

DOI: <https://doi.org/10.26628/simp.wtr.v95.1172.87-93>

Original Article

Detection of quenching cracks in 100Cr6 bearing steel by the eddy current method

Wykrywanie pęknięć hartowniczych w stali łożyskowej 100Cr6 metodą prądów wirowych

Adam Kondej*^{id}, Sylwester Jończyk^{id} and Piotr Lasota

¹ Sieć Badawcza Łukasiewicz – Warszawski Instytut Technologiczny

* Korespondencja: adam.kondej@wit.lukasiewicz.gov.pl

Received: 08.08.2023; Accepted: 24.10.2023

Streszczenie: W artykule opisano wyniki badań w zakresie identyfikacji i lokalizacji pęknięć hartowniczych w stali łożyskowej 100Cr6 z wykorzystaniem autorskiego urządzenia kontrolno-pomiarowego do badań nieniszczących metodą prądów wirowych Wirotest M2 oraz automatycznego stanowiska AutoWir-S1. Do badań zastosowano głowicę stykową o częstotliwości 861 kHz. System rejestrował zmiany amplitudy napięcia oraz częstotliwości rezonansowej. Wyraźny spadek wartości obydwu parametrów wskazywał na obecność nieciągłości. Efekt krawędziowy powodował wzrost amplitudy napięcia oraz spadek częstotliwości, jednakże zmiany te nie wpłynęły na detekcję pęknięć. Najmniejsze wykryte pęknięcie charakteryzowało się maksymalną szerokością około 20 μm i było niewidoczne okiem nieuzbrojonym. Uzyskane wykresy powierzchniowe jednoznacznie obrazują przebieg oraz lokalizację poszczególnych nieciągłości.

Keywords: metoda prądów wirowych; hartowanie; wykrywanie pęknięć; Wirotest M2

Abstract: The article describes the results of research on the identification and localization of quenching cracks in 100Cr6 bearing steel using a proprietary non-destructive testing device based on the eddy current method called Wirotest M2 and an automatic stand AutoWir-S1. A surface probe with a frequency of 861 kHz was used for the tests. The system recorded changes in voltage amplitude and resonant frequency. A significant decrease in both parameters indicated the presence of discontinuities. The edge effect caused an increase in voltage amplitude and a decrease in frequency, but these changes did not affect crack detection. The smallest detected crack had a maximum width of about 20 μm and was invisible by the unaided eye. The obtained surface charts clearly illustrate the course and localization of individual discontinuities.

Keywords: eddy current method; quenching; detection of cracks; Wirotest M2

Wstęp

Hartowanie jest rodzajem obróbki cieplnej, której celem jest umocnienie stali (lub poprawa właściwości wytrzymałościowych) poprzez uzyskanie struktury bainitycznej lub martenzytycznej. Proces ten obejmuje nagrzewanie materiału do temperatury austenitacji, wytrzymaniu w tej temperaturze, a następnie chłodzeniu. Szybkość chłodzenia ma determinujący wpływ na końcową strukturę oraz właściwości materiału. Hartowanie jest niezbędne do osiągnięcia podwyższonej twardości, wytrzymałości, granicy plastyczności oraz odporności na zużycie ścierne [1].

Obróbka cieplna ma znaczący wpływ na mikrostrukturę i właściwości stali, ale także na wartość i rozkład naprężeń szczytowych. Większość problemów występujących w elementach po obróbce cieplnej wynika z zastosowania nieprawidłowych parametrów procesu, doboru niewłaściwego gatunku stali oraz wad konstrukcyjnych lub materiałowych obrabianego elementu. Do najczęstszych błędów podczas obróbki cieplnej zalicza się m.in.: przegrzanie, przypalenie, nierównomierne nagrzewanie, nieodpowiednią temperaturę austenitacji oraz niewłaściwe chłodzenie. Wszystkie działania powodujące nadmierne naprężenia hartownicze mogą skutkować pękaniem materiału, co jest szczególnie niebezpieczne, ponieważ mogą prowadzić do całkowitego zniszczenia konstrukcji. W związku z tym wykrycie tego typu wady na

etapie wytwarzania lub eksploatacji jest niezwykle ważne. Do tego celu służą badania nieniszczące, które nie pozbawiają elementu badanego właściwości użytkowych [2].

W przemyśle do wykrywania pęknięć stosuje się kilka metod badań nieniszczących. Jedną z nich jest metoda prądów wirowych (ET – Electromagnetic Testing lub Eddy Current Testing), która zaliczana jest do grupy badań powierzchniowych. Metoda wykorzystuje zjawisko indukcji magnetycznej, polegającej na indukowaniu się prądów wirowych w materiale przewodzącym prąd elektryczny w wyniku działania zmiennego pola magnetycznego. Prądy wirowe wytwarzają własne pole magnetyczne, którego natężenie zależy od przewodności elektrycznej i przenikalności magnetycznej badanego materiału. Wszelkie zmiany struktury, geometrii, obecność nieciągłości itd. wpływają na wartości tych parametrów. Analiza zmian pola magnetycznego wytworzonego przez prądy wirowe pozwala na ocenę stanu badanego materiału [3].

Technika pomiarowa metodą ET polega na identyfikacji i analizie zmian wskazań układu pomiarowego w odniesieniu do poziomu przyjmowanego za prawidłowy i na tej podstawie, ocenie stanu materiału. Jest to metoda porównawcza, wymagająca wzorców lub próbek odniesienia.

Metoda prądów wirowych znajduje zastosowanie do wykrywania zmian struktury, zmian składu chemicznego, oceny twardości, oceny kierunku i wielkości naprężeń, do badania przewodności elektrycznej, do pomiaru grubości warstw i powłok, a także do wykrywania wszelkiego rodzaju nieciągłości materiałowych (defektoskopia). Metoda jest szczególnie przydatna do wykrywania wad powierzchniowych oraz podpowierzchniowych, zalegających na niewielkiej głębokości od badanej powierzchni [4-10].

Materialy i metody

Celem badań była ocena jakościowa elementu po hartowaniu objętościowym na okoliczność występowania pęknięć.

Przedmiotem badań był element ze stali łożyskowej o oznaczeniu 100Cr6 wg EN (ŁH15 wg PN) w postaci krążka o wymiarach $\varnothing 47 \times 10$ mm. Element został poddany hartowaniu objętościowemu w wodzie z temperatury 900 °C. Następnie powtórzono obróbkę cieplną zwiększając temperaturę austenitacji do 950 °C. Próbkę przecięto w dwóch miejscach w celu sprawdzenia obecności pęknięć na zglądach poprzecznych oznaczonych jako A i B. Obraz próbki po cięciu przedstawiono na rysunku 1. Obserwacje na mikroskopie świetlnym nie wykazały obecności pęknięć hartowniczych. W związku z tym element poddano kolejnej obróbce, w której zwiększono temperaturę austenitacji do 1050 °C. Powtórzono obserwacje na mikroskopie świetlnym. Na powierzchni zglądu A pojawiło się pięć pęknięć, podobnie jak na powierzchni zglądu B. Wszelkie pęknięcia propagowały od krawędzi próbki.

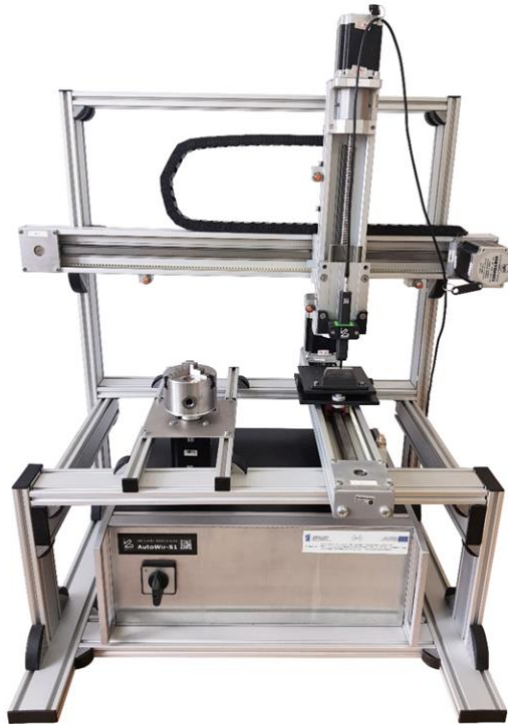


Rys. 1. Próbka ze stali 100Cr6 po hartowaniu

Fig. 1. The sample of 100Cr6 steel after quenching

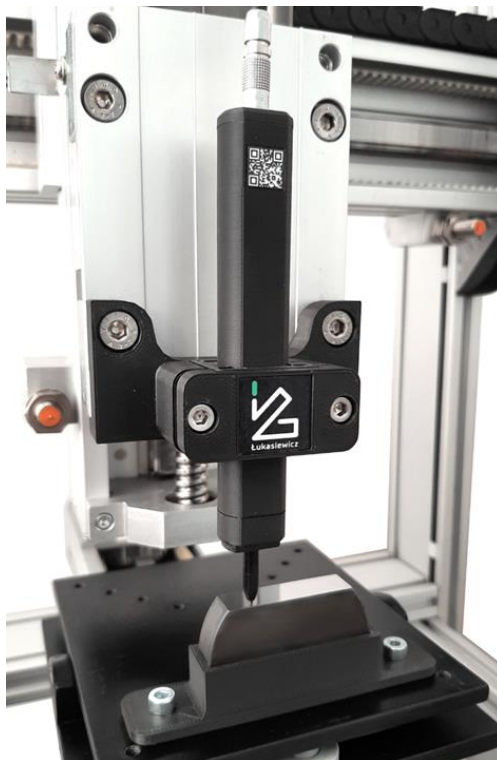
Do wykrywania pęknięć hartowniczych na próbce zastosowano metodę prądów wirowych, technikę pomiaru amplitudy napięcia oraz częstotliwości rezonansowej. Aparaturę pomiarową stanowił Wirotest M2, zminiaturyzowane urządzenie kontrolno-pomiarowe opracowane i wykonane w Sieć Badawcza Łukasiewicz – Warszawskim Instytucie Technologicznym. Do badań wykorzystano głowicę stykową o nominalnej częstotliwości pracy 861 kHz [11].

Pomiary zostały wykonane na autorskim stanowisku automatycznym AutoWIR-S1 (rys. 2) w trybie skanowania powierzchni płaskiej [12]. Siatka rejestrowanych punktów pomiarowych podczas skanowania wynosiła 0,1 x 0,1 mm. Na rys. 3 zamieszczono zdjęcie Wirotestu M2 podczas skanowania powierzchni zglądu. Uchwyt mocujący urządzenie pomiarowe zapewniał ciągły kontakt głowicy z materiałem badanym.



Rys. 2. Stacjonarne stanowisko automatyczne do badań nieniszczących metodą prądów wirowych - AutoWIR-S1

Fig. 2. The stationary automatic stand for non-destructive eddy current testing - AutoWIR-S1

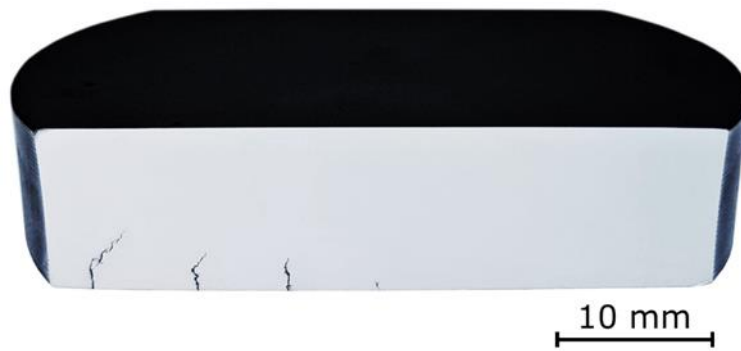


Rys. 3. Wirotest M2 podczas skanowania powierzchni zglądu głowicą 861 kHz

Fig. 3. The Wirotest M2 while scanning the cross-section surface with the 861 kHz measuring head

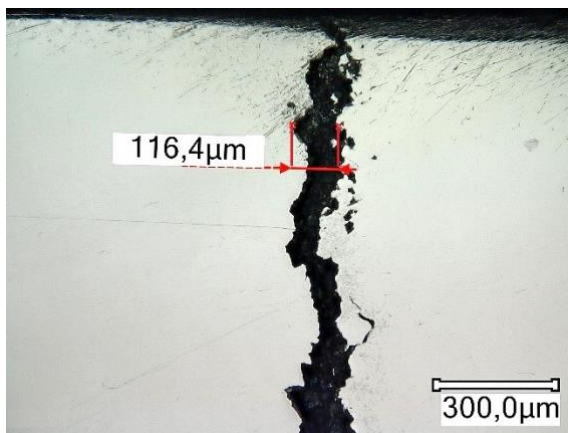
Wyniki

Wyniki badań odnoszą się do zglądu A, ponieważ powstałe pęknięcia charakteryzowały się różną wielkością – od pęknięć widocznych okiem nieuzbrojonym, po pęknięcie wykrywalne przy powiększeniu. Na rysunku 4 przedstawiono zdjęcie makroskopowe zglądu A. Widoczne są cztery pęknięcia.

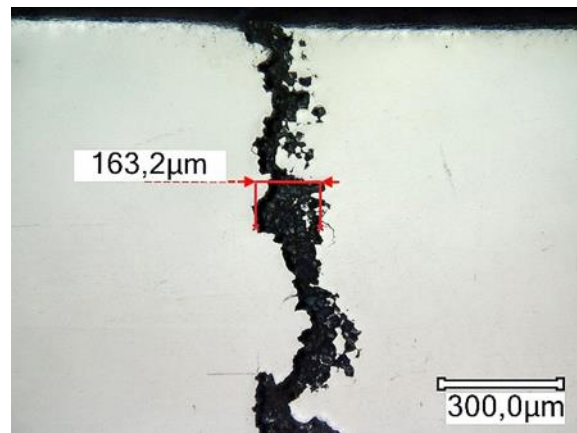


Rys. 4. Obraz makroskopowy powierzchni zglądu A o wymiarach 38x10 mm
Fig. 4. The macroscopic image of the surface of A cross-section with dimensions of 38x10 mm

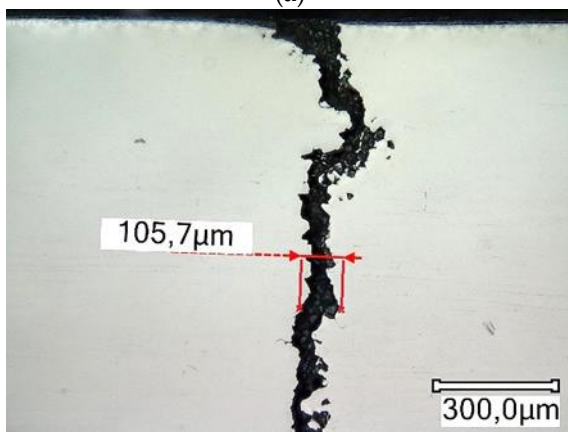
Na rys. 5 zamieszczono obrazy mikroskopowe pięciu pęknięć na powierzchni zglądu A. Obrazy wykonano za pomocą mikroskopu świetlnego Keyence VHX-5000 przy powiększeniu od 250 do 500x. Za pomocą oprogramowania VHX-5000 Communication Software zmierzono szerokość poszczególnych pęknięć w obszarach blisko krawędzi. Pęknięcia hartownicze charakteryzowały się szerokością od 20,5 do 163,2 μm .



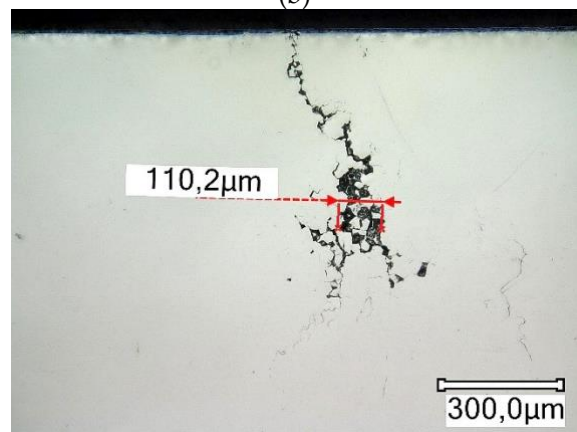
(a)



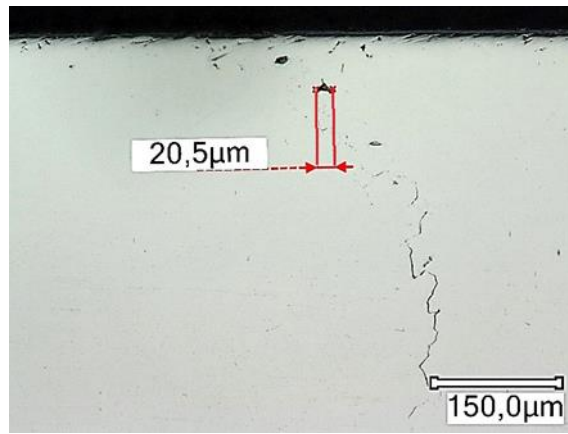
(b)



(c)



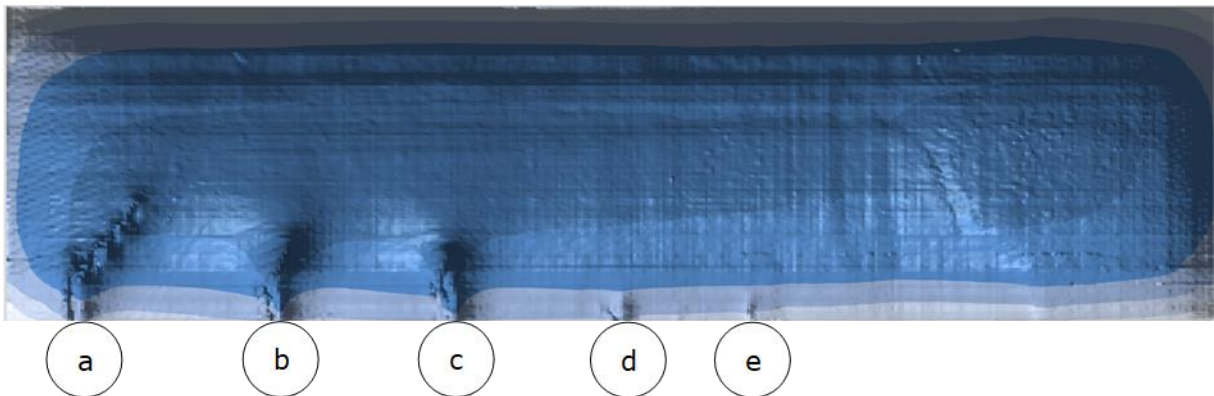
(d)



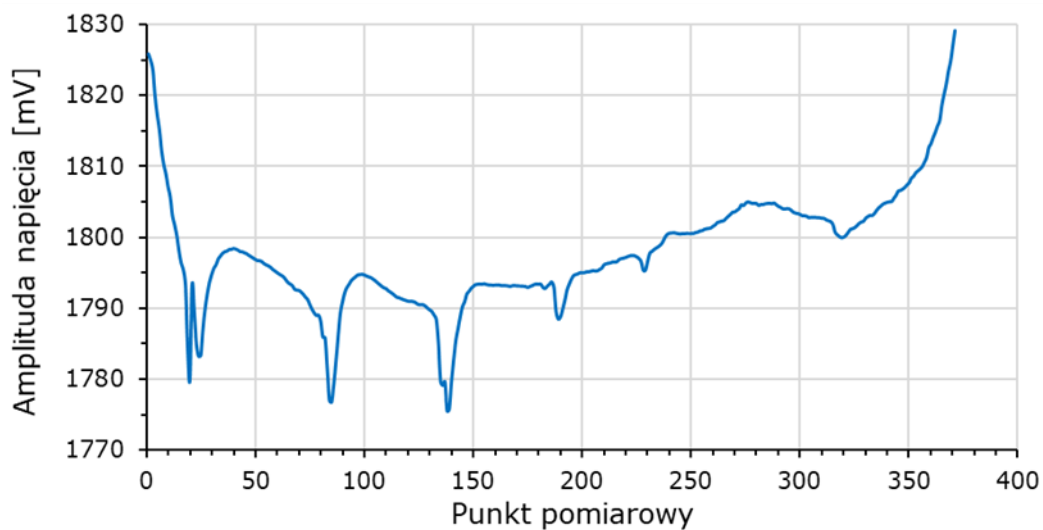
(e)

Rys. 5. Obrazy mikroskopowe pęknięć hartowniczych na powierzchni zglądu A
Fig. 5. The microscopic images of quenching cracks on the surface of A cross-section

Na rysunku 6 umieszczono wykres powierzchniowy zmian amplitudy napięcia dla zglądu A, natomiast na rys. 7 wykres liniowy z pomiarów wykonanych w odległości 0,6 mm od krawędzi próbki. Efekt krawędziowy objawia się wzrostem amplitudy napięcia sygnału prądowirowego. Natomiast obecność pęknięcia obniża wartość amplitudy napięcia, która jest tym niższa im większe jest pęknięcie.



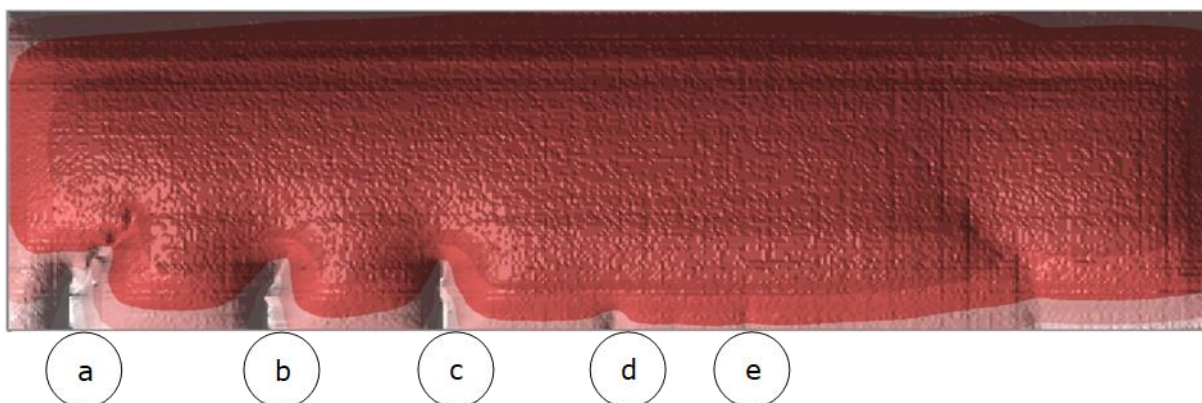
Rys. 6. Wykres powierzchniowy zmian amplitudy napięcia
Fig. 6. The surface graph of voltage amplitude changes



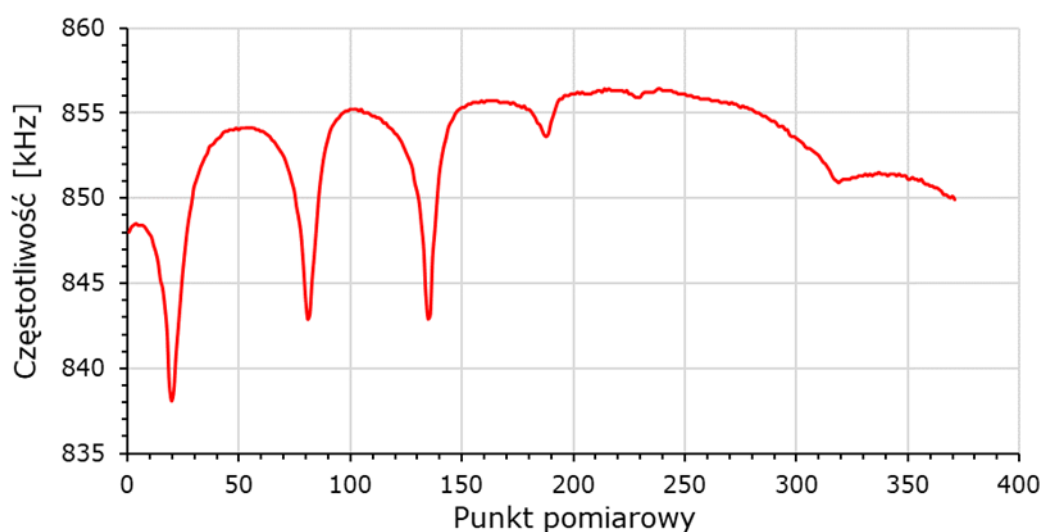
Rys. 7. Wykres liniowy zmian amplitudy napięcia
Fig. 7. The linear graph of voltage amplitude changes

Na rys. 8 przedstawiono wykres powierzchniowy zmian częstotliwości rezonansowej dla zglądu A, natomiast na rys. 9 wykres liniowy z pomiarów wykonanych w tej samej odległości od krawędzi próbki jak w przypadku pomiarów amplitudy napięcia. W tym przypadku efekt krawędziowy objawia się obniżeniem

wartości częstotliwości sygnału prądowiowego, podobnie jak obecność pęknięcia. Spadek jej wartości jest tym większy im większe jest pęknięcie.



Rys. 8. Wykres powierzchniowy zmian częstotliwości rezonansowej
Fig. 8. The surface graph of resonant frequency changes



Rys. 9. Wykres liniowy zmian częstotliwości rezonansowej
Fig. 9. The linear graph of resonant frequency changes

Zmiany wartości amplitudy napięcia oraz częstotliwości rezonansowej widoczne na wykresach powierzchniowych (rys. 6 i 8), pomiędzy najmniejszym pęknięciem (o oznaczeniu „e”) a prawą krawędzią, mogą być spowodowane pęknięciem materiału zlokalizowanym pod powierzchnią. W celu weryfikacji źródła tych zmian konieczne jest przeprowadzenie dalszych badań, obejmujących zarówno badania niszczące, jak i nieniszczące.

Podsumowanie

Pomiary metodą prądów wirowych, techniką amplitudowo-częstotliwościową, pozwalają na ocenę jakościową elementu po hartowaniu objętościowym na okoliczność występowania pęknięć.

Wirotest M2 z głowicą 861 kHz umożliwia wykrywanie pęknięć hartowniczych, zlokalizowanych przy krawędzi. Najmniejsze wykryte pęknięcie charakteryzowało się maksymalną szerokością około 20 μm i było niewidoczne okiem nieuzbrojonym. Pozostałe cztery pęknięcia były widoczne na powierzchni wypolerowanej. Wykresy powierzchniowe jednoznacznie obrazują przebieg oraz lokalizację poszczególnych nieciągłości.

Efekt krawędziowy powodował wzrost amplitudy napięcia oraz spadek częstotliwości, jednakże zmiany te nie wpłynęły na detekcję pęknięć hartowniczych.

W pracy dokonano tylko oceny jakościowej elementu po hartowaniu, natomiast przewiduje się, że technika amplitudowo-częstotliwościowa prądów wirowych pozwala także na ocenę ilościową. Pęknięcia są wadami trójwymiarowymi, ich wielkość można scharakteryzować poprzez długość, szerokość oraz głębokość. W celu sprawdzenia korelacji między wielkością pęknięcia hartowniczego a sygnałem prądowiowym należy przeprowadzić kolejne badania.

Uzyskane wyniki pracy mają znaczenie praktyczne, ponieważ potwierdzają skuteczność zastosowanego systemu pomiarowego w wykrywaniu pęknięć po hartowaniu objętościowym. System ten może być wykorzystany do międzyoperacyjnej kontroli jakości części na etapie ich wytwarzania. Wczesne wykrycie nieciągłości może zapobiec poważnym uszkodzeniom, co jest szczególnie ważne w przypadku odpowiedzialnych konstrukcji. Metoda prądów wirowych nie pozbawia badanego elementu jego właściwości użytkowych, pozwala na badanie wszystkich produkowanych części, co czyni ją przydatną w przemyśle.

Wkład autorów: koncepcja, J. S.; metodologia, K. A.; oprogramowanie, L. P.; badania, K. A., L. P.; pisanie – opracowanie pierwotnego tekstu, K. A.; pisanie – recenzja i redakcja, J. S.; wizualizacja danych, K. A.; zdjęcia, K. A.; nadzór, J. S.

Finansowanie: Badania przeprowadzono w ramach realizacji projektu pt. „Opracowanie technologii wysokociśnieniowego hartowania gazowego satelitarnych kół zębatych epicylicznej przekładni lotniczej silnika FDGS, wykonanych ze stali Pyrowear 53 i pracujących w warunkach długotrwałych i cyklicznie zmiennych obciążeń eksploatacyjnych”, finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach Strategicznego programu badań naukowych i prac rozwojowych "NOWOCZESNE TECHNOLOGIE MATERIAŁOWE" TECHMATSTRATEG.

Konflikty interesów: Autorzy nie zgłaszają konfliktu interesów.

Bibliografia

1. Simencio Otero R. L., Otero W. R., Totten G. E., Canale L. C. F. Quench Factor Characterization of Steel Hardening: A Review, *International Journal of Mechanical Engineering and Automation*, **2014**, Vol. 1, No. 3, 119-128.
2. Šolić S., Podgornik B., Leskovšek V. The occurrence of quenching cracks in high-carbon tool steel depending on the austenitizing temperature, *Engineering Failure Analysis*, **2018**, Vol. 92, 140-148.
<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2018.05.008>
3. Lewińska-Romicka A. *Badania materiałów metodą prądów wirowych*; Wydawca: Biuro Gamma, Warszawa, **2007**.
4. Dybiec Cz., Włodarczyk S. Badania nieniszczące metodą prądów wirowych – możliwości zastosowań, *Ochrona przed korozją*, **2010**, nr 3, 67-74.
5. Babul T., Jończyk S., Samborski T., Włodarczyk S. Wykrywanie niejednorodności materiału i lokalnych zmian mikrostruktury metodą prądów wirowych, *Przegląd Spawalnictwa*, **2013**, nr 12, 25-28.
6. Babul T., Jończyk S., Samborski T. Ocena lokalnych wad mikrostruktury – korelacja wyników pomiarów wiroprądowych i oznaczeń mikrotwardości, *Przegląd Spawalnictwa*, **2014**, nr 3, 11-17.
7. Aldrin J. C., Knopp J. S. Crack Characterization Method with Invariance to Noise Features for Eddy Current Inspection of Fastener Sites, *Journal of Nondestructive Evaluation*, **2006**, Vol. 25, No. 4, 165-181.
<https://doi.org/10.1007/s10921-006-0014-5>
8. Yamada H., Hasegawa T., Ishihara Y., Kiwa T., Tsukada K. Difference in the Detection Limits of Flaws in the Depths of Multi-Layered and Continuous Aluminum Plates Using Low-Frequency Eddy Current Testing, *NDT & E International*, **2008**, Vol. 41, No. 2, 108-111.
<https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2007.08.004>
9. Helifa B., Oulhadj A., Benbelghit A., Lefkaier I. K., Boubenider F., Boutassouna D. Detection and Measurement of Surface Cracks in Ferromagnetic Materials Using Eddy Current Testing, *NDT & E International*, **2006**, Vol. 39, 384-390.
<https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2005.11.004>
10. Hur D., Choi M., Lee D., Kim S., Han J. A Case Study on Detection and Sizing of Defects in Steam Generator Tubes Using Eddy Current Testing, *Nuclear Engineering and Design*, **2010**, Vol. 240, 204-208.
<https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2009.10.006>
11. Kondej A., Szczepański A. Pomiar amplitudowo-częstotliwościowy w badaniach nieniszczących metodą prądów wirowych, *Przegląd Spawalnictwa*, **2018**, nr 11, 12-15.
12. Kondej A., Baranowski M., Niedźwiedzki K., Jończyk S., Szczepański A. Automatyczne stanowisko do badań nieniszczących metodą prądów wirowych, *Inżynieria Powierzchni*, **2014**, nr 1, 57-62.



© 2023 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).