

Badania złączy spawanych ze stali martenzytycznej metodą prądów wirowych

Testing the welded joints made out of martensitic steel by using the eddy current method

Streszczenie

W artykule opisano badania złączy ze stali martenzytycznej X5CrNiCuNb16-4 metodą prądów wirowych. Do badań wykorzystano stacjonarne stanowisko automatyczne AutoWIR-S1 opracowane i wykonane w Instytucie Mechaniki Precyzyjnej. Analizie poddano trzy rodzaje próbek: pierwszy to materiał rodzimy, drugi to złącze spawane bez wad, natomiast trzeci to złącze z wykrytymi pęknięciami spoiny. Przedstawiono aparaturę pomiarową oraz metodykę badań. Wykazano skuteczność metody prądów wirowych w wykrywaniu przebiegu spoiny oraz detekcji pęknięć.

Słowa kluczowe: metoda prądów wirowych, złącza spawane, wykrywanie pęknięć, stanowisko automatyczne

Abstract

This paper describes testing the welded joints made out of martensitic steel X5CrNiCuNb16-4 by using the eddy current method. The study used stationary automatic stand AutoWIR-S1 developed and manufactured at the Institute of Precision Mechanics. Three kinds of specimens were examined: first entirely made out of base metal, second welded without defects, third welded with cracks. The measurement equipment and the methodology of the study was given. The effectiveness of the eddy current method was demonstrated in detecting the course of the weld and the presence of cracks.

Keywords: eddy current method, welded joints, detection of cracks, automatic stand

Wstęp

Metoda prądów wirowych (ET – *Electromagnetic Testing* lub *Eddy Current Testing*) należy do grupy podstawowych metod badań nieniszczących. Jest metodą porównawczą, wymagającą wzorców odniesienia. Oparta jest na zjawisku indukcji magnetycznej, która polega na indukowaniu 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 umożliwia ocenę stanu badanego materiału [1÷3].

Technika pomiarowa metodą ET polega na określeniu zmian wskazań układu pomiarowego w odniesieniu do poziomu przyjmowanego za prawidłowy. Poziom ten ustalany jest na powierzchni próbek odniesienia, bądź na powierzchni badanego elementu w miejscu pozbawionym wszelkich wad i nieciągłości.

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).

Mgr inż. Adam Kondej, mgr inż. Michał Baranowski – Instytut Mechaniki Precyzyjnej.

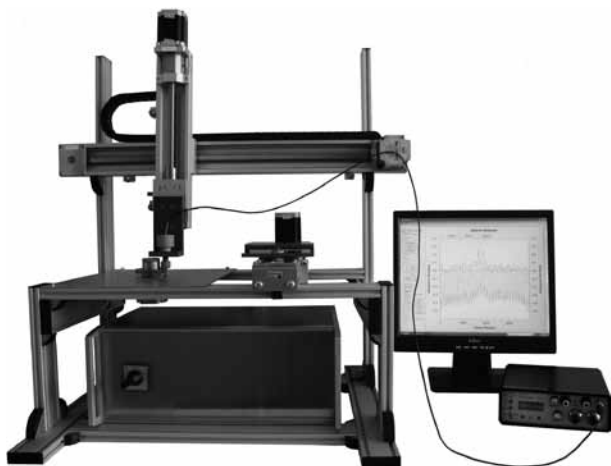
Autor korespondencyjny/Corresponding author: adam.kondej@imp.edu.pl

Metoda jest szczególnie przydatna do wykrywania wad powierzchniowych oraz podpowierzchniowych, zalegających na niewielkiej głębokości [1÷5].

Metoda ET charakteryzuje się względnie niskim kosztem wykonywania pomiarów, szczególnie w przypadku kontroli elementów o zbliżonych kształtach i wymiarach. Proces kontroli może być łatwo automatyzowany oraz prowadzony z dużą prędkością.

Opis stanowiska

Stanowisko do badań metodą prądów wirowych AutoWIR-S1 (rys. 1) jest przeznaczone do prowadzenia pomiarów w trybie automatycznym. Umożliwia badanie elementów o płaskich powierzchniach (np. blachy, płyty itd.) oraz elementów o kształcie brył obrotowych (np. koła zębate, tuleje, krążki, pierścienie itd.). W skład stanowiska wchodzi układ napędowo-pozycjonujący, defektoskop Wirotest 302 wraz z sondą stykową oraz komputer PC z aplikacją sterującą [6].



Rys. 1. Stacjonarne stanowisko automatyczne do badań nieniszczących metodą prądów wirowych

Fig. 1. Stationary automatic stand for non-destructive eddy current testing

Przedmiot badań

Przedmiotem badań były złącza spawane ze stali nierdzewnej X5CrNiCuNb16-4 (oznaczenie wg EN: 1.4542) o strukturze martenzytycznej, umacnianej drobnodispersyjnymi wydzieleniami faz międzymetalicznych. Właściwości elektromagnetyczne badanej stali zostały podane w tablicy I.

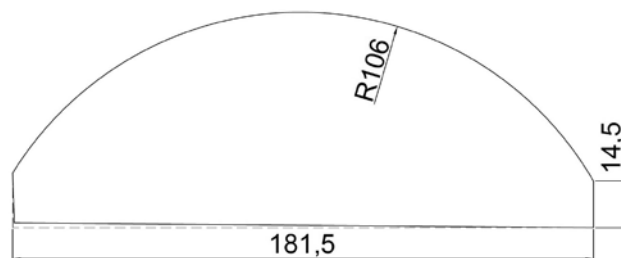
Tablica I. Właściwości elektromagnetyczne stali X5CrNiCuNb16-4
Table I. Electromagnetic properties of the steel X5CrNiCuNb16-4

Rezystywność ρ , $\Omega \cdot m$	$8 \cdot 10^{-7}$
Przewodność elektryczna właściwa γ , $S \cdot m$	$12,5 \cdot 10^6$
Względna przenikalność magnetyczna, μ_r	150

Próbki wycięto z blachy o grubości 3 mm, pracującej jako taśma prasująca przy produkcji płyt typu MDF. Była ona poddawana cyklicznym obciążeniom, w wyniku których następowały lokalne pęknięcia. Fragmenty z wykrytymi wadami były wycinane, a ubytki taśmy uzupełniane przez spawanie nowej blachy metodą TIG. Lico spoiny czołowej usuwano mechanicznie, zatem spoina nie powodowała zmian geometrii powierzchni. Naprawiona w ten sposób taśma była dalej eksploatowana. Kolejne obciążenia cykliczne powodowały po pewnym czasie powstawanie nowych pęknięć, które były zlokalizowane w najbardziej wrażliwych miejscach taśmy – w spoinach i strefie wpływu ciepła. Konsekwencją pęknięć pojawiających się na taśmie prasującej były uszkodzenia powierzchni produkowanych płyt, przez co musiały być one odrzucone.

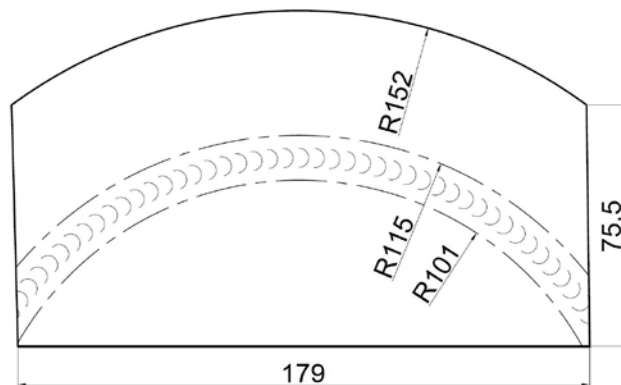
Badaniu poddano trzy rodzaje próbek. Pierwszy rodzaj (nr 1) stanowił wycinek blachy bez spoiny oraz pęknięć, geometrię i wymiary próbki przedstawiono na rysunku 2. Drugi rodzaj (nr 2) również nie miał pęknięć, jednak w tym przypadku był to fragment taśmy po naprawie, w którym występowała spoina. Geometrię oraz wymiary próbki nr 2 przedstawiono na rysunku 3. Trzeci rodzaj próbki (nr 3) był kołowym wycięciem fragmentu złącza, w którym wykryto pęknięcia i powierzchniowe ubytki materiału, geometrię oraz wymiary próbki przedstawiono na rysunku 4.

Stronę blachy, od której prowadzono naprawczy proces spawania, oznaczono jako A, natomiast drugą jako B. Przyjęte oznaczenia wprowadzono także dla badanych próbek, w celu jednoznacznego zdefiniowania powierzchni skanowania.



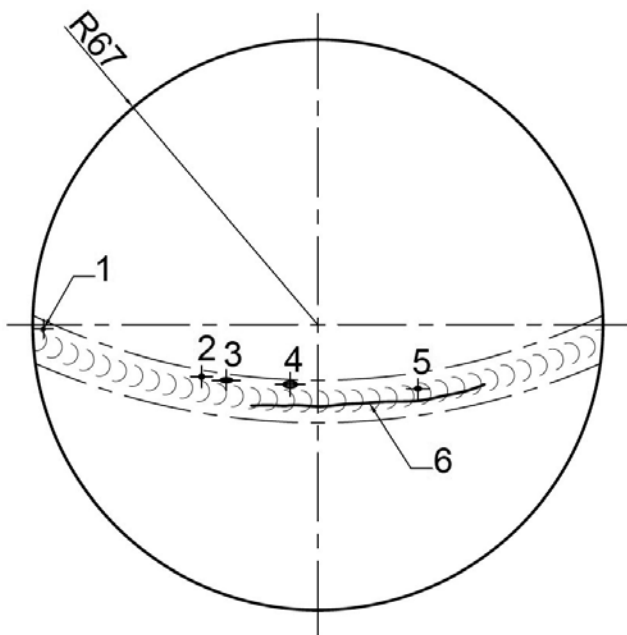
Rys. 2. Geometria próbki nr 1 – strona A

Fig. 2. The geometry of the sample No. 1 – side A



Rys. 3. Geometria próbki nr 2 z zaznaczonym przebiegiem spoiny – strona A

Fig. 3. The geometry of the sample No. 2 with marked course of weld – side A



Rys. 4. Geometria próbki nr 3 wraz z rozmieszczeniem nieciągłości od strony A; 1+5 – powierzchniowe ubytki materiału, 6 – pęknięcie
Fig. 4. The geometry of the sample No. 3 together with arrangement of the discontinuities on a side A; 1+5 – surface material losses, 6 – crack

Metodyka badań

Pomiary zostały wykonane na stanowisku automatycznym w trybie powierzchniowego skanowania (rys. 5). Badania przeprowadzono z wykorzystaniem sond stykowych produkcji IMP o różnej częstotliwości pracy przetwornika (tabl. II) oraz przy różnej czułości układu pomiarowego.

Skanowanie powierzchni prowadzono po stronie A dla każdej z próbek według schematu zamieszczonego na rysunku 6. Przecięcia linii siatki wyznaczały punkty pomiarowe, w których rejestrowano wskazania defektoskopu. Ruch sondy realizowany był w sposób skokowy. W pierwszej fazie badań pomiary przeprowadzono ze zwiększonym skokiem sondy (5 mm), w celu skrócenia czasu skanowania. Na podstawie analizy uzyskanych wyników określono optymalną czułość układu pomiarowego, dla której wykonano skanowanie dokładne – ze zmniejszonym skokiem sondy (2 mm).

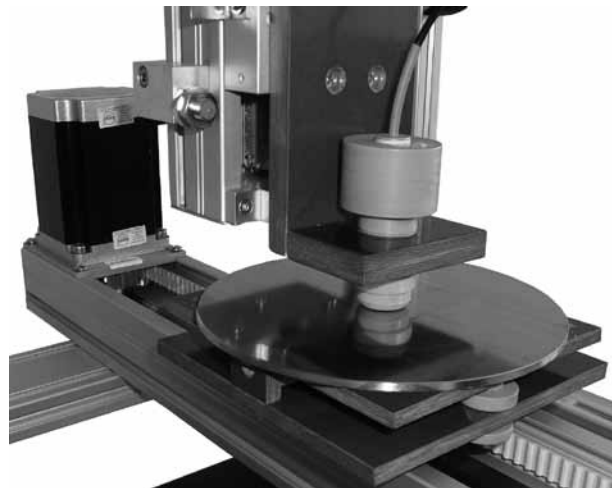
Zerowanie układu pomiarowego (ustalenie poziomu odniesienia) wykonywano każdorazowo dla danej

Tablica II. Wykaz sond użytych w badaniach
Table II. List of probes used in measurements

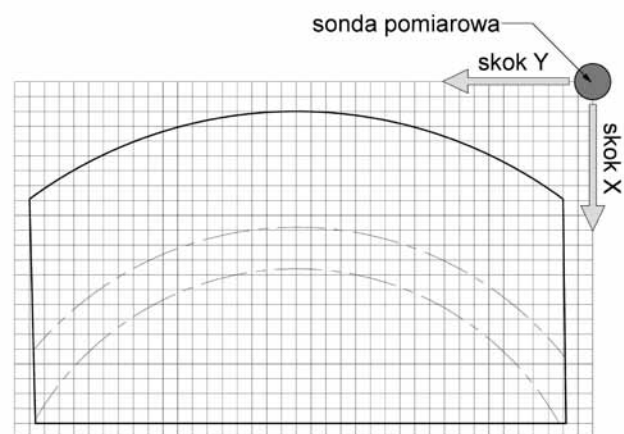
Oznaczenie sondy	Częstotliwość pracy przetwornika	Średnica zewnętrzna sondy
SNC/11/010	3 kHz	Ø16 mm
SNC/06/001	250 kHz	Ø12 mm
SNC/05/007	0,5 MHz	Ø12 mm
SNC/05/003	1 MHz	Ø12 mm

sondy, czułości oraz próbki w ściśle określonym miejscu. Dla wszystkich przypadków miejsce zerowania znajdowało się w materiale rodzimym wolnym od pęknięć.

W badaniach zastosowano uchwyt z dociskiem sprężynowym sondy, gdzie szczelinę pomiędzy czołem sondy a powierzchnią badaną osiągnięto za pomocą nakrętki dystansowej (wartość szczeliny wynosiła 0,05 mm).



Rys. 5. Skanowanie powierzchni próbki nr 3
Fig. 5. Scanning the surface of the sample No. 3



Rys. 6. Kierunki skanowania
Fig. 6. Scanning directions

Wyniki badań

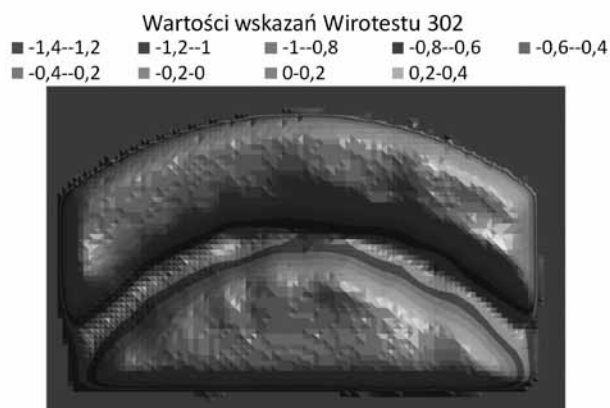
Praca badawcza obejmowała trzy etapy. W pierwszym określono wpływ materiału rodzimego (stali X5Cr-NiCuNb16-4) na wskazania poszczególnych sond przy różnych ustawieniach czułości układu (próbka nr 1). W drugim etapie zbadano możliwość wykrywania

zmian struktury metodą prądów wirowych przez skanowanie próbki, w której wyróżnić można materiał rodzimy, spoinę i strefę wpływu ciepła (SWC). Etap trzeci miał na celu określenie reakcji układu pomiarowego na obecność nieciągłości materiału (próbka nr 3).

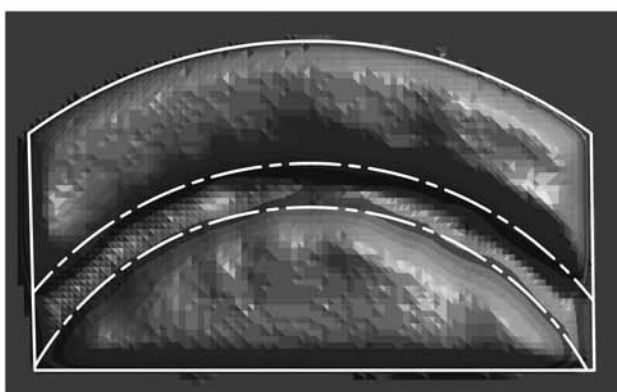
W artykule zostały przedstawione wybrane wyniki skanowania powierzchniowego próbki nr 2 i nr 3 dla sondy o częstotliwości pracy przetwornika 1 MHz.

Wykrywanie zmian struktury materiału (spoina i SWC)

Zamieszczony na rysunku 7 wykres powierzchniowy próbki nr 2 ujawnił położenie i przebieg spoin oraz SWC. Zmiana struktury, będąca wynikiem cyklu ciepłego spawania, spowodowała wyraźny spadek wskazań Wirotestu 302 względem materiału rodzimego. Na rysunku 8 zamieszczono wykres powierzchniowy wraz z naniesioną geometrią próbki nr 2 (przedstawioną na rys. 3), potwierdzającą lokalizację wykrytych zmian.



Rys. 7. Wykres powierzchniowy próbki nr 2 – sonda 1 MHz
Fig. 7. Surface graph of the sample No. 2 – probe 1 MHz



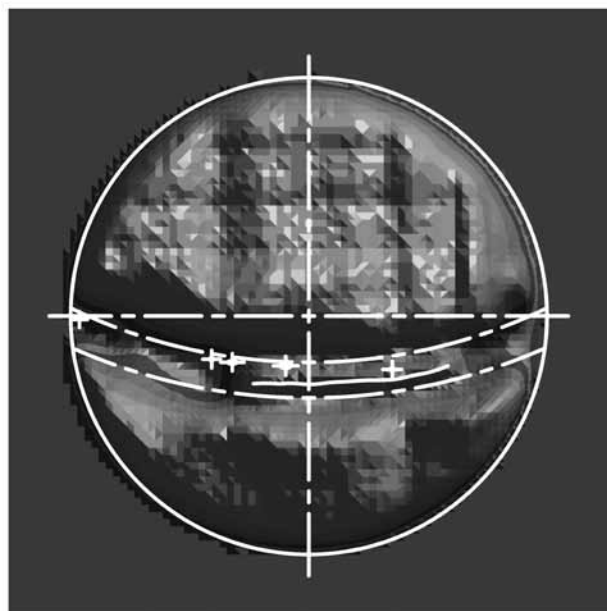
Rys. 8. Wykres powierzchniowy z nałożoną geometrią próbki nr 2 (sonda 1 MHz)
Fig. 8. Surface graph with marked geometry of the sample No. 2 (probe 1 MHz)

Wykrywanie nieciągłości powierzchniowych

Zamieszczony na rysunku 9 wykres powierzchniowy próbki nr 3 ujawnił położenie i przebieg spoiny oraz SWC, a także wykazał obecność pęknięcia. Obecność spoiny i SWC spowodowała spadek wskazań Wirotestu 302 względem materiału rodzimego. Natomiast w obszarze pęknięcia zostało zarejestrowane wskazanie o najwyższych wartościach dodatnich. Na rysunku 10 zamieszczono wykres powierzchniowy wraz z naniesioną geometrią próbki nr 3 (przedstawioną na rys. 4), potwierdzającą lokalizację wykrytych zmian.



Rys. 9. Wykres powierzchniowy próbki nr 3 – sonda 1 MHz
Fig. 9. Surface graph of the sample No. 3 – probe 1 MHz



Rys. 10. Wykres powierzchniowy z nałożoną geometrią próbki nr 3 (sonda 1 MHz)
Fig. 10. Surface graph with marked geometry of the sample No. 3 (probe 1 MHz)

Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań można wytypować sondy, których charakterystyka pracy pozwala na prowadzenie skutecznej kontroli złączy spawanych ze stali X5CrNiCuNb16-4. Sonda o częstotliwości pracy przetwornika 1 MHz przy optymalnych ustawieniach układu pomiarowego (czułość, szczelina) umożliwia wykrywanie pęknięć powierzchniowych w spoinie i strefie wpływu ciepła (SWC). Ponadto na podstawie wskazań możliwe jest określenie położenia oraz przebiegu spoiny i SWC. Sonda została sprawdzona na próbkach o określonej grubości, wykonanych z materiału o ściśle określonych właściwościach elektromagnetycznych.

Na sygnał wyjściowy przetwornika ma wpływ wiele czynników. Zmiany struktury, geometrii, twardości materiału, obecność nieciągłości itd. wpływają na wskazania defektoskopu. Bardzo często zmiany te występują jednocześnie, co stanowi znaczne utrudnienie, szczególnie w badaniach ukierunkowanych na wykrywanie konkretnych zmian. Zamieszczone w artykule wyniki badań próbki nr 3 potwierdzają skuteczność wykrywania pęknięć. Natomiast wykrywanie drobnych ubytków powierzchniowych materiału nie zostało potwierdzone. Ubytek nr 1 (rys. 4) znajduje się zbyt blisko krawędzi. W wyniku oddziaływania efektu krawędziowego nie zaobserwowano sygnałów pochodzących od tej niezgodności. Ubytek nr 2 ze względu na niewielkie wymiary (pole powierzchni poniżej 0,5 mm²) również nie został wykryty. Pozostałe ubytki znajdowały się zbyt blisko

pęknięcia, które silnie wpływało na sygnał wyjściowy sondy. Dodatkowo wszystkie ubytki powierzchniowe znajdowały się w obszarze spoiny i SWC, co mogło mieć istotny wpływ na ich wykrywalność. W celu jednoznacznego potwierdzenia skuteczności wykrywania tego typu niezgodności należy wykonać badania na specjalnie przygotowanych próbkach, w których czynniki zakłócające będą wyeliminowane.

Prowadzenie badań w trybie automatycznym znacznie skraca czas kontroli. Zmniejszenie skoku skanowania umożliwia dokładniejszą kontrolę materiału, jednakże znacznie wydłuża czas całego procesu, zwłaszcza w przypadku skanowania powierzchniowego dużych elementów. Należy zatem dążyć do określania optymalnych parametrów skanowania. W przypadku badań ukierunkowanych na wykrywanie zmian struktury materiału skok sondy może być odpowiednio większy, niż w przypadku badań mających na celu wykrywanie niewielkich pęknięć bądź drobnych ubytków materiału.

W przypadku kontroli elementów o zmiennej geometrii, mającej znaczący wpływ na sygnał wyjściowy, korzystne jest stosowanie uchwytów sond zapewniających stałą odległość od materiału badanego. Ma to na celu zmniejszenie lub wyeliminowanie wpływu efektu uniesienia na wskazania defektoskopu. Jednym z rozwiązań, zaprezentowanych w artykule, jest wykorzystanie uchwytu z dociskiem sprężynowym, który niweluje wpływ zmian geometrii elementu na wartość szczeliny.

Literatura

- [1] Lewińska-Romicka A.: Badania materiałów metodą prądów wirowych. Biuro Gamma. Warszawa 2007.
- [2] Dybiec Cz., Włodarczyk S.: Badania nieniszczące metodą prądów wirowych – możliwości zastosowań. Ochrona przed korozją, nr 3/2010, s. 67-74.
- [3] Dybiec Cz.: Prądy wirowe. Metoda i aparatura pomiarowa. Zakres zastosowań. Materiały szkoleniowe IMP. Warszawa 2004.
- [4] Babul T., Jończyk S., Samborski T., Włodarczyk S.: Wykrywanie niejednorodności materiału i lokalnych zmian mikrostruktury metodą prądów wirowych. Przegląd Spawalnictwa, nr 12/2013, s. 25-28.
- [5] Babul T., Jończyk S., Samborski T.: Ocena lokalnych wad mikrostruktury – korelacja wyników pomiarów wiroprowadowych i oznaczeń mikrotwardości. Przegląd Spawalnictwa, nr 3/2014, s. 11-17.
- [6] Kondej A., Baranowski M., Niedźwiedzki K., Jończyk S., Szczepański A.: Automatyczne stanowisko do badań nieniszczących metodą prądów wirowych. Inżynieria Powierzchni, nr 1/2014, s. 57-62.

Miesięczne i roczne spisy treści oraz streszczenia artykułów opublikowanych w Przeglądzie Spawalnictwa są dostępne na stronie internetowej:

www.pspaw.pl