

Б.М. Березюк<sup>1</sup>, І.М. Бучма<sup>1</sup>, У.Б. Марікуца<sup>2</sup>  
Національний університет "Львівська політехніка",  
<sup>1</sup>кафедра автоматики та телемеханіки  
<sup>2</sup>кафедра систем автоматизованого проектування

## ВИХРОСТРУМОВИЙ КОНТРОЛЬ ЯКОСТІ ТЕРМООБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ ГАЗОВИХ ТУРБІН

© Березюк Б.М., Бучма І.М., Марікуца У.Б., 2004

**Розглянуто результати експериментальної перевірки якості термообробки деталей газових турбін. Обґрунтовано використання змінно-частотного методу вихрових струмів для контролю структурного стану складнолегованих сталей.**

**The experimental examination of heat treatment quality of the gas turbine parts made from complex-alloyed steels was conducted. It has been shown a possibility of using the variable frequency eddy-currents structuroscope for such operation.**

Тривала експлуатація в умовах дії високих температур і внутрішніх напружень деталей гарячого тракту газотурбінних двигунів (ГТД) ставлять підвищені вимоги до структурної стабільності їх матеріалу. Дослідженнями встановлено, що втрата працездатності деяких деталей і вузлів ГТД зумовлена як відхиленням режиму їх термічної обробки (ТО) від встановлених технічних умов (ТУ) під час виготовлення, так і термічним руйнуванням матеріалу під час експлуатації двигуна. Формування високих границь тривалої і втомної міцності, текучості і повзучості, стійкості до газової корозії, жолоблення і розтріскування забезпечується спеціальним підбором режимів ТО, які включають загартовування з подальшим старінням або двоступеневий відпуск. У разі незначних відхилень від режимів ТО або втрати міцності внаслідок перегрівання під час експлуатації деталей границя міцності їх матеріалу знижується на порядок.

Неруйнівний контроль якості термообробки деталей газових турбін можливий за наявності кореляційних зв'язків між структурним станом складнолегованої сталі, з якої їх виготовляють, та її фізичними властивостями [1]. Залежність питомого електричного опору, магнітної проникності та твердості від температури відпуску для сталі ЭИ-961 наведена на рис. 1.

В авіаційній промисловості дотримання режимів ТО деталей кріплення і лопаток газових турбін перевіряють, вимірюючи твердість їх поверхні за Роквеллом. Для цього поверхню деталей після ТО обдувають піском, торці обробляють наждачним папером і виконують 2–4 (залежно від стабільності результатів) вимірювання  $HRC_E$ .

Вихрострумний контроль якості термообробки деталей газових турбін можливий за наявності кореляційних зв'язків між структурним станом їх матеріалу та його електромагнітними характеристиками. Проте складність інтерпретації результатів вимірювання і порівняно велика (3–7 %) похибка електромагнітних структуроскопів не дають змоги контролювати за їх допомогою стабільні, але незначні зміни питомого опору та магнітної проникності цих матеріалів. Неоднозначна залежність коерцитивної сили від температури загартовування та відпуску термооброблених складнолегованих сталей, з яких виготовляють деталі газових турбін, не дає змоги використовувати для їх контролю коерцитометри [2].

Подальшого підвищення точності електромагнітних структуроскопів та розв'язання задачі контролю якості термообробки виробів із складнолегованих сталей можна досягти за допомогою змінно-частотного методу вихрових струмів (ЗМВС) [3].

Як відомо [4], узагальнений вихрострумний параметр визначається співвідношенням:

$\beta = R\sqrt{\omega\sigma\mu\mu_0}$ , де  $R$  – еквівалентний радіус вихрострумowego перетворювача (ВСП);  $\omega$  – частота збудження первинного електромагнітного поля (ЕМП);  $\sigma$  – питома електрична провідність матеріалу контрольованих деталей;  $\mu$  – магнітна проникність матеріалу;  $\mu_0$  – магнітна стала.

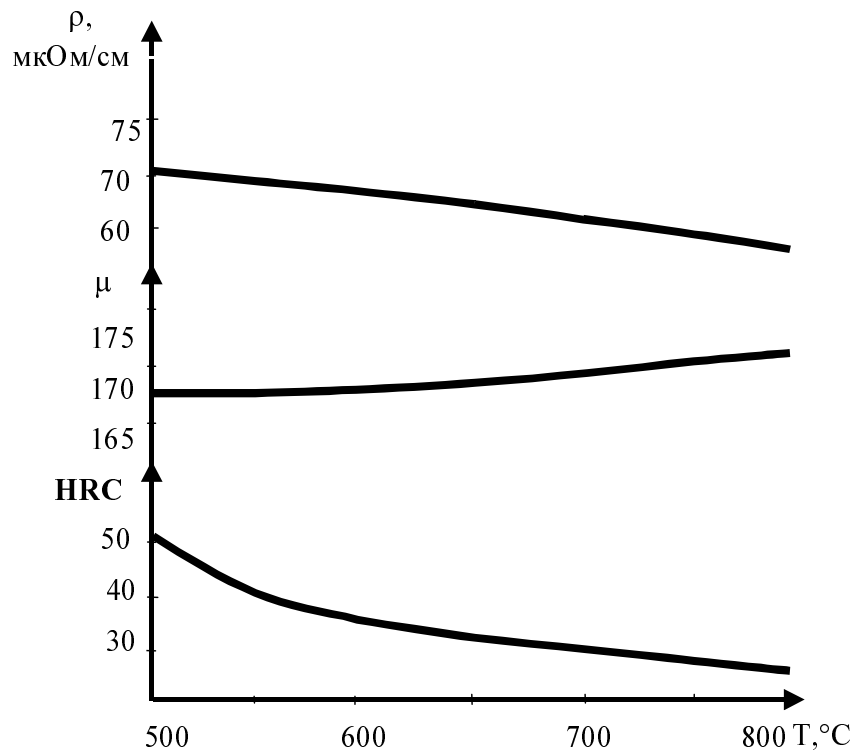


Рис. 1 Фізичні властивості сталі ЭИ-961 залежно від температури відпуску

При використанні ЗМВС зміни корельованих зі структурою матеріалу, питомої електричної провідності та магнітної проникності компенсуються відповідними змінами частоти збудження первинного електромагнітного поля. ЗМВС забезпечує оптимальне значення фази  $\varphi$  вихідного сигналу вихрострумowego перетворювача, яке однозначно пов'язане з узагальненим параметром  $\beta$ . Інформативним параметром є частота  $\omega_0$ , яка забезпечує виконання умови  $\varphi = \varphi_{зад}$ , тобто фаза внесених у ВСП параметрів дорівнює заданому значенню, що відповідає режиму високої чутливості давача. Отже, частота  $\omega_0$  збудження ЕМП буде характеризувати структурний стан, хімічний і фазовий склад, твердість та інші характеристики матеріалу виробу [5]. Крім цього, ЗМВС забезпечує постійну товщину контрольованого шару металу, що є важливим чинником при контролі термічно оброблених сталей, в яких  $\mu$  і  $\sigma$  можуть змінюватися за глибиною виробу.

Експериментальна перевірка можливості контролю твердості деталей із складнолегованих сталей (а, отже, і якості їх термообробки) за допомогою змінно-частотного методу вихрових струмів виконувалась на деталях циліндричної форми одного типорозміру. Зі сталі ЭИ-961 було виготовлено і пронумеровано 22 циліндричні деталі, які були піддані різним видам термічної обробки. Перша група із 8 деталей була термооброблена відповідно до вимог ТУ. Друга група із 9 деталей була піддана ТО з відхиленням від ТУ, а третя група з 5 деталей не була термооброблена. Було виміряно  $HRC_E$  усіх деталей і визначена середня твердість деталей кожної групи. Отримані результати наведені у таблиці.

Потім усі деталі були проконтрольовані за допомогою змінно-частотного структуроскопа. Із структуроскопом працювали спеціалісти, які не знали стану деталей. Кожну деталь контролювали тричі. Результати контролю та математичної обробки експериментальних даних відповідно до методики [6] наведені в таблиці.

**Результати контролю та математичної обробки експериментальних даних**

№ з/п	Група вибірки	№ деталі	HRC <sub>E</sub>	$\overline{\text{HRC}}_E$	Покази структуроскопа, X <sub>i</sub>	$\bar{A}$	$\sigma_{n-1}$	$\sigma_A$	$\Delta A$ при P=0,99
1	I	1	35	34,4	610, 614, 612	600,75	9,691	1,362	±3,827
2		3	35		605, 611, 606				
3		7	34		593, 597, 601				
4		9	34		598, 602, 603				
5		14	34		596, 598, 599				
6		16	34		592, 595, 593				
7		20	34		590, 594, 598				
8		22	35		600, 602, 607				
9	II	2	46	45,9	745, 747, 743	748,704	18,768	3,614	±10,11
10		4	46		750, 758, 756				
11		6	48		770, 766, 768				
12		8	48		765, 774, 768				
13		11	42		708, 712, 710				
14		15	46		743, 744, 752				
15		17	44		735, 728, 722				
16		18	46		760, 762, 765				
17	9	47	758, 750, 756						
18	III	5	35	34,6	600, 597, 599	583,867	15,93	4,116	±12,25
19		10	35		594, 600, 597				
20		12	34		554, 557, 561				
21		13	35		588, 587, 591				
22		21	34		574, 578, 581				

У таблиці використано такі позначення: X<sub>i</sub> – покази структуроскопа при i-му вимірюванні;

$$A = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \text{ – середнє вибіркє показання структуроскопа; } \sigma_{n-1} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - A)^2} \text{ –}$$

вибірковє середньоквадратичнє відхилення;  $\sigma_A = \frac{\sigma_{n-1}}{\sqrt{n}}$  – похибка вимірювання;  $\Delta A = t_{кр} \sigma_A$  –

довірчий інтервал при ймовірності P і кількості незалежних вимірів  $n > 30$  для нормального закону розподілу випадкової величини;  $t_{кр}$  – критичнє значення коефіцієнта Стюдєнта.

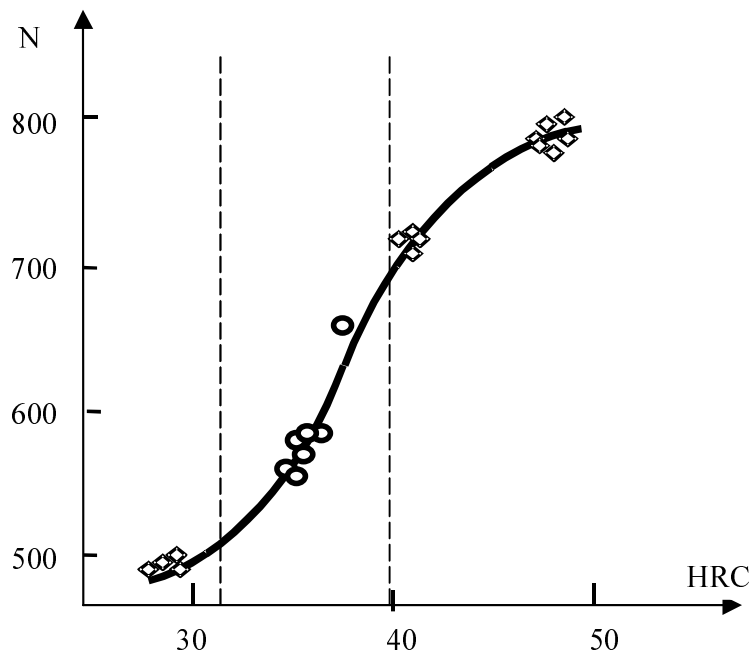


Рис. 2. Залежність показів структуроскопа після термообробки : ◊ – згідно з ТУ; ○ – з відхиленням від ТУ

Коректність виборок, тобто відсутність грубих помилок у вимірюваннях перевіряли з використанням розподілу Стьюдента з коефіцієнтом  $t$  :

$$t = \frac{(X_i - A)_{\max}}{\sigma_{n-1}} < t_{кр} \quad (1).$$

Значення  $t_{кр}$  знаходили з таблиці критичних значень коефіцієнта Стьюдента [6], якщо задані  $n$  і  $P$ . Були отримані такі дані.

1. Для деталей, термооброблених відповідно до ТУ (група I):

$$t = 1,98; \quad t_{кр} = 2,81(n = 24, P = 0,99).$$

2. Для деталей, термооброблених з порушенням ТУ (група II):

$$t = 2,168; \quad t_{кр} = 2,77(n = 27, P = 0,99).$$

3. Для деталей, які не піддавалися ТО (група III):

$$t = 1,87; \quad t_{кр} = 2,977(n = 15, P = 0,99).$$

Оскільки для всіх трьох груп виконується умова (1), то вимірювання коректні.

Отримана залежність показів структуроскопа від твердості деталей показана на рис. 2. З таблиці і рис. 2 видно, що непридатні деталі від придатних не відрізняє ні метод вимірювань  $HRC_E$ , ні вихрострумний структуроскоп. Для термооброблених деталей з ймовірністю 0,99 маємо такі поля значень  $A_i$  :

– придатних за  $HRC_E$  :  $A_i = A \pm \Delta A = 600,75 \pm 3,827$  ;

– непридатних за  $HRC_E$  :  $A_i = 748,704 \pm 10,11$  .

Оскільки поля значень  $A_i$  для придатних і непридатних деталей з ймовірністю 0,99 не перекриваються, то можна стверджувати, що за допомогою змінно-частотного вихрострумного методу можна відрізнити придатні деталі від непридатних.

Чутливість методу було оцінено за коефіцієнтом  $K_\alpha$  :

$$K_\alpha = \frac{A_{не} - A_{пр}}{(HRC_E)_{не} - (HRC_E)_{пр}} = 12,86,$$

де  $A_{не}, A_{пр}$  – середнє вибіркоче показання структуроскопа при контролі, відповідно, непридатних і придатних деталей;  $(HRC_E)_{не}, (HRC_E)_{пр}$  – середнє вибіркоче значення твердості, відповідно, непридатних і придатних деталей.

Звідси зрозуміло, що зміна показів структуроскопа становить 12,86 одиниці при зміні твердості на одиницю за межі допустимого діапазону.

Отже, змінно-частотний метод вихрових струмів дає змогу з високою достовірністю контролювати якість термообробки та структурний стан деталей газових турбін, виготовлених із складнолегованих сталей.

*1. Взаимосвязь между магнитными, электрическими свойствами и структурным состоянием термически обработанных сталей – основа определения прочностных характеристик изделий неразрушающими методами / Под. ред. Э.С. Горкунова – Свердловск 1985. 2. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий / Под ред. В.Б.Клюева. Кн.2. – М., 1986. 3. Березюк Б.М. Прилади для контролю якості термообробки складнолегованих сталей: Фізичні методи контролю*

середовищ, матеріалів та виробів // Збірник наукових праць. К. 1999. С. 111–112. 4. Дорофеев А.Л., Еришов Р.Е. Физические основы электромагнитной структуроскопии. – Новосибирск, 1985. 5. Березюк Б., Марікуца У. Розв'язок оберненої задачі багатопараметричного контролю ферромагнітних виробів змінно-частотним методом вихрових струмів // Вісник Східноукраїнського національного університету, № 8(66), 2003. С. 20–25. 6. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов / К. Хартман, Э. Лецкий, В. Шефер и др. – М., 1977.

**М.І. Грибок, М.Й. Гнатишин**

Національний університет „Львівська політехніка”,  
кафедра інформаційно-вимірвальних технологій

## **ВИМІРЮВАННЯ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ ВТРАТ ТА ДІЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРОНИКНОСТІ МЕТОДОМ ЗМІЩЕННЯ СИСТЕМ КООРДИНАТ**

© Грибок М.І., Гнатишин М.Й., 2004

**Досліджена можливість вимірювання діелектричних втрат та діелектричної проникності електроізоляційних матеріалів нафтового або рослинного походження методом зміщення системи координат за провідністю. Наведено схеми вимірювання та результати дослідження похибок вимірювання.**

**The dielectric loss and permeability of electric isolation materials of the oil and plant genesis by the axis on replacement method are investigated. There are skien the measurement schemes and measurement data processing errors in this paper.**

**1. Вступ.** Згідно з вимогами [1] до вимірювання діелектричних втрат та діелектричної проникності електроізоляційних матеріалів нафтового або рослинного походження вимірвальний експеримент потрібно виконувати на промисловій частоті 50 Гц при напругах до 1000 В. Схемою заміщення об'єкта досліджень є паралельна *RC*-схема. Технічних засобів для вимірювання *RC*-параметрів з подальшим обчисленням діелектричних втрат та діелектричної проникності у вказаних вище умовах промисловістю не випускає. Методи зрівноваження (компенсаційні або мостові) [3] працюють за низьких напругах і на фіксованих частотах, як правило, 1 кГц. Аналогічний недолік притаманний засобам [4], в яких реалізовано метод фазочутливого детектування. Тому для вирішення цієї проблеми розробляють спеціальні високовольтні мостові схеми як за рубежом [5, 6], так і в Україні [2]. Складність технічної реалізації і робота у вузькому діапазоні частот обмежують їх використання. Широке впровадження засобів обчислювальної техніки і використання алгоритмічних методів вимірювань [10] становили нові можливості для визначення параметрів векторних величин [7, 8, 9] за допомогою зміщення системи координат. Синтезу схем вимірювання параметрів конденсатора з подальшою оцінкою діелектричних втрат та діелектричною проникністю стосується ця робота.

**2. Схеми вимірювання та основні математичні співвідношення.** Схема (рис. 1) містить джерело синусоїдної напруги ДСН, комутатор К, блок управління БУ, аналогово-цифровий перетворювач АЦП діючого значення напруги, перемикач SW, обчислювальний пристрій ОП та цифровий частотомір ЦЧ. Суть методу зміщення системи координат за провідністю [8] така. У першому циклі перетворення визначають модуль досліджуваної провідності через відношення

$$i = \frac{U_{12}}{R_0},$$