

Piotr Zientek
Politechnika Śląska, Gliwice

METODY BADAŃ NIENISZCZĄCYCH WYBRANYCH ELEMENTÓW KONSTRUKCJI TURBOZESPOŁU MAŁEJ MOCY

NON-DESTRUCTIVE TESTING METHODS FOR SELECTED ELEMENTS OF SMALL POWER TURBOGENERATORS

Streszczenie: W artykule przedstawiono opis nieniszczących metod badań diagnostycznych elementów mechanicznych maszyn (badania NDT–Non Destructive Testing). Badania nieniszczące urządzeń i konstrukcji stanowią grupę metod badawczych, które dostarczają informacji o własnościach materiału obiektu, nie wpływających w istotny sposób na jego właściwości strukturalne i powierzchniowe. W rozdziale 2 opisano najczęściej stosowane metody badań. Przykłady z badań przemysłowych zawarto w rozdziale 3. Wnioski z przeprowadzonych badań zawarto w rozdziale 4.

Abstract: The description of non-destructive testing methods (NDT) for diagnosing mechanical elements of machines is given in the paper. The non-destructive tests of devices and structures belong in the class of diagnostic methods providing information about the material of tested element, and the tests do not affect material's properties (structure, surface). The most common testing methods are described in Section 2, examples from industrial tests are provided in Section 3. The conclusions are presented in Section 4.

Słowa kluczowe: *maszyny elektryczne, badania nieniszczące*
Keywords: *electrical machines, Non Destructive Testing*

1. Wstęp

Ostatnie dziesięciolecie spowodowały intensywny wzrost badań diagnostycznych zarówno elektrycznych jak i mechanicznych elementów maszyn elektrycznych. Z tego względu nastąpił rozwój metod pozyskiwania informacji z badań diagnostycznych, w celu oceny stanu technicznego urządzenia i umożliwienia na tej podstawie podejmowania działań dla zwiększenia jego trwałości, niezawodności i efektywności działania. Bardzo mocno rozwinięty został aparat matematyczny do obróbki i metody analizy pozyskanych sygnałów.

W eksploatacji maszyn i urządzeń elementem bezpośrednio wpływającym na rozwój diagnostyki jest odpowiedzialność za realizowaną funkcję. Mówimy tutaj o zapewnieniu bezpieczeństwa w miejscu pracy dla osób obsługi, oraz o bezawaryjnej pracy układów napędowych będących elementami składowymi bardzo często dużych ciągów produkcyjnych. Awaria co najmniej jednego z tych elementów znacznie wydłuża czas produkcji i powoduje powiększenie kosztów. W takich właśnie układach, gdzie wymagany jest wysoki poziom niezawodności użytkowania, diagnostyka techniczna zaczyna być dostrzegana jako nieodzowny środek zapobiegawczy dla pojawiających się

problemów. Wśród metod funkcjonalnej diagnostyki w diagnostyce maszyn, a w szczególności w diagnostyce maszyn wirnikowych, podstawowe znaczenie mają metody wibroakustyczne oraz metody polegające na analizie prądu stojana. Jeśli chodzi o diagnostykę elementów mechanicznych maszyn, bazujemy na metodach nieniszczących. Rodzaje i typy badań nieniszczących zostaną omówione w dalszej części artykułu.

2. Rodzaje badań nieniszczących

Badania nieniszczące urządzeń i konstrukcji (badania NDT–Non Destructive Testing) stanowią grupę metod badawczych, które dostarczają informacji o własnościach materiału obiektu, nie wpływających w istotny sposób na jego właściwości strukturalne i powierzchniowe. Nadrzędnym celem prowadzenia badań nieniszczących jest przede wszystkim wykrywanie oraz ocena wad mających charakter nieciągłości materiału. Zastosowanie badań nieniszczących uzasadniają głównie względy bezpieczeństwa oraz aspekt ekonomiczny wystąpienia nieprzewidzianej awarii. Im bardziej odpowiedzialny jest obiekt tym bardziej dotkliwe są skutki jego nagłego uszkodzenia. Badania najczęściej

wykonywane są przy naprawach oraz modernizacji urządzeń, podlegających dozorowi technicznemu.

Wyróżniamy następujące rodzaje metod badań nieniszczących elementów maszyn:

- badania wizualne (VT), czyli oględziny zewnętrzne,
- badania endoskopowe,
- badania penetracyjne (PT),
- badania magnetyczno-proszkowe (MT),
- badania ultradźwiękowe (UT),
- badania prądami wirowymi (ET),
- radiografia przemysłowa (RT).

Badanie wizualne VT (visual testing) jest metodą wykorzystywaną najczęściej jako badanie wstępne w połączeniu z inną metodą niszczącą. Polega ona na bezpośrednim wykryciu i ocenie nieciągłości występujących na powierzchni obiektu. W metodzie tej wykorzystuje się bezpośrednio narząd wzroku, czasami wspomagany prostą optyką (zestaw lusterek, lupa, peryskop, endoskop, wideoskop). W metodzie tej wykrywane są duże nieciągłości powierzchniowe (wklęsnięcia, podtopienia, braki przetopu, pęknięcia kuźnicze, hartownicze, spawalnicze) oraz wady kształtu badanego obiektu (ubytki korozyjne, porowatości, odkształcenia kątowe, pustki). Metoda ta znajduje zastosowanie między innymi do badania części statków, samolotów, pomp, wymienników ciepła, rurociągów, zbiorników turbin, wirników [7].

Badania endoskopowe polegają na podglądzie wnętrza przy wykorzystaniu aparatów umożliwiających doprowadzenie światła i optyki. Wykorzystujemy do tego celu różnorodne urządzenia, takie jak szkła powiększające, spoinomierze, lusterka kontrolne, mikroskopy czy wideoendoskopy. Badania endoskopowe pozwalają wykryć usterki spowodowane wadami kształtu, odstępstwami wymiarowymi, nieciągłościami powierzchni czy uszkodzeniami eksploatacyjnymi.

Badania penetracyjne są prostą i szybką metodą pozwalającą na wykrywanie nieciągłości powierzchniowych o szerokościach od 10^{-6} m, takich jak pęknięcia zmęczeniowe, pęknięcia szlifierskie, porowatości, rozwarstwienia, wżery, pęknięcia powstałe po kuciu lub po walcowaniu. Metoda ta wykorzystuje zjawisko kapilarności – wnikania (penetracji) cieczy wska-

zującej (penetrantu) w głąb defektów powierzchni badanej (pęknięć, szczelin, rys, porów). Po oczyszczeniu badanej powierzchni z nadmiaru penetrantu i jej osuszeniu, nanosi się na nią następnie cienką, białą warstwę wywoływacza. Wywoływacz "wyciąga" penetrant z wad i czyni je widzialnymi w formie kolorowych, liniowych lub zaokrąglonych wskazań. Najczęściej do badań penetracyjnych stosuje się penetranty barwne (czerwone) lub fluorescencyjne. W przypadku, gdy zostanie zastosowany penetrant fluorescencyjny, w celu wywołania zjawiska fluorescencji, a tym samym ujawnienia nieciągłości powierzchni badanego materiału, stosuje się lampy o promieniowaniu ultrafioletowym. Barwniki te pod działaniem promieniowania UV świecą najczęściej kolorem żółto – zielonym i są dobrze widoczne na ciemnym tle. W metodzie tej konieczne jest zaciemnienie stanowiska badawczego w celu zwiększenia wykrywania wad.

Metodę penetracyjną stosuje się w materiałach ferromagnetycznych, nieferromagnetycznych (stal, staliwo, żeliwo, miedź, mosiądz, brąz, wolfram) oraz do badań materiałów niemetalicznych (np. ceramicznych).

Zalety badań penetracyjnych [6]:

- szybki i prosty proces badania,
 - możliwość badania różnych materiałów i wyrobów o dowolnych kształtach i wymiarach,
 - łatwość wykrywania wad o wielkości od ok. 0,001 mm,
 - łatwa ocena wskazań,
 - łatwość stosowania w warunkach warsztatowych i terenowych,
 - niskie koszty badania,
 - możliwość mechanizacji procesu badania,
 - duża skuteczność wykrywania wad.
- Wady badania penetracyjnego [6]:
- konieczność wstępnego oczyszczenia i odtłuszczenia powierzchni badanej oraz oczyszczenia powierzchni po badaniu,
 - wykrywanie tylko wad otwartych,
 - wpływ temperatury obiektu na właściwości preparatów,
 - starzenie się preparatów,
 - duża toksyczność preparatów, a zatem konieczność zapewnienia dobrej wentylacji podczas stosowania w pomieszczeniach zamkniętych.

Badania magnetyczno-proszkowe [8, 9] są jedną z najbardziej czułych, wiarygodnych i wydajnych metod nieniszczących, służących

kontroli powierzchni materiałów ferromagnetycznych, czyli wszystkich stali konstrukcyjnych z wyłączeniem stali wysokostopowych (austenitycznych). Metoda ta wykorzystuje oddziaływanie sił strumienia magnetycznego na cząsteczki ferromagnetyczne aplikowane na powierzchni badanego obiektu. W przypadku wystąpienia wady następuje rozproszenie strumienia magnetycznego oraz zmiana układu proszku magnetycznego w tej okolicy. Najlepszą wykrywalność osiąga się w sytuacji, w której kierunek ułożenia wady jest prostopadły do kierunku sił pola magnetycznego. Wraz ze zmniejszeniem tego kąta, wskazania wady są coraz to słabsze. Metoda magnetyczno-proszkowa charakteryzuje się możliwością wykrywania wąskich i płytkich nieciągłości powierzchniowych i podpowierzchniowych do około 2 mm. Stosowana jest do badania połączeń spawanych, odlewów, wałów korbowych silników spalinowych, przekładni zębatych, lin kolejek i wyciągów górskich. Zaletą tej metody jest duża szybkość wykonywanego badania oraz natychmiastowy wynik. Materiał badawczy występuje w formie barwnych lub fluorescencyjnych suchych proszków magnetycznych, zawiesin olejowych lub wodnych. Źródłami strumienia magnetycznego są jarzma (w przypadku badań małych lub trudnodostępnych obiektów) lub generatory prądu.

Badania ultradźwiękowe [5, 7, 9, 10] należą do metod "badań objętościowych". Polegają one na wprowadzaniu fal ultradźwiękowych do obiektu, które są odbijane przez nieciągłości, uginane i rozpraszane na krawędziach nieciągłości. Metoda ta pozwala wykrywać pęknięcia, zawałowania, rozwarstwienia, porowatości, nieszczelności na wskroś i inne nieciągłości wewnątrz elementów. Można je również stosować do szacowania zmian mikrostruktury materiału, powstających podczas długotrwałej eksploatacji oraz do pomiaru grubości obiektów. Główne dziedziny zastosowań to połączenia spawane, szyny kolejowe i tramwajowe, łopatki turbin i sprzężarek, wyroby ceramiczne (izolatory).

Metoda prądów wirowych [11] jest metodą powierzchniową. Polega na wzbudzaniu zmiennego pola elektromagnetycznego w badanym materiale i odbieraniu reakcji materiału poprzez sondę badawczą i defektoskop prądowirowy.

Analiza wartości zmian pola elektromagnetycznego, amplitudy oraz przesunięcia fazowego napięcia i natężenia pozwala na bardzo precyzyjną ocenę stanu badanego materiału, występujących nieciągłości w postaci np. pęknięć, ubytków erozyjnych lub korozyjnych, ocenę ich wielkości oraz głębokości. Metoda ta jest bardzo często wykorzystywana przez przemysł chemiczny, maszynowy, lotniczy, rafineryjny, cukrowniczy, papierniczy, spożywczy, kosmiczny oraz do badania rurek wymienników ciepła w elektrowniach jądrowych i konwencjonalnych.

Metoda radiograficzna [10] umożliwia wykrywanie wewnętrznych oraz powierzchniowych i podpowierzchniowych nieciągłości obiektów. Prowadzenie badań metodą radiograficzną polega na naświetlaniu obiektów promieniowaniem jonizującym tj. promieniowaniem rentgenowskim (X) lub promieniowaniem γ (gamma) otrzymywanym ze sztucznych źródeł izotopowych oraz na rejestracji obrazu prześwietlanego obiektu na kliszy radiograficznej lub w postaci cyfrowej.

Metoda ta jest stosowana w kontroli złączy spawanych i zgrzewanych, odlewów, odkuwek, rur, wlewków, kęsisk i in. Radiografia ma zastosowanie w badaniach wszystkich metali i ich stopów. Przyjmuje się, że za pomocą techniki radiograficznej wykrywa się różnice grubości wynoszące od 1,5 % do 2 %. Wykrywalność metody przy użyciu promieniowania gamma jest znacznie gorsza niż przy zastosowaniu promieniowania X.

3. Badania diagnostyczne elementów maszyn elektrycznych

Badania nieniszczące obok badań elektrycznych stanowią bardzo ważny element w utrzymaniu bezawaryjnej pracy układów napędowych. Dotyczy to wszystkich układów napędowych, nie tylko tych dużych np. turbozespoły. Małe napędy też często pełnią bardzo ważne i odpowiedzialne funkcje w różnych procesach produkcyjnych. Konieczne jest więc przeprowadzanie badań okresowych najbardziej newralgicznych elementów maszyn. Zaniedbanie tego bardzo często prowadzi do awarii [rys. 1, 2, 3], której skutki mogą mieć bardzo poważne konsekwencje.



Rys. 1. Silnik indukcyjny dużej mocy z urwanym wałem od strony napędowej



Rys. 2. Widok urwanego wału



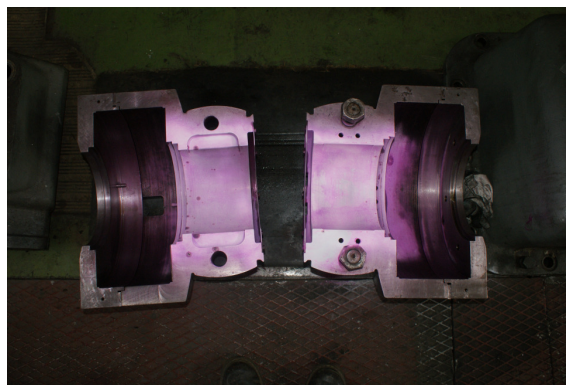
Rys. 3. Zerwanie łopatki wentylatora przymocowanego do korpusu wirnika [2, 3]

Trzymając się tej zasady w przypadku okresowych przeglądów turbozespołów wiele elementów generatora i turbiny bezwzględnie

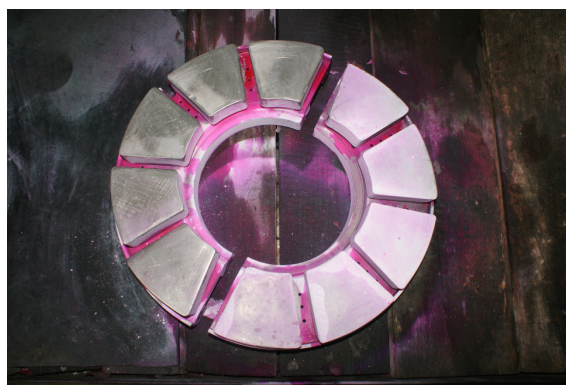
podlega badaniom nieniszczącym w celu stwierdzenia ich przydatności do dalszej eksploatacji. Badaniom takim poddawane zostają panewki generatora (rys. 4) i turbiny (rys. 5), łożysko oporowe (rys. 6), zawory grzybków regulacyjnych (rys. 7), śruby dwustronne - szpilki (rys. 8).



Rys. 4. Panewki generatora pokryte penetranem barwnym



Rys. 5. Panewki turbiny pokryte penetranem barwnym



Rys. 6. Łożysko oporowe pokryte penetranem barwnym



Rys. 7. Zawory grzybków regulacyjnych pokryte penetrantem fluorescencyjnym



Rys. 8. Śruby dwustronne (szpilki) pokryte penetrantem fluorescencyjnym

W uzasadnionych przypadkach podczas remontu wirnika turbogeneratorsu badaniu podlegają również jego kołpaki (rys. 9) oraz wał (rys. 10).

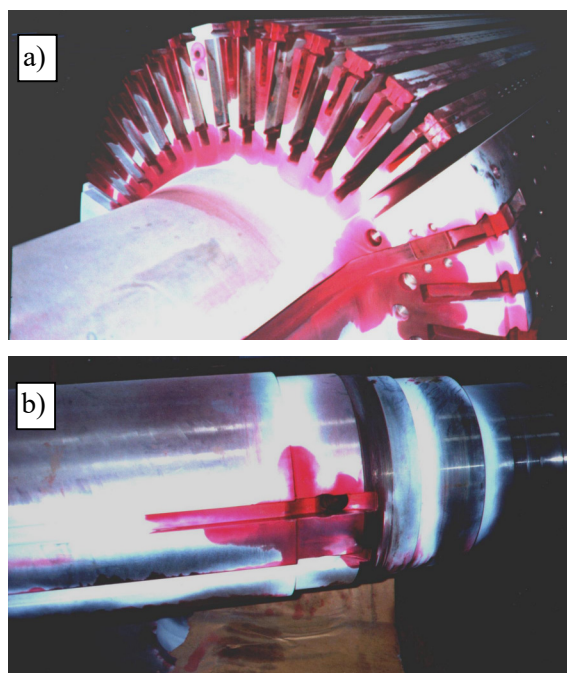


Rys. 9. Widoczne pęknięcia na powierzchni wewnętrznej kołpaka podczas badań penetracyjnych

Badania wału obejmują następujące strefy [2]:

- zęby beczki wirnika przy dnie żłobków oraz w miejscu osadzenia klinów żłobkowych (rys. 10a),
- rowki na kanały wentylacyjne (rys. 10a),

- rowki podłużne na powierzchni zewnętrznej wału na wyprowadzenia uzwojenia wzbudzenia (rys. 10a),
- zewnętrzna powierzchnia wału, w której występują największe naprężenia od sił odśrodkowych,
- otwory promieniowo - osiowe lub promieniowe (rys. 10b) do otworu centralnego wału wirnika, przeznaczone na połączenia uzwojenia wzbudzenia z pierścieniami ślizgowymi.



Rys. 10. Strefy badań diagnostycznych wału wirnika turbogeneratorsu (zaznaczone ciemnym kolorem): a) strefa zębów wirnika i podłużnych wyfrezowań, b) strefa otworu na połączenia z pierścieniami ślizgowymi [2]

Analiza uszkodzeń maszyn elektrycznych dużej mocy wykazuje, że zmęczenie materiału konstrukcyjnego może być przyczyną częściowego lub całkowitego ich zniszczenia. Dotyczy to zarówno silników, jak i turbogeneratorów.

Zjawisko zmęczenia materiału występuje wówczas, gdy pole odkształcenia w przekroju elementu konstrukcyjnego ulega cyklicznym zmianom. Ma ono bardzo ważne znaczenie techniczne, gdyż szacuje się, że około 80% elementów maszyn, pracujących w warunkach zmiennych obciążeń, ulega zniszczeniu w wyniku zmęczenia. Szczególnie niebezpieczne w skutkach jest zmęczenie materiału wału turbogeneratorsu, które w konsekwencji może doprowadzić do jego złamania i awarii bloku

energetycznego w zakresie trudnym do przewidzenia.

4. Wnioski

Metody badań nieniszczących ciągle są rozwijane i znajdują zastosowanie w różnych dziedzinach przemysłu. Ich szerokie zastosowanie wynika zarówno z potrzeby diagnozowania maszyn, utrzymania bezpieczeństwa, jak i niezawodności oraz gotowości technicznej na wymagany poziomie.

Nieniszczące badania urządzeń i konstrukcji (NDT) znajdują szerokie zastosowanie w wykrywaniu wad w elementach mechanicznych urządzeń. Najczęściej wykrywane są takie defekty jak pęknięcia otwarte lub wewnątrz elementów poddawanych działaniom sił np. zgniatających, rozciągających lub uszkodzeń bardzo często spowodowanych nieprawidłowym montażem, zdiagnozowanie wad kształtu na etapie produkcji oraz wykrywanie uszkodzeń wywołanych korozją urządzeń. W zależności od badanego elementu, jego przeznaczenia i budowy wykorzystujemy różne metody badań. Najchętniej i najczęściej stosowaną metodą są badania penetracyjne i ultradźwiękowe. Zalety stosowania tych metod to prostota, bezpieczeństwo oraz niskie koszty przeprowadzanych badań.

Literatura

- [1]. Drak B.: Wpływ zmęczenia materiałów na skutki awarii w maszynach elektrycznych. Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, nr 49, 2000 rok, ss. 85-95.
- [2]. Drak B.: Stan naprężeń i odkształceń w węzłach wirujących maszyn elektrycznych dużej mocy.

Przegląd Elektrotechniczny, R.81, No.10, 2005, ss. 15-21.

[3]. Drak B.: Stan naprężeń i odkształceń w łopatkach wentylatorów silników elektrycznych. XIV Seminarium Techniczne "Problemy Eksploatacji Maszyn i Napędów Elektrycznych" 18-20.05.2005, Ustroń; Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe Nr 71, Katowice 2005, ss. 51-54.

[4]. Hlebowicz J.: Badania stanu powierzchni osiowych otworów wirników turbin i generatorów. Energetyka, nr 12/1993, ss.423-425.

[5]. Wilczarska J.: Zastosowanie metod ultradźwiękowych w procesie regeneracji części maszyn. Inżynieria i Aparatura Chemiczna, nr 2/2014, ss.125-126.

[6]. <http://www.stalnierzewna.com/baza-wiedzy/metody-badan-penetracyjnych/>

[7]. http://proeuro.pl/badania-ndt/?gclid=CIHm6dabossCFfQW0wod_JUKEQ

[8]. http://www.kalla.pl/index.php?option=com_content&view=article&id=30&Itemid=6&lang=pl

[9]. <http://www.pcb.com.pl/MT-badania-magnetyczno-proszkowe.html>

[10]. <http://www.simpltest.pl/oferta/badania-nieniszczace/metody-badan-rt,-ut,-mt,-pt,-vt/#metoda-ultradzwiekowa>

[11]. <http://www.ndt-net.pl/index.php/badania-metoda-pradow-wirowych-et>

Autor

dr inż. Piotr Zientek

Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny
Zakład Maszyn Elektrycznych i Inżynierii
Elektrycznej w Transporcie

ul. Akademicka 10a, 44-100 Gliwice

tel: 032-2371885

e-mail: Piotr.Zientek@polsl.pl