

ВИЯВЛЕННЯ ВТОМНИХ ТРІЩИН У ЗОНІ ГАЛТЕЛЬНИХ ПЕРЕХОДІВ СТАЛЕВИХ ЛОПАТОК ПРОМИСЛОВИХ ГАЗОВИХ ТУРБІН ВИХРОСТРУМОВИМ МЕТОДОМ

В.М. Учанін¹, Д. Нардоні², П. Нардоні²

¹Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України. 79060, м. Львів, вул. Наукова 5. E-mail: vuchanin@gmail.com

²I&T Nardoni Institute. Фольцано, Брешия, Італія. E-mail: nardoni.campus@gmail.com

Розглянуто результати експериментальних досліджень, метою яких є створення ефективної технології вихрострумової дефектоскопії критичної зони галтельних переходів лопаток газових турбін із феромагнітних сталей. Запропоновану технологію контролю реалізовано з використанням селективних вихрострумових перетворювачів (ВСП) подвійного диференціювання, які забезпечують високу чутливість під час контролю за умови зміни зазору між робочою поверхнею ВСП і поверхнею лопатки в галтельній зоні. Проведені дослідження сигналів ВСП типу МДФ 0501 (діаметр робочої поверхні – 5 мм) дозволили мінімізувати вплив завад вибором оптимальної робочої частоти та обрати оптимальну траєкторію сканування контрольованої зони. Ефективність запропонованої технології контролю підтверджено на реальній лопатці газової турбіни зі штучним дефектом завдовжки 2 мм і завглибшки 0,2 мм, що характеризує заданий технічним завданням поріг чутливості. Технологію контролю також успішно використано під час її випробувань на підприємствах енергетичної галузі. Бібліогр. 20, рис. 9.

Ключові слова: лопатка газової турбіни, галтельний перехід, вихрострумовий перетворювач, робоча частота

Вступ. Газовою турбіною називають лопатково-машину, у якій потенційна енергія стиснутого та/або нагрітого газу перетворюється у механічну роботу на валу. Її основними елементами є ротор із закріпленими на дисках робочими лопатками та статор. Конструкція лопатки складається з пера, бандажної полки та хвостовика. Пери лопатки являє собою металеву профільовану лопать, що безпосередньо контактує з робочим газом. Полкою називають кінцеву ділянку пера, призначену для зниження вібрації та захисту ободу диска від дії розігрітого газу. Хвостовик слугує для кріплення лопатки в пазу диска. Лопатки є найвідповідальнішими деталями турбін, що працюють за умов циклічних і термічних навантажень у поєднанні з процесами корозії та ерозії під дією розігрітого робочого газу. Газові турбіни та їх елементи є предметом постійного вдосконалення [1, 2]. Найжорсткіші вимоги щодо якості, надійності та довговічності пред'являють до лопаток газових турбін, тому що багато серйозних інцидентів під час експлуатації газових турбін пов'язано з їх руйнуванням. Особливу увагу через критичну концентрацію напружень дослідники приділяють зоні галтельних переходів, де має місце близьке до прямокутного спряження профільного пера з поверхнею полки лопатки (рис. 1) [3]. Фрактографічні дослідження показали, що основною причиною руйнування лопатки газової турбіни є багатоциклова втома [4, 5]. Первинна тріщина

на може виникнути через великі включення іншої фази [3] або корозійні явища [5, 6]. Руйнування та відрив фрагментів роторної лопатки під час роботи може бути причиною серйознішої аварії через значні пошкодження інших вузлів турбіни. Велике значення має також економічний аспект, пов'язаний з високою вартістю виготовлення лопаткового вузла, яка може досягати 35 % вартості турбіни в цілому.

Гарантією безпечної експлуатації газових турбін є своєчасне виявлення експлуатаційних дефектів засобами неруйнівного контролю (НК). Тому розробка ефективних методів НК лопаток газових турбін є актуальною задачею сучасної техніки.

Стан проблеми. Періодичний НК лопаток та інших вузлів газових турбін у процесі експлуатації є важливим для безпечної експлуатації за рахунок своєчасного виявлення дефектів до повного руйнування конструкції. НК необхідно проводити швидко та ефективно, щоб звести до мінімуму час простою турбіни. Існує багато методів НК, які можна застосувати для перевірки компонент газів турбін [6–8]. Метод проникаючих рідин (кольоровий метод) з використанням барвника є недорогим та простим у виконанні технологією НК, яка часто використовується для НК компонентів газових турбін. Недоліками методу є високі вимоги до якості очищення поверхні та обмеження під час НК кородованих поверхонь. Іншим обмеженням даного методу є його придатність для ви-

явлення лише відкритих тріщин. Тому цей метод неможливо використовувати для НК лопаток із захисними покриттями. Магнітопорошковий метод дозволяє виявляти тріщини у лопатках із феромагнітних сталей і є відносно низьковитратним. Але він має ті ж обмеження, що й метод проникаючих рідин. Ультразвуковий метод може бути використаний для НК лопаток [8]. Але й тут є недоліки, пов'язані з необхідністю використання контактних рідин, що суттєво ускладнює НК у реальних виробничих умовах енергетики.

Враховуючи вищесказане, з нашої точки зору найпридатнішим методом НК лопаток газових турбін в умовах експлуатації є вихрострумний метод НК [9–12]. Але й під час спроб застосувати вихрострумний НК лопаток виникають виклики, пов'язані, зокрема, зі: 1) складною формою лопатки; 2) наявністю зазорів між ВСП під час контролю увігнутих зон; 3) підвищеним рівнем завад, характерних для вихрострумного НК виробів із феромагнітних сталей через магнітну неоднорідність матеріалу.

Найважливіше під час розробки технології вихрострумного НК лопаток – враховувати складну форму лопатки (рис. 1) з вигнутими опуклими та увігнутими поверхнями, крайовими і галтельними зонами, які, зазвичай, виділяють в окремі зони контролю, дефектоскопію яких проводять після відповідного налаштування з урахуванням особливостей цієї зони.

Вихрострумний НК зон з великим радіусом кривизни на віддалі від краю не викликає великого занепокоєння та вимагає тільки виготовлення



Рис. 1. Типова лопатка компресора газової турбіни з електроерозійним прорізом завдовжки 4 мм, завглибшки 0,2 мм і розкриттям 0,1 мм у зоні галтельного переходу для налаштування та перевірки технології контролю

спеціальних насадок для орієнтації ВСП перпендикулярно контрольованій поверхні. Проблему вихрострумного НК крайових зон також можна вирішити шляхом використання відповідних насадок, які дозволяють сканування крайової зони на постійній відстані від краю лопатки. Під час розробки методики контролю лопаток крайову зону необхідно виділити в окрему зону, для контролю якої необхідно провести балансування ВСП, встановлюючи його на певній відстані від краю з відповідним налаштуванням вихрострумного дефектоскопа (ВД). Суттєві проблеми виникають під час контролю галтельних переходів між полкою та пером лопатки, де під час експлуатації найчастіше утворюються втомні тріщини, які орієнтовані переважно вздовж галтельного переходу. Ці обставини є причинами розроблення спеціальних технологій вихрострумного контролю, які побудовані на використанні ВСП складної форми, робоча поверхня яких відтворює профіль контрольованої поверхні в зоні галтелі [13]. Такий підхід обмежує можливість контролю ділянок об'єкта контролю (ОК) з різним радіусом кривизни поверхні. Універсальнішими є ВСП на гнучкій підкладці з широкою зоною контролю, але вони не відповідають вимогам щодо чутливості до дефектів. Для зменшення рівня характерних для феромагнітних сталей завад під час виявлення тріщин під покриттям перспективним вважають імпульсний метод ВК [14–16]. Підсумовуючи, зазначимо, що цей підхід виключає можливість використання широко розповсюджених ВД з гармонічним струмом збудження, а серійні ВД з імпульсним збудженням на ринку засобів вихрострумного НК поки що відсутні.

Як зазначалось вище, достовірному виявленню тріщин в ОК із феромагнітних сталей вихрострумним методом часто заважають завади, що виникають через магнітну та структурну неоднорідність досліджуваного матеріалу [12, 17, 18]. Тому в багатьох застарілих документах і публікаціях вихрострумний метод НК взагалі визначався як непридатний або малонадійний для виявлення дефектів у феромагнітних сталях. Зазначимо декілька підходів зменшення впливу згаданих специфічних завад. Перший полягає в додатковому підмагнічуванні досліджуваної ділянки ОК. Такий підхід часто дає позитивний результат, особливо при введенні в конструкцію ВСП спеціальних екранів (наприклад, Учанін В.М. Вихрострумний накладний перетворювач для контролю феромагнітних матеріалів. Патент України № 99379). Але додаткові екрани збільшують розмір ВСП, що не завжди доречно. Крім того, додаткове підмагнічування обмежує чутливість ВСП через намагнічування феритового осердя. Інший підхід можна реалізувати шляхом створення селективних ВСП, які мають невисокий рівень завад, пов'язаних з магнітною неоднорідністю матеріалу ОК. Наш досвід

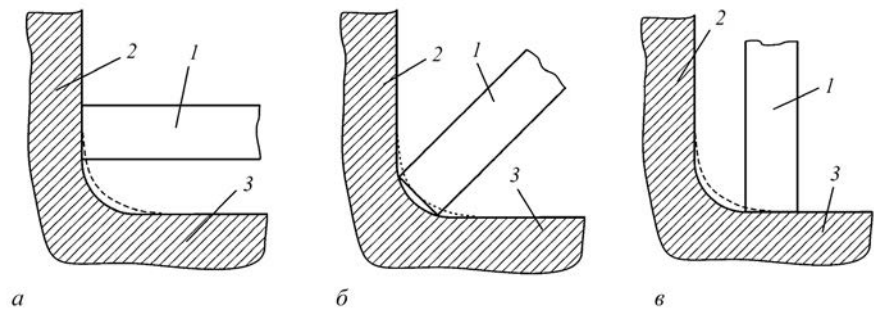


Рис. 2. Розташування ВСП у крайньому положенні на пері лопатки (а), у зоні максимальної кривизни галтельного переходу (б) та у крайньому положенні на полці лопатки (в): 1 – ВСП; 2 – перо лопатки; 3 – полка лопатки

показує, що багато складних задач вихрострумової дефектоскопії ОК із феромагнітної сталі можна вирішити шляхом використання ВСП подвійного диференціювання [17–20], які складаються із розташованих по кутах квадрату двох генераторних і двох вимірювальних обмоток. Усі обмотки намотують на однакових циліндричних феритових осердях. При цьому обидві генераторні обмотки з'єднують послідовно та орієнтують для створення однакових і протилежних первинних електромагнітних полів. Така конструкція ВСП дозволяє розмішувати обмотки в металевий циліндричний корпус (зазвичай, із алюмінієвого сплаву), що суттєво зменшує рівень електронних завад. Під час монтажу обмоток проводять їх ретельне балансування, орієнтуючись на мінімальний рівень завад, які утворюються під час збільшення відстані ВСП до металевого зразка у вигляді плоскої пластини. Під час встановлення обмоток у металевий корпус необхідно забезпечити рівну відстань обмоток до внутрішньої стінки, щоб не порушити отриманий під час налаштування ВСП баланс.

Дослідження сигналів ВСП та оптимізація режимів контролю галтельних переходів лопаток. Під час поперечного сканування галтельної зони лопатки при використанні ВСП циліндричної форми з плоскою робочою поверхнею мають місце зміни відстані ВСП від поверхні ОК, як це схематично показано на рис. 2. Тому під час вибору ВСП перевагу слід надавати ВСП меншого діаметру, які краще прилягають до поверхні галтелі. Попередні дослідження показали, що для контролю галтельних зон лопатки найкраще підходить ВСП типу МДФ 0501 із зовнішнім робочим діаметром 5 мм (рис. 3). У нашому випадку такий невеликий розмір ВСП дозволяє сканувати зону галтельних переходів лопатки, не створюючи зазорів більше 0,5 мм.

Сигнали ВСП типу МДФ 0501 досліджували за допомогою стандартного зразка (СЗ) типу СОП 2353.08 (виробник – НВФ «Промприлад», Київ) із феромагнітної сталі 45 з електроерозійними дефектами типу тріщини різної глибини. Для наших досліджень використовували тільки дефекти завглибшки 0,2 і 0,5 мм. Ширина (розкриття) штучних дефектів – близько 0,1 мм. Дослідження

чутливості та реєстрацію сигналів ВСП проводили за допомогою вихрострумової плати типу EDDYMAX фірми «Test Maschinen Technik», Німеччина. Сканування дефектної зони СЗ проводили за оптимальної орієнтації ВСП, коли лінія, що з'єднує центри обмоток збудження, орієнтована під кутом 45° відносно напрямку тріщини [20]. Сигнал від тріщини має «квазіабсолютний» характер, коли максимальна амплітуда відповідає положенню ВСП безпосередньо над тріщиною подібно до сигналу ВСП абсолютного типу [20]. Для вибору оптимальної орієнтації на корпус ВСП нанесено спеціальну позначку (рис. 3).

Практичною метою експериментальних досліджень є вибір оптимальної частоти, яка забезпечить найкращі умови виявлення дефектів у вигнутій зоні галтельного переходу лопатки. Комплексна концепція такої оптимізації передбачає вибір робочої частоти f_{op} , за якої можна досягти не тільки достатньо високого рівня амплітуди сигналу від дефекту U_D , а й найкращого співвідношення R_{DL} амплітуди сигналу від дефекту до амплітуди сигналу від завади, якою в нашому випадку є амплітуда сигналу U_L , обумовленого зміною зазору між робочою поверхнею ВСП і поверхнею ОК під час сканування. Крім того, додаткову можливість для



Рис. 3. Дослідницький макет ВСП типу МДФ 0501

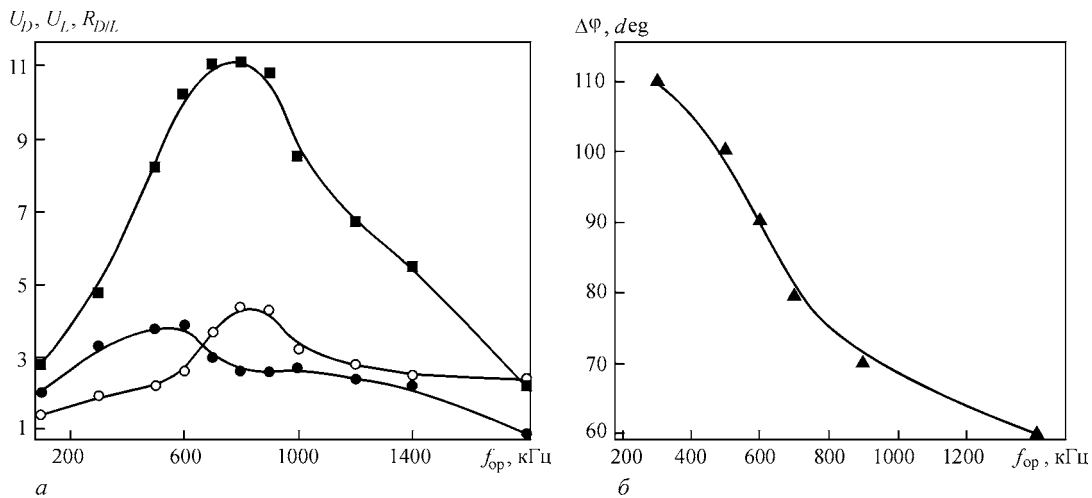


Рис. 4. Залежності амплітуди сигналу від дефекту U_D (■), зміни зазору U_L (●) та співвідношення R_{DL} (○) амплітуди сигналу від дефекту до амплітуди сигналу від зміни зазору від робочої частоти f_{op} (а), а також залежність різниці $\Delta\phi$ (▲) фазових кутів сигналу від дефекту і зміни зазору від робочої частоти f_{op} (б)

розділення корисних сигналів від дефектів і зміни зазору шляхом використання комплексної площини маємо за різних напрямків (різних кутів) сигналів від дефекту та сигналів зміни зазору. Найкращі умови для виділення сигналів від дефектів на фоні сигналів від завад загалом виконуються, коли ми маємо прямий кут ($\Delta\phi = 90^\circ$) між ними. Але з практичного досвіду менша різниця напрямків (але більша 60°) також може бути ефективно використана, бо в цьому випадку кут може бути збільшено вибором різної чутливості по ортогональних каналах ВД. Фактор напрямку сигналів у комплексній площині іноді дозволяє приймати компромісні рішення та мати вирішальне значення щодо вибору оптимальної робочої частоти в складних ситуаціях, коли амплітуди сигналів від дефектів і завад є близькими.

На рис. 4, а наведено залежності амплітуди сигналу від дефекту U_D , амплітуди сигналу від зміни зазору U_L та співвідношення R_{DL} амплітуди сигналу від дефекту до амплітуди сигналу від зміни зазору від робочої частоти f_{op} у діапазоні 100...1800 кГц. Сигнали від дефекту отримано скануванням зразка в зоні штучного дефекту завглибшки 0,2 мм, що відповідає мінімальному розміру тріщини, яку необхідно виявляти в лопатках відповідно до технічних вимог. Амплітуду сигналу, обумовлену зміною зазору, оцінювали відведенням ВСП від поверхні СЗ на відстань, суттєво більшу за 10 мм. Амплітуди сигналів від дефекту та зазору наведено в умовних величинах за поділками шкали дисплея вихрострумової системи, тому що співвідношення поділок і фізичних одиниць амплітуди сигналу невідоме через відсутність відповідного калібрування.

На рис. 4, б наведено залежність різниці фазових кутів сигналів від дефекту та зміни зазору $\Delta\phi$, які з достатньою для практики точністю оцінювали за напрямком годографів сигналів у комплексній площині ВД.

Зазначимо, що амплітуда сигналів від дефектів є достатньо високою для їх виявлення в усьому діапазоні досліджуваних частот (100...1800 кГц). Найбільші амплітуди сигналів від дефекту завглибшки 0,2 мм спостерігаються на робочих частотах 600...800 кГц (рис. 4, а), які можна вважати оптимальними за цим критерієм. Але найкраще співвідношення сигналу від дефекту до сигналу від завад спостерігається на робочій частоті 800 кГц. Аналіз зміни різниці фазових кутів $\Delta\phi$ сигналів (рис. 3, б) показує, що за цим критерієм оптимальною є робоча частота 600 кГц, за якої кут між корисним сигналом від дефекту та сигналом зміни зазору близький до прямого (90°). Враховуючи проаналізовані вище результати, робоча частота 700 кГц визначена як оптимальна. У подальшому сигнали від дефектів реєстрували на цій робочій частоті.

Для аналізу чутливості ВСП за різної відстані ВСП від поверхні ОК реєстрацію сигналів ВСП від дефектів завглибшки 0,2 і 0,5 мм проводили за безпосереднього контакту ВСП з поверхнею ОК і за відстані 0,5 мм, яка забезпечувалась діелектричною пластиною відповідної товщини.

На рис. 5 наведено сигнали, обумовлені дефектами завглибшки 0,2 і 0,5 мм, у комплексній площині ВД на робочій частоті 700 МГц, які отримано за нульової відстані ВСП від поверхні СЗ (а) і через діелектричну пластину завтовшки 0,5 мм (б). На рис. 5, б чутливість реєстрації сигналів під час сканування через діелектричну пластину збільшено на 12 дБ для компенсації суттєвого зменшення амплітуди.

Наведені на рис. 5 сигнали показують можливість виявлення дефекту, що характеризує поріг чутливості по глибині (0,2 мм) з достатньо високим співвідношенням сигнал/завада навіть під час контролю через діелектричну пластину завтовшки 0,5 мм. Зазначимо, що для ВСП, віддаленого від поверхні ОК на відстань 0,5 мм (без діелектричної пластини), результати будуть ідентичними. Вид-

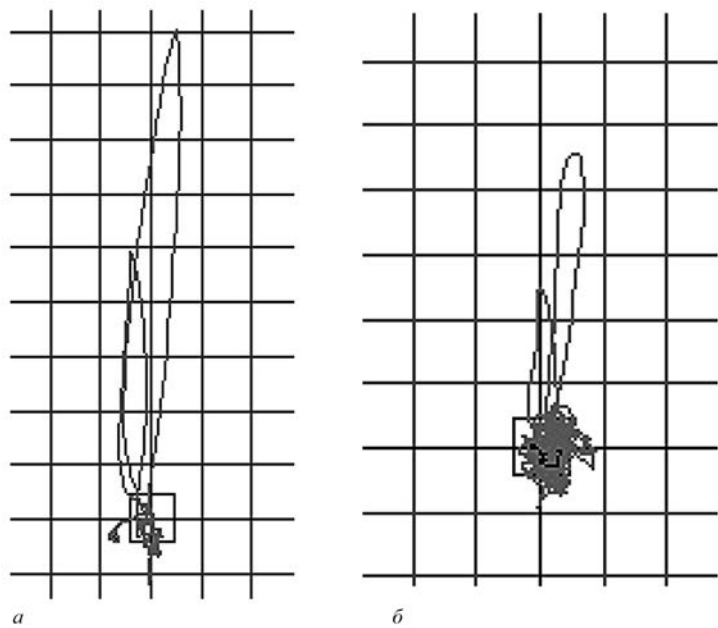


Рис. 5. Сигнали, обумовлені дефектами завглибшки 0,5 мм і 0,2 мм, за безпосереднього контакту ВСП з поверхнею зразка (а) та з зазором 0,5 мм у комплексній площині (б)

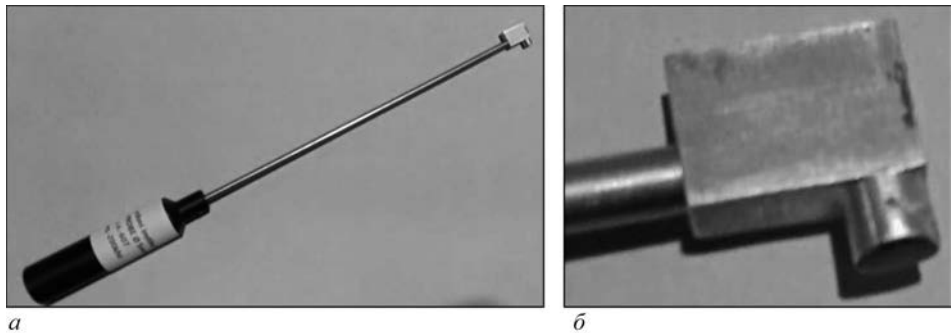


Рис. 6. Вихрострумний перетворювач типу МДФ 0501 із винесеним чутливим елементом: загальний вигляд (а), чутливий елемент ВСП (б)

но, що амплітуда сигналу від дефекту завглибшки 0,5 приблизно на 80 % більша за амплітуду сигналу, створеного дефектом завглибшки 0,2 мм,

як для випадку безпосереднього контакту ВСП з поверхнею СЗ, так і для контролю через діелектричну пластину завтовшки 0,5 мм. Крім того, на екрані ВД можна спостерігати електронний шум, який на підвищеній чутливості (рис. 5, б) є, відповідно, більшим приблизно на 12 дБ. На рис. 5, а спостерігається сигнал від зміни зазору у вигляді маленького «хвостика», який відходить вліво від нульової точки, що відповідає компенсації небалансу ВСП під час встановлення його на бездефектну частину СЗ. На рис. 5, б сигнал від зміни зазору вже не спостерігається, тому що ВСП вже віддалено на 0,5 мм від поверхні СЗ і чутливість до змін зазору є суттєво меншою.

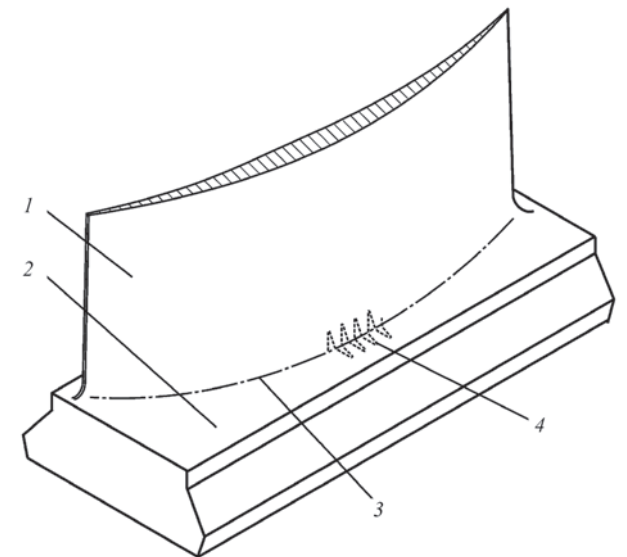


Рис. 7. Зигзагоподібна траєкторія сканування зони галтельного переходу: 1 – перо лопатки; 2 – полка лопатки; 3 – лінія спряження галтелі; 4 – траєкторія сканування

Випробування запропонованої технології вихрострумової дефектоскопії галтельних зон лопаток турбін в умовах експлуатації. Для контролю лопаток газової турбіни без їх демонтажу (під час інспекційної зупинки турбіни) виготовлено спеціальний ВСП, чутливий елемент якого за допомогою тонкої трубки із аустенітної сталі діаметром 3,5 мм винесено на відстань 20 мм від

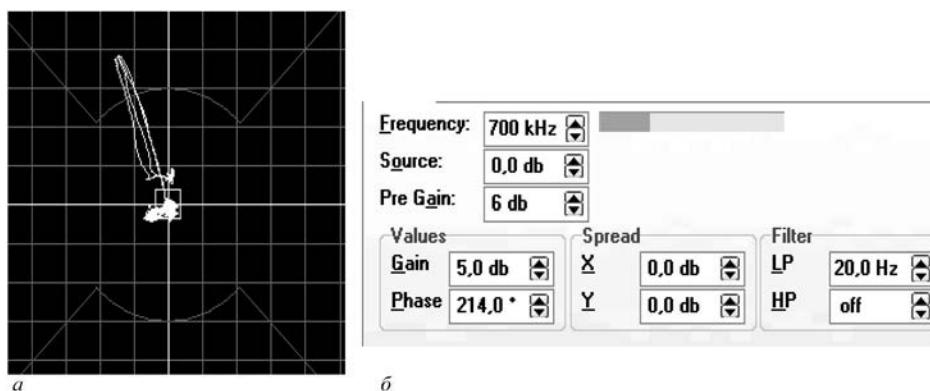


Рис. 8. Сигнали від короткого дефекту типу прорізу (див. рис. 1) у реальній лопатці (а) та відображення параметрів контролю на дисплеї (б)



Рис. 9. Виробничі випробування запропонованої технології вихрострумового контролю лопаток газових турбін

рукояті, якою оперує дефектоскопіст. При цьому чутливий елемент орієнтовано перпендикулярно відносно осі рукояті (рис. 6).

На рис. 7 схематично показано фрагмент лопатки із зигзагоподібною траєкторією ручного сканування 4 зони галтельного переходу між пером 1 і полкою 2 лопатки. На практиці це виконується повертаннями ВСП навколо осі рукояті з поступовим просуванням його вздовж галтелі. Крок між лініями сканування приблизно 0,5 мм, що забезпечує надійне виявлення дефектів завдовжки більше 2 мм. Під час сканування оператор-дефектоскопіст повинен підтримувати перпендикулярне положення чутливого елемента ВСП відносно опуклої поверхні галтелі. Ця операція вимагає певного досвіду. Тому оператор-дефектоскопіст попередньо відпрацьовує її на реальній лопатці зі штучним дефектом (рис. 1).

Наведений на рис. 6 ВСП типу МДФ 0501 із видовженою трубкою випробувано на лопатці компресора газової турбіни з електроерозійним прорізом завдовжки 4 мм, завглибшки 0,2 мм і розкриттям 0,1 мм у зоні галтельного переходу, яка призначена для налаштування обладнання та перевірки технології контролю. Отримані результати наведено на рис. 8, де зображено дисплей ВД у режимі відтворення комплексної площини сигналів. На дефектограмі видно два близьких за амплітудою сигнали від дефекту, бо ВСП перетинав зону дефекту двічі. Це дало можливість високо оцінити повторюваність під час отримання сигналів від дефектів. Сигнали від дефекту орієнтовано та чітко попадають у секторну рамку автоматичної сигна-

лізації. Сигнали, обумовлені змінами зазору, під час зигзагоподібного сканування зони галтелі на відстані від дефекту, по-перше, є суттєво меншими відносно сигналу від дефекту, а, по-друге, орієнтовані вліво від початкової точки (точка балансування ВСП), тобто відрізняються за напрямком.

Випробування показали, що ВСП типу МДФ 0501 за вибраних оптимальних параметрів контролю характеризується високою чутливістю та селективністю контролю навіть за умов ручного сканування. Встановлені параметри щодо чутливості ВД використовують тільки незначну частину можливостей щодо підсилення сигналів ВСП (рис. 8, б).

Розроблену технологію вихрострумової дефектоскопії лопаток успішно випробувано також в експлуатаційних умовах на газових турбінах фірми «Nuovo Pignone SPA» (Флоренція, Італія), яка є регіональним представником американської багатонаціональної корпорації «General Electric» (<https://ge-nuovopignone.com>) (рис. 9).

Висновки

Розглянуто результати експериментальних досліджень, метою яких є створення ефективної технології вихрострумової дефектоскопії критичної зони галтельних переходів лопаток газових турбін із феромагнітних сталей. Запропоновану технологію контролю реалізовано шляхом використання селективних ВСП подвійного диференціювання, які забезпечують високу чутливість під час контролю за умов зміни зазору між робочою поверхнею ВСП і поверхнею лопатки в галтельній зоні. Запропоновано комплексний підхід щодо оптимального

вибору робочої частоти. Проведені дослідження сигналів ВСП типу МДФ 0501 (діаметр робочої поверхні – 5 мм) дозволили мінімізувати вплив завад вибором робочої частоти та вибрати параметри сканування контрольованої зони, що підтверджено на реальній лопатці зі штучним дефектом завдовжки 2 мм і завглибшки 0,2 мм, який характеризує заданий технічним завданням поріг чутливості. Ефективність запропонованої технології підтверджено під час її випробувань на підприємствах енергетичної галузі, зокрема на газових турбінах фірми «Nuovo Pignone SPA» (Флоренція, Італія).

Список літератури/ References

- Benini, E. (Ed) (2011) *Advances in gas turbine technology*. InTech, Rijeka, Croatia. www.intechopen.com.
- Mane, S. (2023) Advancements in gas turbine engine technology: A conceptual aspect. *Inter. J. of Enhanced Research in Science, Technology & Engineering*, 12(7), 37–41. DOI: <https://doi.org/10.55948/IJERSTE.2023.0706>
- Субботович В.П., Юдин Ю.А., Юдин А.Ю., Бояршинов А.Ю. (2013) Исследование прикорневой зоны рабочей лопатки турбины. *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. Харків, НТУ «ХПІ»*, 13(987), 34–37.
Subbotovich, V.P., Yudin, Yu.A., Yudin A.Yu., Boyarchinov, A.Yu. (2013) Examination of near-root zone of turbine blade. *Visnyk KhPI, Series Power and Heat Engineering Processes and Equipment*, 13(987), 34–37 [in Russian].
- Sameezadeh, M., Farhangi, H. (2012) *Fracture analyzes of generator fan blades*. *Applied Fracture Mechanics*, Rijeka, InTech, 311–330. www.intechopen.com.
- Rajabinezhad, M., Bahrami, A., Mousavinia, M., Seyedi, S., Taheri, P. (2020) Corrosion-fatigue failure of gas-turbine blades in an oil and gas production plant. *Materials*, 13(4), 900. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma13040900>.
- Abassi, W., Rahman, S., Metala M. (2008) *NDE techniques and lifetime assessment of turbine equipment*. Power-Gen International, Orlando Florida.
- Pitkänen, J., Hakkarainen, T., Jeskanen, H. et al. (2000) NDT methods for revealing anomalies and defects in gas turbine blades. *15th World Conf. on Non-Destructive Testing*, Rome. www.ndt.net.
- Abassi, W., Fair, M. (2006) Ultrasonic phased array inspection of turbine components. *9th European Conf. on Non-Destructive Testing*, Berlin. www.ndt.net.
- Libby, H. (1971) *Introduction to electromagnetic nondestructive test methods*, 1st ed. Wiley-Interscience, New York, NY, USA.
- Udpa, S.S., More, P.O. (Eds) (2004) *Nondestructive testing handbook (third edition)*. Vol. 5, Electromagnetic testing, American Society for NDT.
- Garciamartín, J., Gómezgil, J., Vázquezsánchez, E. (2011) Non-destructive techniques based on eddy current testing. *Sensors*, 11, 2525–2565. DOI: <https://doi.org/10.3390/s110302525>
- Helifa, B., Oulhadj, A., Benbelghit, A., Lefkaier, I., F. Boubenider F., Boutassouna D. (2006) Detection and measurement of surface cracks in ferromagnetic materials using eddy current testing. *NDT&E International*, 39, 384–390. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2005.11.004>.
- Jansen, H. (2012) Eddy current testing: profiled eddy current probes for complex shape inspection. *18th World Conf. on Non-Destructive Testing*, Durban. www.ndt.net.
- Nath, S. C., Batzinger, T. J., Rose, C. M., Plotnikov, Y. A., Herd, K. G. (2004) *Method for in-situ eddy current inspection of coated components in turbine engines*. US Patent № 6707297, G01N27/82, GE Company, publ. 16.03.2004.
- Tian, G.Y., Sophian, A. (2005) Reduction of lift-off effects for pulsed eddy current NDT. *NDT&E International*, 38, 319–324. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2004.09.007>
- Kuts, Y., Lysenko, J., Dugin, A., Zakrevskii, A. (2016) Analysis of an eddy-current transducer with impulsive excitation in the nondestructive testing of cylindrical objects. *Mater. Sci.*, 52(3), 431–437. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-016-9975-4>.
- Uchanin, V., Nardoni, G. (2019) Detection of cracks in ferrous steel structures: new innovative eddy current techniques. *Procedia Structural Integrity*, 16, 198–204. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2019.07.041>
- Uchanin V., Nardoni G. (2013) Eddy current detection of cracks in ferromagnetic steel structures. *The Fundamentals of Structural Integrity and Failure*. Ed. by M. Richard. Wilcox, Nova Science Publishers, NY, USA, 193–221.
- Учанін В.М., Іващенко К.А. (2021) Виявлення дефектів конструкцій із феромагнітних сталей через шар антикорозійного покриття без його видалення. *Методи та прилади контролю якості*, 1(46), 5–14. DOI: [https://doi.org/10.31471/1993-9981-2021-1\(46\)-5-14](https://doi.org/10.31471/1993-9981-2021-1(46)-5-14)
- Uchanin, V.M., Ivashchenko, K.A. (2021) Detection of defects of structures from ferromagnetic steel through the layer of anticorrosion cover without removal. *Metody ta Prylady Kontrolyu Yakosti*, 1(46), 5–14. DOI: [https://doi.org/10.31471/1993-9981-2021-1\(46\)-5-14](https://doi.org/10.31471/1993-9981-2021-1(46)-5-14) [in Ukrainian].
- Uchanin, V. (2023) Surface eddy current probes of double differential type as an effective tool to solve non-destructive inspection problems. *The Paton Welding J.*, 2, 46–55. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2023.02.07>

DETECTION OF FATIGUE CRACKS IN THE FILLET ZONE OF STEEL BLADES OF INDUSTRIAL GAS TURBINES USING EDDY CURRENT METHOD

V.M. Uchanin¹, D. Nardoni², P. Nardoni²

¹G.V. Karpenko Physico-Mechanical Institute of NASU. 5 Naukova str., 79060, Lviv, Ukraine. E-mail: vuchanin@gmail.com

²I&T Nardoni Institute, Via della Cascina Pontevica, 21, 25124, Brescia, Italy. E-mail: nardoni.campus@gmail.com

The results of experimental investigations needed for the development of an effective eddy current technique for detection of the fatigue cracks originated in the critical fillet zone of gas turbine blades from ferromagnetic steels are discussed. The proposed inspection technique is based on using selective eddy current probes of double-differential type, which can ensure a high sensitivity when the clearance between the probe operational surface and the blade surface in the fillet zone is changed during the scanning. Experimental investigation of signals of eddy current probe of MDF 0501 type (operational surface diameter of 5 mm) allowed minimizing the lift-off influence by selecting the optimal operating frequency and the scanning parameters of the inspected zone. The proposed technique effectiveness was confirmed with the application for a real gas turbine blade with a 2 mm long and 0.2 mm deep artificial defect in the fillet zone, which characterizes the sensitivity threshold in accordance with the technical assignment. The developed technique has been used with success also during its trials in the power industry plants. 20 Ref., 9 Fig.

Keywords: gas turbine blade, fillet zone, eddy current probe, operation frequency

Отримано 11.04.2024

Отримано у переглянutoму вигляді 10.05.2024

Прийнято 12.06.2024