологій формування структури керамічного шару дозволяє забезпечити необхідний рівень термічної стійкості зовнішнього шару в залежності від умов роботи [12] в процесі швидкої зміни температур на поверхні деталей ГТД в сукупності з жаростійким підшаром. Електронно-променеве напилення дозволяє сформувати стовпчасту структуру керамічного шару, реалізувати газотермічне напилення, а різними видами термообробки можна сформувати тріщинувату структуру [13].

					ПК51.12.0000.000 ПЗ	Арк.
						24
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



переваг процесу EB-PVD є стійке до деформації покриття. Інші переваги керамічних покриттів EB-PVD включають відмінне зчеплення як з грубими, так і з гладкими поверхнями. Фінальне покриття також є гладким, не вимагаючи обробки поверхні. Крім того, процес осадження з парової фази не перекриває невеликих отворів для охолодження повітря в лопатках турбін під час осадження [14, 3].



Рис 1.11 - Схема EB-PVD процесу, вся збірка буде під вакуумом.

Обертання пучка електронів виходить магнітним полем,  
перпендикулярним малюнку

У способі нанесення порошку APS керамічний матеріал знаходиться у формі текучого порошку, який подається в плазмовий пальник і розпилюється розплавленим на поверхню металевої підкладки. Краплі розплавленого матеріалу утворюють "пластинки" на металевій підкладці. Розпилені покриття мають половину теплопровідності покриттів EB-PVD і тому є кращими ізоляторами [14].

Колоноподібна мікроструктура значно підвищує стійкість до деформації, а отже, і термічний цикл "пластинки" утворює пластинчасту структуру, що складається з тріщин з нерівномірною щільністю і розміром пор (рис.1.12).

					ПК51.12.0000.000 ПЗ	Арк.
						26
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

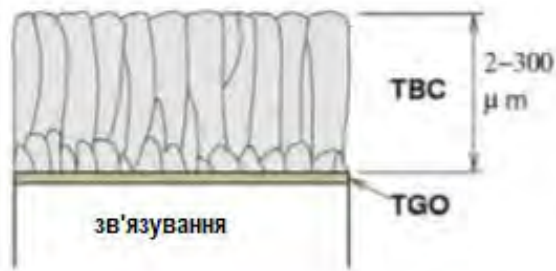


Рис 1.12 - Схема мікроструктури теплового бар'єрного покриття (ТВС), отриманого методом електронно-променевим осадженням з парової фази (МЕР).

На відміну від покриттів EB-PVD, покриття APS вимагають грубої поверхні осадження для гарної адгезії. Крім того, термічно розпилені покриття більш схильні до розколювання, зменшуючи термін служби покриття відносно покриттів EB-PVD.

Терморозпилювані деталі (рис.1.13) також не підлягають повторному використанню в якості деталей, покритих EB-PVD, оскільки великі розриви та зовнішні тріщини призводять до пошкодження деталей з APS, які не підлягають ремонту. Однак обладнання, портативність і низька собівартість APS, часто робить процес більш комерційно привабливим, ніж EB-PVD.



Рис 1.13 - Схематична мікроструктура термічного розпилення покриття, що показує лише кілька шарів частинок

Важливо враховувати матеріал джерела (злитка), що відноситься до якості кінцевого покриття. Наприклад, злитки для EB-PVD повинні мати високу чистоту (вище 99,5%) і послідовну та рівномірну щільність і

					ПК51.12.0000.000 ПЗ	Арк.
						27
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

структуру пор. Якщо злитки занадто щільні, вони зазнають сильного теплового удару, коли вони стикаються з електронним пучком [5].

У злитку нерівномірної щільності пористості може існувати закрита пористість. У цьому випадку випуск уловлюваного газу може також викликати виливи. Розплавлені коси, коли вони знаходяться в покритті, призводять до дефектів і потенційних відмов. Оптимальна щільність для злитка бар'єрного покриття EB-PVD зазвичай знаходиться в діапазоні 60-70% від теоретичної щільності. Якщо щільність нижче, ніж вищезгадані значення, ефективність процесу знижується [5].

Дугоплазмовий порошок, що розпилюється, повинен мати розмір частинок, достатній для проходження через плазмовий факел, але не настільки великий, що вся частинка не плавиться, виходячи з плазмового пістолета. На додаток до композиції, розмір частинок, розподіл частинок за розміром і сипучість є важливими міркуваннями для термічного розпилення APS. [5]

Незважаючи на те, що YSZ був стандартним матеріалом для покриття першого покоління, він має ряд недоліків, які перешкоджають поліпшенню покриттів теплового бар'єру. Однією з проблем є відсутність стабільної фази за високих температур. Три типово сформовані фази мають місце у ділянці цирконієво-ітрієвої бінарної системи: кубічної, тетрагональної та моноклінної. В умовах експлуатації або формування можуть виникати фазові перетворення, які викликають механічне навантаження і сприяють відмові зв'язуючого покриття. Крім того, в той час як YSZ має низьку теплопровідність (2,4 Вт/мК), бажано мати тугоплавкий керамічний матеріал з меншою теплопровідністю, ніж YSZ. Якщо покриття прогресивно спікається і ущільнюється в процесі експлуатації, то теплопровідність збільшується разом з чутливістю до теплового удару. Отже, необхідні матеріали, принаймні такі, як вогнетривкі типу YSZ. Також може бути важко підібрати термічне розширення YSZ-покриттів до

					ПК51.12.0000.000 ПЗ	Арк.
						28
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

шару зв'язного покриття і металевої підкладки. В даний час фахівцями ведеться велика робота з пошуку вдосконалених матеріалів для теплоізоляційних покриттів.

Зменшена теплопровідність покриття, виготовленого з використанням цих матеріалів, дозволить турбіні працювати при більш високій температурі і, отже, підвищити ефективність. Це також може дозволити лопаті турбіни залишатися більш прохолодною, гальмуючи ті теплові процеси, які призводять до відмови покриття і збільшуючи термін служби турбіни.

**Керамічні матричні композити (КМК).** Подальше підвищення температури вимагало розробки керамічних матричних композитів. Ряд просто формованих статичних компонентів для військових і цивільних застосувань знаходяться в стадії розробки двигуна, а направляючі лопатки для осьових компресорів були виготовлені для демонстрації можливостей процесу, такі технології включають в себе просунення текстильних матеріалів і хімічну інфільтрацію парів [5].

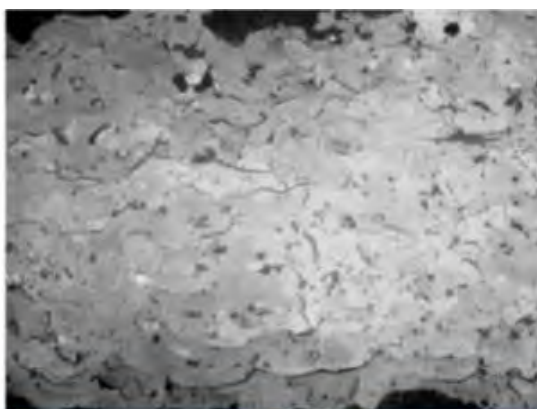


Рис. 1.14 - Мікрофотографії покриття  $\text{Ln}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$  і YSZ

Сучасні комерційно доступні керамічні композиційні матеріали використовують в керамічній матриці волокна карбїду кремнію або оксиду алюмінію. Ці матеріали здатні не охолоджуваними працювати за температур до  $1200^\circ\text{C}$ , тобто за межами можливостей сучасних систем нікелевих сплавів. Раннім прикладом такої системи є оксид алюмінію

					ПК51.12.0000.000 ПЗ	Арк.
						29
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



волокон в матриці з оксиду алюмінію. Для реалізації граничної несучої здатності за високих робочих температур, можуть бути використані монокристалічні оксидні волокна. Це дає можливість працювати при температурі 1400°C.

Для підвищення їх ефективності постійно іде пошук можливостей збільшення робочих температур газотурбінних двигунів. Разом з цим, оскільки робочі температури зростають, висока довговічність компонентів двигуна повинна відповідно збільшуватися. Значні досягнення в області високотемпературних можливостей були досягнуті шляхом формування супер-сплавів на основі заліза, нікелю та кобальту.

У той час як супер-сплави знайшли широке застосування компонентів для широкої номенклатури газотурбінних двигунів, були запропоновані альтернативні матеріали. Матеріали, що містять кремній, зокрема, з карбідом кремнію (SiC) в якості матричного матеріалу і/або в якості армуючого матеріалу, в даний час розглядаються для застосування при високих температурах, таких як камери згоряння та інших гарячих компонентів газотурбінних двигунів таких, як камери згоряння, перехід коробів (який приймає продукти згоряння і направляє їх в напрямку турбінної секції), направляючі лопатки сопла, кожух, навколишній розділ, і інші.

### **Висновки до I розділу.**

В данному розділі проаналізували актуальність вихрострумового вимірювання товщини. Був проведений загальний огляд лопаток турбін, умови їх експлуатації, їх характеристики. Також було зазначено, які матеріали використовують для виготовлення лопаток, а також які захисні покриття використовують. Слідуючи з цього, можемо зробити висновок, що кераміка найоптимальніше покриття лопатки.

					ПК51.12.0000.000 ПЗ	Арк.
						30
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО КОНТРОЛЮ ТОВЩИНИ НЕЕЛЕКТРОПРОВІДНИХ ПОКРИТТІВ НА ЕЛЕКТРОПРОВІДНІЙ ОСНОВІ

### 2.1. Аналіз існуючих методів вимірювання товщини

Товщину покриття можна виміряти різними способами: від неруйнівного вимірювання деталі до її різання.

Залежно від стану покриття, фізичних властивостей, інформації та покриття матеріалу, необхідної точності, робочого середовища тощо використовуються кілька методів. Великою групою методів неруйнівного контролю є електричні пристрої, в тому числі засновані на фізичних властивостях характеристик матеріалу деталей і їх відмінності від характеристик покриття.

Основним типом механічних вимірювач пошкоджень є мікрометр. У випадку великих товщин, можливо використовувати ті ж техніки і методики, але й можна використовувати й інші, до прикладу за допомогою зважування можливо визначити товщину, якщо відома густина матеріалу.

Резистивний метод. Вимірювання опору плівки - це проста процедура, що використовується для визначення товщини провідника і товщини шару напівпровідникового епітелію.

Ємнісний метод може бути використаний для визначення товщини діелектричних покриттів. Виміряна ємність обернено пропорційна товщині діелектричного покриття і прямо пропорційна площі електрода (без урахування крайового ефекта).

Радіаційні методи вимірюють на основі характеристик випромінювання.

Іонізація Джерело випромінювання і іонізаційний перетворювач можуть бути встановлені на обох сторонах вимірюваного покриття, а

					ПК51.12.0000.000 ПЗ	Арк.
						31
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

також на одній стороні. В обох випадках інтенсивність випромінювання, що покривається кришкою, змінюється зі зміною товщини.

Рентгенівські методи товщинометрії – метод поглинання і метод емісії, мають невисоку точність, їх використання недоцільно для розв'язання поставленої задачі.

Для методів оптичного контролю товщина може визначатися цілим рядом оптичних явищ, таких як інтерференція, поглинання, пропускання та відбиття світла. Використання конкретного явища для вимірювання визначається матеріалом.

Метод вихростумової товщинометрії використовується здебільшого для вимірювання товщини захисних не електропровідних покриттів на не феромагнітній основі. В залежності від використаного перетворювача – взаємоіндуктивного чи параметричного, вихідним сигналом є відповідно електрорушійна сила чи комплексний електричний опір.

У ряді вихрострумів товщиномірів використано частотний спосіб отримання вимірювальної інформації. Вимірювальна котушка активується на LC-переході високочастотного генератора. Залежно від товщини покриття, а також від режиму взаємодії поля вихрових струмів з вимірювальною котушкою більшою або меншою мірою змінюється індуктивність вимірювальної котушки. Частота автогенератора може буде розрахована як

$$f_x = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{C_0(L_0 - L_{\text{вн}})} - \frac{(R_0 + R_{\text{вн}})^2}{4(L_0 - L_{\text{вн}})^2}}, \quad (2.1)$$

де  $C_0$  - ємність резонансного контуру;

$L_0$  та  $R_0$  - індуктивність та активний опір вихрострумового перетворювача за відсутності досліджуваного об'єкта;

$L_{\text{вн}}$  та  $R_{\text{вн}}$  - внесені індуктивність та активний опір, зумовлені впливом вихрових струмів у досліджуваному об'єкті.

					ПК51.12.0000.000 ПЗ	Арк.
						32
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Індуктивний метод може бути використаний для вимірювання товщини покриття на феромагнітних деталях. Схема індуктивного товщиноміра представлена на рис 2.1. Основним перетворювачем такого засобу є індуктивний перетворювач, загальний електричний опір обмотки якого залежить від товщини покриття:

$$z = R_0 + \omega \frac{w^2 x_M}{(R_M + R_{MB})^2} + j\omega L_{екв}, \quad (2.2)$$

де  $R_0$  - омичний опір обмотки;

$x_M$  та  $R_M$  - реактивна та активна складові комплексного магнітного опору магнітопроводу;

$R_\delta$  - магнітний опір досліджуваного покриття (між полюсами магнітопроводу та поверхнею феромагнітного тіла деталі).

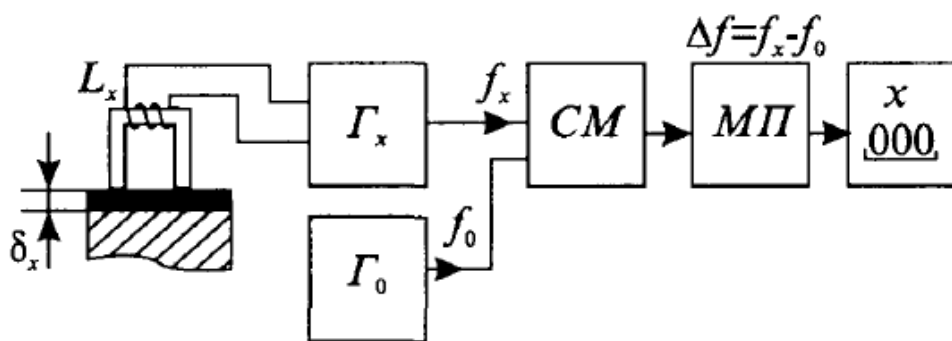


Рис. 2.1 – Схема індуктивного товщиноміра

Якщо брати до уваги, що магнітний опір магнітопроводу є набагато меншим від магнітного опору покриття, еквівалентна індуктивність обмотки наближено може бути записана як

$$L_{екв} \approx \frac{w^2 \mu_0 S_M}{2\delta}, \quad (2.3)$$

де  $w$  - кількість витків вимірювальної обмотки;

$S_M$  - площа перерізу магнітопроводу;

$\delta$  - товщина шару покриття.

					ПК51.12.0000.000 ПЗ	Арк.
						33
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Ефективним схемо технічним рішенням для індуктивних товщиномірів є мостові схеми. На мостовий схемі (рис. 2.2) індикатором вимірюваної величини є електромагнітний мілівольтметр, який підключений до виходу контуру фазочутливої кільцевої схеми. Резистор  $R_p$  змінного опору призначений для встановлення нульового показу мілівольтметра за нульового чи заданого значення вимірюваної товщини.

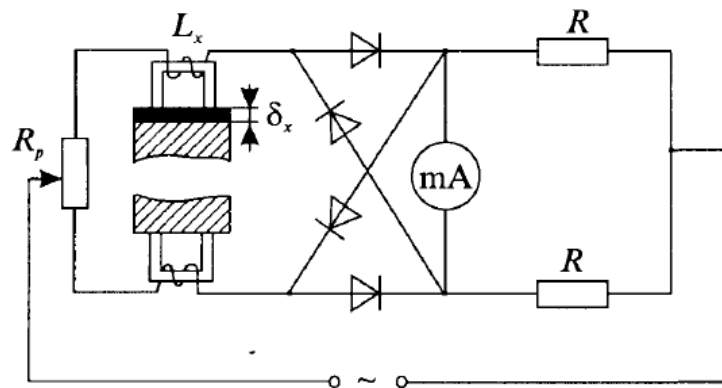


Рис. 2.2 – Мостова схема індуктивного товщиноміра

Абсолютне значення похибки вимірювання товщини покриття за допомогою індуктивних перетворювачів знаходиться в межах 10%.

До числа популярних неруйнівних методів товщинометрії належить метод, заснований на використанні взаємоіндуктивних перетворювачів (рис. 2.3).

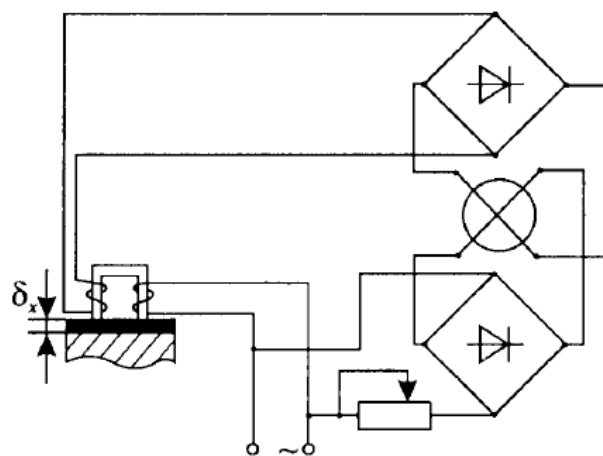


Рис. 2.3 – Вимірювач товщини гальванічного покриття

Вихідним параметром такого засобу електрорушійна сила, що наводиться у вимірювальній котушці перетворювача

$$e_2 = \omega w_2 \frac{I_1 w_1}{Z_M} \approx \frac{\omega w_2 I_1 w_1}{2\delta I (\mu_0 S)} \quad (2.4)$$

де  $w_1$  та  $w_2$  - кількість витків намагнічувальної та вимірювальної обмоток;

$I_1$  - намагнічувальний струм;

$S$  - площа перерізу магнітопроводу;

$\delta$  - товщина покриття;

$Z_m$  - комплексний магнітний опір магнітопроводу.

На основі цього методу, розроблені пристрої для вимірювання товщини покриття в діапазоні до 3 мм з похибкою 10 ... 15%.

Серед методів руйнівного контролю найчастіше використовується хімічний метод, який є основою для зняття покриття за допомогою спеціальних хімічних реагентів. За допомогою цього методу виміром товщини покриття може бути час видалення покриття або його маси, або різниця між вагою частини з покриттям і масою частини після видалення покриття.

Електромеханічні методи широко використовуються для вимірювання розміру поверхні і шорсткості поверхні (контактні товщиноміри, мікрометри, профільні метри) для вимірювання рівня (поплавки і рівні плавучості). Вимірювання відстаней, пройдених транспортними засобами, широко використовуються в якості методу зсуву.

В контактних мікрометрах та профілометрах координати досліджуваного об'єкта попередньо перетворюються в лінійне переміщення голкоподібного щупа, а згодом в електричний сигнал за допомогою індуктивних, взаємоіндуктивних чи ємнісних перетворювачів.

На рис. 2.4 пояснюється принцип вимірювання невеликого розміру на основі ємнісного перетворювача, який є елементом LC - ланцюга кварцового генератора.

					ПК51.12.0000.000 ПЗ	Арк.
						35
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

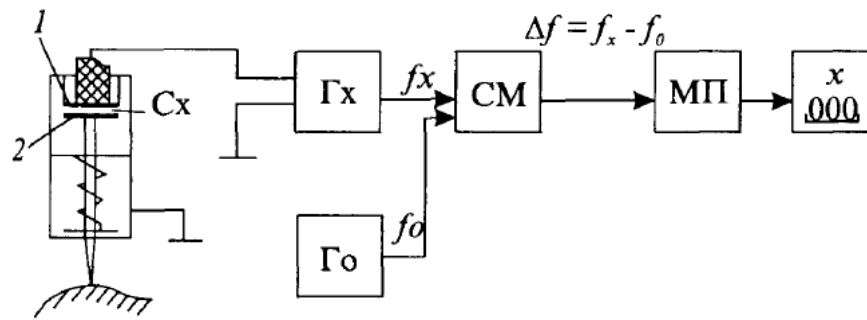


Рис. 2.4 - Схема ємнісного профілометра

Ємнісний перетворювач має стаціонарний електрод 1, прикладений до полірованого скляного стрижня, і рухливий електрод 2, механічно з'єднаний з голкою зонда, закріпленої на корпусі за допомогою плоских пружин. Ємнісний кабельний перетворювач з'єднаний з виходом кварцового генератора, частота  $f$ , якого є функцією ємності  $C$ , між рухливими і стаціонарними електродами. Частота  $f$  і частота  $f_0$  від генератора базової частоти надходять на вхід змішувача, вихідна частота якого  $\Delta f = f_x - f_0$ . Частота, виміряна вимірником частоти, відповідає значенню розміру.

Враховуючи, що

$$f_0 = \frac{1}{2x\sqrt{L_0 C_0}}, \quad (2.5)$$

а при  $C_x = C_{x0} + \Delta C = C_0 + \Delta C$

$$f_x = \frac{1}{2x\sqrt{L_0 C_x}} = \frac{1}{2x\sqrt{L_0 C_0 \left|1 + \frac{\Delta C}{C_0}\right|}}, \quad (2.6)$$

матимемо

$$\Delta f = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{2x\sqrt{L_0 C_0 \left|1 + \frac{\Delta C}{C_0}\right|}} \cdot \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}} \approx \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta C}{C_0} f_0. \quad (2.7)$$

Мікрометри з порогом чутливості в частки мкм забезпечують вимірювання в діапазоні 0,1...1 мм. Такий мікрометр можна

використовувати для вимірювання параметрів шорсткості. У цьому випадку, однак, можуть бути значні помилки через деяку нелінійність, яка виникає під час перетворення реального профіля нерівної поверхні в лінійний рух щупа. Існують також помилки через від'єднання щупа в деяких точках від поверхні і в результаті деформації (пружної і пластичної) на поверхні під дією сили з боку щупа. Ці помилки визначаються зусиллям, створеним щупом. Це зусилля не стає, і воно може змінюватись в залежності від інерційності датчика, радіуса зонда, властивостей матеріалу і характеру профілю поверхні. У цьому сенсі перевагу має метод віброконтакта, який є основою для перетворення в коливання електричного сигналу вібруючого зонда.

## **2.2. Товщиноміри покриттів**

Товщиноміри, які використовуються для неруйнівного контролю захисних покриттів, набувають все більшої популярності. Крім визначення товщини металевих виробів і їх елементів (для цієї мети використовують ультразвукові штангенциркулі), товщиноміри також вимірюють товщину інших покриттів - фарб, епоксидної смоли, оксидної плівки на внутрішніх поверхнях труб тощо (для таких використовують вихрострумові товщиноміри) [16].

### **2.2.1. Товщиномір покриттів ТП-44М**

Прилад ТП-44М (рис.2.5) з приєднаним до корпусу датчиком Ф2 або Ф4 (довжина кабелю 1000 мм) забезпечує можливість вимірювання: товщини лакофарбових і електропровідних немагнітних покриттів на сталях; товщини бітумних і товстошарових захисних покриттів на сталях;

Переваги перед аналогами: низька вартість; відмінний інформативний графічний індикатор (128x64 пікселя) з яскравим білим світлом; виведення

					<i>ПК51.12.0000.000 ПЗ</i>	Арк.
						37
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



необхідної інформації про індикатор, наочність її подання; інтуїтивно зрозуміле управління.



Рис. 2.5 – Товщиномір покриттів ТП-44М

Основні технічні характеристики приладу наведені в табл. 2.1

Таблиця 2.1. Технічні характеристики ТП-44М:

Діапазон вимірювальних товщин (в залежності від типу датчика)	5 мкм...5000 мкм (Ф2) 1-15 мм (Ф4)
Дискретність вимірювання: для датчика Ф2	0,001 мм (до 0,999 мм); 0,01 мм (від 1,00 мм)
Дискретність вимірювання: для датчика Ф4	0,01 мм
Живлення	дві батареї розміру АА
Час до автоматичного вимкнення, хв	2-3
Час прогріву після включення не більше, хв	0,5
Діапазон робочих температур, °С	-5 ... +40
Габаритні розміри, мм	122x65x23
Маса електронного блоку з батареєю, не більше, кг	0,15

Покриття на сталях (діелектричні і електропровідні покриття на феромагнітних металах і сплавах) датчик Ф2: товщина покриття - 0-5000мкм, похибка -  $\pm (3\% + 2 \text{ мкм})$ , габарити датчика, мм D18x38. Товстошарові покриття на сталях (діелектричні покриття на сталях): датчик Ф4: товщина покриття - 1-15мм, похибка -  $\pm (3\% + 0,02 \text{ мм})$ , габарити датчика, мм D25x45. 15мм, похибка -  $\pm (3\% + 0,02 \text{ мм})$ , габарити датчика, мм D25x45.

### 2.2.2 Ультразвуковий товщиномір УТ-1

Товщиномір УТ-1 працює за принципом вимірювання часу поширення ультразвуку в виробі. Вимірювач товщини має генератор імпульсів, який виробляє високочастотні електричні імпульси, які стимулюють п'єзоелектричний перетворювач (ПЕП). В цьому випадку ПЕП перетворює електричні сигнали в пружні (механічні) коливання - ультразвукові хвилі. Ці хвилі поширюються від поверхні входу до поверхні відображення (знизу) і знову приймаються і перетворюються в електричний сигнал за допомогою ПЕП перетворювачів.



Рис. 2.6 – Ультразвуковий товщиномір УТ-1

Переваги товщиноміра УТ-1:

- широкий діапазон вимірюваних товщин;

					<i>ПК51.12.0000.000 ПЗ</i>	Арк.
						39
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- зручність і простота проведення вимірювань за допомогою товщиноміра;
- мінімальна кількість елементів управління по товщині,
- автоматичний вибір типу подовження датчика товщиноміра;
- товщиномір дозволяє регулювати швидкість ультразвуку;
- графічний освітлювач з підсвічуванням;
- контроль стану заряду акумулятора;
- товщиномір може використовуватися для вимірювання швидкості ультразвуку в матеріалі.



Рис. 2.7 – Вимірювання товщини різних виробів

Таблиця 2.2 – Технічні характеристики товщиноміра ультразвукового УТ-1

Діапазон вимірюваних товщин (в залежності від типу датчика), мм	0,8 ... 300
Діапазон установки швидкості ультразвуку, м/с	1000-9999
Дискретність на цифровому індикаторі, мм	0,1
Час встановлення показань, с, не більше	2
Основна похибка вимірювання, мм	$\pm(0,01T+0,1)$
Габаритні розміри, мм	120x60x25
Робочий діапазон температур, °С	от -5 до + 40
Живлення	2 елементи живлення типу ААА
Час безперервної роботи, год, не менше	10
Маса електронного блоку з батареєю, не більше, кг	0,2

### 2.2.3 Товщиномір покриттів і плівок CM-8828

Пристрій (рис.2.8) знайде застосування як в управлінні транспортними засобами, де можна виявити історію транспортного засобу, пофарбовані і зношені частини кузовів, а також для контролю товщини фарби, лаку, різних покриттів і плівок. CM-8828 може вимірювати товщину непровідних покриттів на феромагнітних металах (індекс F) і неферомагнітних металах (індекс NF).



Рис. 2.8 – Товщиномір покриттів і плівок CM-8828

Таблиця 3.2.3 – Технічні характеристики товщиноміра CM-8828

Діапазон вимірювання	0-1250 мкм
Роздільна здатність	0.1 мкм (до 100.0 мкм) / 1 мкм (вище 100 мкм)
Похибка вимірювання	± 1-3% або ± 2,5 мкм
Мінімальна площа для виміру	6 мм
Мінімальна товщина основи	0,3 мм
Одиниці виміру	мкм / мілідюйм
Індикація розряду батареї	присутня
Живлення	4x 1.5В батареї AAA
Автоматичне відключення	через 3 хвилини
Умови експлуатації	0 - +45 °C, ≤ 90% RH

## 2.2.4 Товщиномір покриттів ТМ-4Т

Вихрострумний товщиномір ТМ-4Т (рис.2.9) використовується для вимірювання товстих захисних покриттів, таких як ізоляція, бітум і т.д., на будь-якому струмупровідній основі. Прилад доступний в двох модифікаціях – з вимірюванням товщини до 27 мм або до 60 мм.



Рис. 3.9 – Товщиномір ТМ-4Т

Таблиця 3.2.4 Технічні характеристики товщиноміра ТМ-4Т

Діапазон вимірюваних товщин	до 27 мм або до 60 мм (в залежності від модифікації)
Дискретність показань	1, 0.1, 0.01 задається при програмуванні шкали
Шкала	15 програмованих з клавіатури або з ПК, до 10 опорних точок для лінійної апроксимації
Режим автоматичної сигналізації недоліків	є
Режим безперервного відображення результатів	немає
Програмне забезпечення	Dlogger, ScaleM
Час роботи товщиноміра	3 елементи АА або зовнішній блок живлення
Автовідключення	не менше 30 годин
Діапазон робочих температур	через 90 сек
Розмір електронного блоку товщиноміра (В x Ш x Д)	від -10 С до +50 С
Маса товщиноміра	170 мм x 85 мм x 30 мм

Товщиномір ТМ-4Т має пам'ять на 5000 результатів з режимом вибіркового усереднення, інтерфейс RS232 для підключення до ПК і можливість програмування до 15 апроксимаційних шкал, з клавіатури приладу або ПК. У комплект товщиноміра ТМ-4Т входить диск з програмним забезпеченням: ScaleM для створення і запису апроксимаційних шкал в прилад і Dlogger для зчитування результатів виміру, їх статистичної обробки і виведення на друк.

## Висновки до 2 розділу

В даному розділі був проведений аналіз існуючих методів вимірювання товщини. Є цілий ряд методів, якими можна вимірювати товщину захисного покриття.

Також було проведено огляд різних товщиномірів з їхніми характеристиками.

Об'єктом нашого контролю є – покриття лопатки турбіни, матеріал якого є кераміка. Товщина покриття  $h$  варіюється від 0,2 до 0,8 мм. Метод вихрострумової товщинометрії, який ми беремо до уваги, використовується здебільшого для вимірювання товщини захисних неелектропровідних покриттів.

					ПК51.12.0000.000 ПЗ	Арк.
						43
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНОК ВИХРОСТРУМОВОГО ТОВЩИНОМІРА ЗАХИСНИХ ТЕРМОПОКРИТТІВ ЛОПАТОК ТУРБІН

### 3.1 Розрахунок системи ВСП-ОК

Виконуємо електричний розрахунок накладного трансформаторного вихрострумowego перетворювача.

Основними факторами, що створюють похибки при вимірюванні товщини покриттів являються: питома електрична провідність металевіи основи виробу, можлива недосконалість зовнішньої поверхні об'єкта контролю (кривизна, виступи, шорсткість), а також наявність забруднень на ній [17].

Похибка через мінливість питомої електричної провідності ОК можна істотно зменшити якщо вибрати велике значення узагальненого параметра  $\beta$ .

Відповідно до цієї вимоги значення узагальненого параметра виберемо  $\beta=16$ . Вибір діаметра обмотки збудження виберемо виходячи з наступної умови:

$$D_{\text{cp}} \leq 0.1 * D_{\text{ок}}, \quad (3.1)$$

де  $D_{\text{ок}}$  – діаметр кривизни ОК.

$$D_{\text{cp}} = 2 * 10^{-3} \text{ м.}$$

Визначимо аксіальну довжину  $L$  котушки із наступної умови:

$$0,1 \leq \frac{L}{D_{\text{cp}}} \leq 0,5, \quad (3.2)$$

Тоді

$$L = 1 * 10^{-3} \text{ м.}$$

Вибираємо діаметр проводу збуджуючої котушки  $d_1 = 0.05 * 10^{-3} \text{ м}$ , згідно умови

$$0,05 \text{ мм} \leq d_1 \leq 0,8 \text{ мм.} \quad (3.3)$$

					ПК51.12.0000.000 ПЗ	Арк.
						44
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

З технічних міркувань обираємо кількість витків збуджуючої котушки  $W_1 = 200$  витків.

Розрахуємо струм збудження  $I$  з умови відсутності значного перегріву котушки:

$$I = (0.85 \div 0.9) \cdot I_{\text{пр}}, \quad (3.4)$$

$$I_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{\lambda \cdot S_{\text{охл}} [\Theta]_{\text{д}}}{R}}, \quad (3.5)$$

де  $\lambda = (8 \div 12) \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$  – коефіцієнт теплопередачі;

$S_{\text{охл}}$  – площа поверхні охолодження котушки;

$[\Theta]_{\text{д}}$  – допустима температура перегріву;

Розраховуємо активний електричний опір котушки за формулою:

$$R = \frac{4 \cdot \rho \cdot W_1 \cdot D_{\text{ср}}}{d_1^2}, \quad (3.6)$$

де  $\rho$  – питомий електричний опір міді – матеріалу,

$$\rho = 0,0175 \text{ Ом} \frac{\text{мм}^2}{\text{м}}.$$

Розрахуємо опір котушки:

$$R = \frac{4 \cdot 0,0175 \cdot 10^{-6} \cdot 200 \cdot 2 \cdot 10^{-3}}{(0,05 \cdot 10^{-3})^2} = 11,2 \text{ Ом}.$$

Знайдемо орієнтовану площу охолодження котушки:

$$S_{\text{охл}} = 2\pi \cdot r_1^2 + 2\pi \cdot R \cdot L - 2\pi \cdot r_2^2 - 2\pi \cdot r_2 \cdot L \quad (3.7)$$

$$S_{\text{охл}} = 2\pi \cdot 4 \cdot 10^{-6} + 2\pi \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot 2\pi - 0,25 \cdot 10^{-6} - 2\pi \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} - 10^{-3} =$$

$$= 2\pi \cdot 10^{-6} (4 + 2 - 0,25 - 0,5) = 2\pi \cdot 10^{-6} \cdot 5,25 = 32,98 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2,$$

тоді максимальний струм через котушку дорівнюватиме

$$I_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{32,98 \cdot 10^{-6} \cdot 10 \cdot 10}{11,2}} = 0,017 \text{ А},$$

$$I = 0,9 \cdot 0,017 = 0,015 \text{ А}.$$

					ПК51.12.0000.000 ПЗ	Арк.
						45
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Вибираємо діаметр проводу вимірювальної котушки  $d_2 = 0.02 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ , згідно умови

$$0,02 \text{ мм} \leq d_2 \leq 0,1 \text{ мм}, \quad (3.8)$$

З технічних міркувань обираємо кількість витків вимірювальної котушки  $W_2 = 400$  витків.

Розрахуємо частоту струму збудження за наступною формулою :

$$f = \frac{\beta^2}{R^2 \cdot 2\pi \cdot \gamma \cdot \mu_0}, \quad (3.9)$$

де  $\gamma$  – питома електропровідність матеріалу;

$\mu_0$  – магнітна стала  $4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$ ;

$\beta$  – узагальнений параметр.

$$f = \frac{16^2}{(2,5 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 2\pi \cdot 3,5 \cdot 10^7 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}} = 1,482 \cdot 10^5 \text{ Гц} \approx 148 \text{ кГц}.$$

Визначимо глибину проникнення вихрових струмів за наступною формулою:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \gamma \cdot \mu_0}}, \quad (3.10)$$

тоді

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{2\pi \cdot 2,85 \cdot 10^6 \cdot 3,5 \cdot 10^7 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}}} = 2,21 \cdot 10^{-4} \text{ м} = 0,2 \text{ мм}.$$

Визначимо напругу холостого ходу за формулою:

$$U_{\text{х.х.}} = 1,35 \cdot 2\pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot W_1 \cdot W_2 (m - 0.3) \cdot I \cdot \sqrt{D_{\text{ср1}} \cdot D_{\text{ср2}}}, \quad (3.11)$$

$$m = \frac{D_{\text{ср1}}}{D_{\text{ср2}}}, \quad (3.12)$$

Із формули 3.12 отримуємо

$$m = \frac{3}{1,5} = 0,5,$$

Тоді значення холостого ходу дорівнює

					ПК51.12.0000.000 ПЗ	Арк.
						46
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



За годографом рис. 3.1 визначимо внесені напруги:

$$\operatorname{Re}(U_{\text{ВН}}^*) = 0,382, \quad \operatorname{Im}(U_{\text{ВН}}^*) = -1,515;$$

Розрахунок інших параметрів дав наступні результати:

- еквівалентний діаметр витка вихрових струмів в ОК

$$D_e = D_{\text{сп1}} + 1,5 \cdot h_1, \quad (3.14)$$

$$D_e = 0,5 + 1,5 \cdot 0,6 = 1,4 \text{ мм};$$

-відносний параметр  $\xi$  для чотирьох значень товщини покриття

$$\xi = \frac{h_1 + h_2}{D_e} = \frac{2h_1}{D_e} = \frac{2(h_3 + h)}{D_e} = \frac{2(0,6 + 0,2 \dots 0,8)}{1,4};$$

$$\xi_{1.1} = \frac{2(0,6 + 0,2)}{1,4} = 1,14;$$

$$\xi_{1.2} = \frac{2(0,6 + 0,4)}{1,4} = 1,43;$$

$$\xi_{1.3} = \frac{2(0,6 + 0,6)}{1,4} = 1,71;$$

$$\xi_{1.4} = \frac{2(0,6 + 0,8)}{1,4} = 2.$$

Тоді отримуємо наступні значення абсолютної внесеної напруги для обраних значень товщини покриття:

$$U_{\text{ВН1}} = 0,804 \cdot (0,382 - j1,515) \cdot e^{-3 \cdot 1,14} = 0,01 - j0.039 \text{ В};$$

$$U_{\text{ВН2}} = 0,804 \cdot (0,382 - j1,515) \cdot e^{-3 \cdot 1,43} = 0,0042 - j0.0170 \text{ В};$$

$$U_{\text{ВН3}} = 0,804 \cdot (0,382 - j1,515) \cdot e^{-3 \cdot 1,71} = 0,0018 - j0.0072 \text{ В};$$

$$U_{\text{ВН4}} = 0,804 \cdot (0,382 - j1,515) \cdot e^{-3 \cdot 2} = 0,0008 - j0.003 \text{ В};$$

В режимі холостого ходу (за відсутності ОК) амплітудне значення внесеної напруги ВСП визначається за формулою

$$E_0 = U_{\text{х.х.}} e^{\frac{3c}{D_1}}; \quad (3.15)$$

Для обраних конструктивних параметрів ВСП маємо

$$c = h_2 - h_1 = 0, \quad (3.16)$$

$$E_0 = j0.804 \text{ В},$$

					ПК51.12.0000.000 ПЗ	Арк.
						48
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Амплітудне значення вихідної напруги ВСП в режимі контролю та за відсутності дефекту становить

$$U_{\text{вих}} = E_0 + U_{\text{вн}} , \quad (3.17)$$

$$U_{\text{вих1}} = j0.804 + 0,01 - j0.039 = 0,01 + j0,765 \text{ В};$$

$$U_{\text{вих2}} = j0.804 + 0,0042 - j0.0170 = 0,0042 + j0,787 \text{ В};$$

$$U_{\text{вих3}} = j0.804 + 0,0018 - j0.0072 = 0,0018 + j0,796 \text{ В};$$

$$U_{\text{вих4}} = j0.804 + 0,0008 - j0.003 = 0,0008 + j0,801 \text{ В};$$

Графік залежності абсолютних значень модуля  $U_{\text{вн}}$  (мВ) від  $h$  (мм) наведено на рис.3.2.

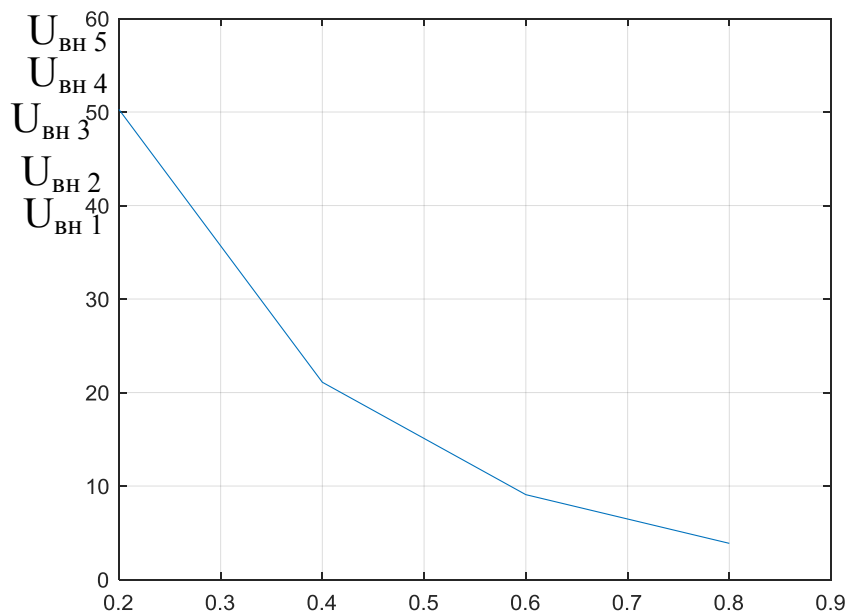


Рис. 3.2 - Графік абсолютних значень модуль  $U_{\text{вн}}$  (мВ) як функція від  $h$  (мм)

Отримані орієнтовні параметри вихідних сигналів ВСП дозволяють обґрунтувати використання амплітудного методу вимірювання та вимоги до коефіцієнту підсилення та смуги частот вимірювального каналу вихрострумове товщиноміра.

### 3.2. Розробка структурної схеми цифрового товщиноміра

Структурна схема - це схема, яка об'єднує основні функціональні частини пристрою з урахуванням їх зв'язків та призначення. Під функціональною частиною маються на увазі такі компоненти схеми: елемент, пристрій, функціональна група, функціональний зв'язок.

Структурна схема вихрострумowego товщиноміра наведена на рис.3.4. Формування сигналів збудження ВСП і опрацювання його вихідних сигналів виконує мікроконтролер МК, робота якого синхронізується генератором Г. ЦАП і підсилювач ОП виконують перетворення цифрових кодів в миттєві значення сигналу збудження ВСП. Вихідний сигнал ВСП перетворюється в цифровий код за допомогою АЦП, запам'ятовується в ОЗУ і періодично передається в МК. Останній виконує формування в цифровому коді сигналу компенсації, необхідного для виділення тільки внесеної напруги ВСП. Результати контролю відображаються на рідкокристалічному дисплеї РКД.

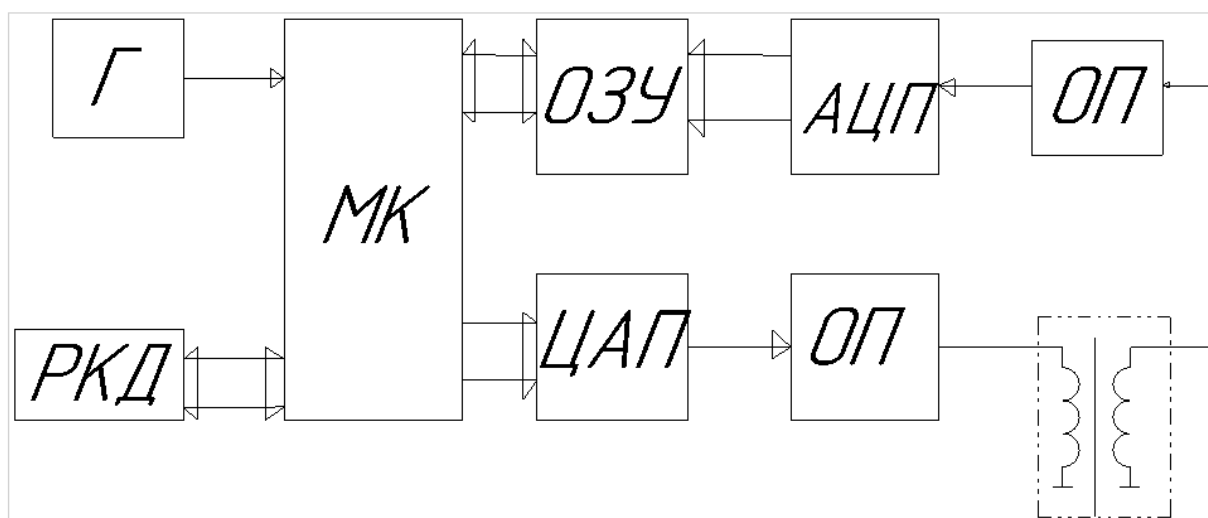


Рис. 3.4. Структурна схема вихрострумowego товщиноміра

Г – генератор;

МК – мікроконтролер;

ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач;

ОП – підсилювач;

АЦП – аналогово-цифровий перетворювач;

ОЗУ – оперативно-запам'явувачий пристрій;

РКД – рідкокристалічний дисплей.

### 3.3. Розробка електричної принципової схеми

Для побудови структурної принципової схеми було використано такі мікросхеми: AD8515, STM32F103, A56C8016, ADC12081, DS1090

#### 3.3.1 DS1090

DS1090 - це недорогий генератор, призначений для використання в якості зовнішнього годинника для джерел живлення в комутуваному режимі та інших низькочастотних додатків.

Функція згладжування або зміщення знижує випромінювання піку з джерела живлення на його основній частоті. Використані схемотехнічні особливості дозволяють використовувати DS1090 як джерело гармонічних сигналів для вихрострумове товщино міра. Поєднання заводських налаштованих і зовнішнього резистора забезпечує можливість зміни вихідних частот сигналів від 125 кГц до 8 МГц. Частота зсуву і відсоток змішування задаються за допомогою керуючих контактів.

#### 3.3.2 AD8515

Мікросхема AD8515 є підсилювачем, який може працювати від напруги одного джерела від 1,8 В. Один підсилювач AD8515, доступний у 5-контактних SOT-23 та 5-ти свинцевих корпусах SC70, досить малий, щоб розміщуватися поруч із датчиками, зменшуючи дію зовнішніх шумів.

AD8515 є вхідним і вихідним підсилювачем з смугою пропускання 5 МГц і типовою напругою зсуву 1 мВ від джерела живлення 1,8 В. Низький струм живлення робить ці частини ідеальними для роботи на батарейках.

					ПК51.12.0000.000 ПЗ	Арк.
						51
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Швидкість наростання сигналу 2,7 В/мкс. AD8515 випускається в розширеному промисловому температурному діапазоні від -40°C до + 125 °C.

### 3.3.3 ADC12081

ADC12081 є монолітним аналого-цифровим перетворювачем CMOS, здатним перетворювати аналогові вхідні сигнали в 12-бітові цифрові слова. ADC12081 використовує інноваційну архітектуру трубопроводу, щоб звести до мінімуму розмір кристала і енергоспоживання. ADC12081 використовує самокалібрування і корекцію помилок, щоб підтримувати точність і продуктивність в порівнянні з температурою.

Перетворювач ADC12081 працює від джерела напруги 5 В і може оцифровувати аналогові вхідні сигнали в діапазоні від 0 до 2 В. Всі цифрові входи/виходи мають рівні TTL логіки. ADC12081 призначений для мінімізації зовнішніх компонентів, необхідних для аналогового вхідного інтерфейсу.

ADC12081 доступний в 32-вивідному LQFP пакеті.

### 3.3.4. AS6C8016

AS6C8016-55TIN є 8,388,608-бітною статичною пам'яттю CMOS малої потужності, організованою як 524,288 слів на 16 біт. Вона виготовлена з використанням перваг (високої продуктивності та надійності) CMOS-технології. Струм споживання мікросхеми в режимі очікування стабільний в діапазоні робочих температур. AS6C8016-55TIN добре пристосована для роботи в умовах низького енергоспоживання і особливо добре підходить для використання в енергонезалежній пам'яті. AS6C8016-55TIN працює від одного джерела живлення 2.7V ~ 3.6V і всі входи і виходи повністю TTL сумісні.

					ПК51.12.0000.000 ПЗ	Арк.
						52
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

### 3.3.5 STM32F103

Сімейство STM32F103xx низької продуктивності включає високопродуктивне ядро ARM® Cortex®-M3 з 32-бітним ядром RISC та робочою частотою 72 МГц, високошвидкісну вбудовану пам'ять (до 128 Кб флеш-пам'яті і SRAM до 20 Кбайт) і широкий спектр додаткових входів/виходів та периферійних пристроїв, підключених до двох шин APB. Всі пристрої пропонують два 12-бітові АЦП, три 16-бітові загальні таймери та один ШІМ-таймер, а також стандартні та просунуті комунікаційні інтерфейси: до двох I2C і SPI, трьох USART, USB і CAN. Пристрої працюють від джерела живлення напругою від 2,0 до 3,6 В. Вони зберігають працездатність в діапазоні температур від -40 до +85 °С і від -40 до +105 °С в розширеному температурному діапазоні. Широкий набір режимів енергозбереження дозволяє конструювати малопотужні програми.

Лінійка середньої продуктивності сімейства STM32F103xx включає пристрої в шести різних конструктивних типах: від 36 до 100 контактів. Залежно від обраного пристрою до складу мікросхем включені різні периферійні пристрої. Ці особливості роблять сімейство мікроконтролерів STM32F103xx придатними для широкого спектру застосувань, таких як моторні приводи, керування корпусами, медичне та портативне обладнання, комп'ютерні та ігрові периферійні пристрої, платформи GPS, промислові застосування, ПЛК, інвертори, принтери, сканери, системи сигналізації, відеодомофони та HVAC.

#### Висновки до 3 розділу.

Графік абсолютних значень модуль  $U_{вн}$  (мВ) як функція від  $h$  (мм), зображений на (рис 3.2) дозволяє при узагальненому параметрі  $\beta=16$  відслідкувати залежність абсолютної внесеної напруги для обраних значень товщини покриття.

					ПК51.12.0000.000 ПЗ	Арк.
						53
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



## ВИСНОВКИ

За завданням дипломного проекту було розроблено товщиномір для вимірювання товщини термопокриття лопаток турбіни в діапазоні товщини ізоляційного покриття від 0,2 до 0,8 мм вихрострумовим методом з похибкою не більше 5%.

В ході виконання дипломного проекту отримали наступні результати. Як ВСП слід використовувати накладний перетворювач. Найкращим способом виділення інформації з сигналу, що надходить з ВСП, є амплітудний метод. Контроль лопатки турбіни доцільно проводити на частоті 148 кГц.

Розроблено перетворювач у вигляді накладного ВСП, який має невеликі габаритні розміри. Була розрахована інструментальна похибка створеного товщиноміра, яка задовольняє заданому значенню за завданням проектування. В дипломному проекті наведено розрахунок системи ВСП–об'єкту контролю, розробка структурної, функціональної, принципової схем та складальне креслення перетворювача.

					ПК51.12.0000.000 ПЗ	Арк.
						54
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## Список використаних джерел

1. [http://par-turbina.ucoz.net/index/lopatki\\_turbiny/0-20](http://par-turbina.ucoz.net/index/lopatki_turbiny/0-20)
2. Высокоскоростная обработка. [Электронный ресурс]. 2011. – Режим доступа к статье: <http://www.delcam-ural.ru/cam/tehpodderjka> (Дата обращения: 04.05.2011).
3. Miller, R.A “Thermal Barrier Coatings of Aircraft Engines: History and directions” Journal of Thermal Spray Technology 1997, pp 35 - 42
4. Bhagi LK, Rastogi V, Gupta P (2017). "Study of corrosive fatigue and life enhancement of low pressure steam turbine blade using friction dampers". Journal of Mechanical Science and Technology. 31: 17–27. doi:10.1007/s12206-016-1203-5.
5. Kurt H. Stern Metallurgical and Ceramic Protective Coatings, ISBN 0412544407, Chapman & Hall.
6. Самойленко В.М., Фатьянов Е.А., Зоричев А.В. Термостойкость лопаток турбины ГТД с теплозащитным покрытием // Коррозия: материалы, защита. - 2009. - № 12. - С. 1-4.
7. Самойленко В.М., Фатьянов Е.А., Настас Г.Н., Казарян С.А. Влияние диффузионных процессов на долговечность защитных покрытий // Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России. - 2010. - № 1. - С. 42-45.
8. Самойленко В.М., Фатьянов Е.А., Зоричев А.В., Настас Г.Н. Применение теплозащитного покрытия для увеличения долговечности рабочих лопаток ГТД // Проблемы безопасности полетов. - 2010. - № 2. - С. 30-34.
9. Высокотемпературные жаростойкие покрытия и жаростойкие слои для теплозащитных покрытий / [С. А. Мубояджян, С. А. Будиновский, А. М. Гаямов, П. В. Матвеев] // Авиационные материалы и технологии. – 2013. –№ 1. – С. 17–20

					ПК51.12.0000.000 ПЗ	Арк.
						55
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

10. Thomas E. Strangman Metallurgical and protective coatings thermal barrier coatings for turbine airfoils / Thomas E. Strangman // Thin solid films, 1985. – 127. – P. 93–105.
11. Срабатываемые, износостойкие и теплозащитные покрытия для деталей газового тракта турбины, компрессора и камеры сгорания ГТД / [В. А. Барвинок, И. Л. Шитарев, В. И. Богданович и др.] // Вестник СГАУ. – 2009. – № 3– 1(19). – С. 11–29
12. Каблов Е. Н. Теплозащитные покрытия для лопаток турбины высокого давления перспективных ГТД / Е. Н. Каблов, С. А. Мубояджян // Металлы, 2012.– № 1. – С. 5–13.
13. Каблов Е. Н. Защитные покрытия лопаток турбин перспективных / Е. Н. Каблов, С. А. Мубояджян // ГТГ, 2001. – №3 (12). – С. 30–32
14. de Matthew J. Donachie, Stephen James Donachie Superalloys: A Technical Guide – Pag 319 ISBN 0871707497 Technology – 2002
15. Поліщук Є.С. Методи та засоби вимірювань неелектричних величин: Підручник/ Є. С. Поліщук. – Львів: Видавництво НУ «Львівська політехніка», 2000. – 360 с.
16. Поліщук Є.С., Дорожовець М.М., Яцук В.О. та ін. Метрологія та вимірювальна техніка: Підручник / Є.С. Поліщук, М.М. Дорожовець, В.О. Яцук, В.М. Ванько, Т.Г. Бойко; За ред. проф. Є.С. Поліщука. – Львів: Видавництво «Бескид Біт», 2003. – 544 с.
17. Протасов, А. Г. Метрологія, стандартизація та сертифікація в неруйнівному контролі [Електронний ресурс] : навчальний посібник з дисциплін «Метрологія» та «Сертифікація і стандартизація» / В. Ф. Петрик, А. Г. Протасов ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 3,04 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2015. – 266 с.

					<i>ПК51.12.0000.000 ПЗ</i>	Арк.
						57
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		