



Badania nieniszczące złączy spawanych metodą prądów wirowych

The nondestructive testing of welded joints by eddy current method application

Streszczenie

W artykule przedstawiono techniki badań nieniszczących metodą prądów wirowych stosowane do kontroli konstrukcji spawanych z paramagnetycznych i ferromagnetycznych materiałów i oceny zachodzących w nich przemian strukturalnych, a także ujawnienia niezgodności w złączach spawanych. Pokazano, że specyficzne trudności w badaniach nieniszczących metodą prądów wirowych spoin wynikają z niejednorodności przewodności elektrycznej i zmian geometrii złącza. Przedstawiono wyniki opracowania technologii defektoskopii metodą prądów wirowych złączy spawanych z użyciem selektywnych przetworników prądów wirowych multidyferencjonalnego typu. Pokazano efektywność użycia do kontroli złączy spawanych dwuwymiarowej wizualizacji. Przedstawiono również wielokanałowe systemy prądów wirowych, które gwarantują podwyższenie wydajności kontroli metodą prądów wirowych złączy spawanych kosztem usuwania poprzecznego skanowania strefy spoiny. Zamieszczono też przykłady stosowania kontroli metodą prądów wirowych w skomplikowanych warunkach, np. w przypadku dla kontroli konstrukcji podwodnych.

Abstract

The eddy current technologies for inspection of welded constructions made of non-ferromagnetic and ferromagnetic materials for assessment of structural changes and detection of defects in the weld zone. It is shown that the specific disturbances of eddy current testing of welds caused by in-homogeneities of electrical conductivity and geometry disturbances. The results of development of eddy current weld inspection technologies with selective multidifferential type eddy current probes application are presented. The efficiency of the application of the two-dimensional visualization for weld inspection is presented. Multichannel eddy current inspection systems that enhance the performance of eddy current testing of welds by eliminating cross-scan of the weld zone is presented. The examples of the applications of eddy current inspection technologies in difficult conditions (for example for underwater constructions inspection) are presented.

Wstęp

Połączenia spawane wymagają szczególnej uwagi przy kontroli nieniszczącej (KN) odpowiedzialnych konstrukcji. Wynika to z umocnienia materiału w strefie wpływu ciepła i pojawienia się dodatkowych niezgodności spawalniczych, które mogą istotnie wpływać na trwałość i nośność konstrukcji [1÷4]. W szczególności,

spawanie wiązką elektronów (SWE) powoduje powstawanie takich niezgodności, jak: pęknięcia, pory, skurcz, brak przetopu. Zimne pęknięcia powstają wskutek dużych prędkości spawania przy wysokiej twardości metalu spoiny. Pęknięcia te wywołane są naprężeniem, oddziałującym w kierunku poprzecznym względem osi spoiny (stąd wzdłużny kierunek pęknięcia). Pęknięcia gorące i krystaliczne powstają przy różnych rodzajach spawania i mogą być zorientowane zarówno wzdłuż, jak i w poprzek spoiny. Przesunięcie spoiny względem styku krawędzi spawanych powstaje np. wskutek oddziaływania na wiązkę elektronów pola magnetycznego. Przy jakościowej obróbce i montażu krawędzi,

Dr inż. Walentyn M. Uczanin – Fizyczno-Mechaniczny Instytut im. G.W.Karpienki Państwowej Akademii Nauk we Lwowie.

wskutek procesów dyfuzyjnych i wysokiej temperatury, między spawanymi powierzchniami może powstawać częściowe połączenie. Niezgodność tego typu określana jest jako *sklejenie* lub *przyklejenie*. Nieprawidłowy dobór parametrów spawania może wywołać niedostateczną głębokość wtopienia. Niejednoznaczność zastosowanej powyżej terminologii jest związana z tym, że często dla jednakowych niezgodności i wad w literaturze wykorzystuje się różne oznaczenia [1÷7].

W złączach spawanych elektrołukowo (SEL) i łukowo w osłonie (SAL), najczęściej występują niezgodności i wady typu: pory, brak wtopienia, wtrącenia żużla [3]. Dla złączy spawanych stopów aluminium, wykonanych spawaniem metodą łukową w osłonie argonu, charakterystyczne są defekty w postaci powłok tlenków i wtrąceń wolframu [8, 9].

Z punktu widzenia metody prądów wirowych wszystkie niezgodności podzielić można na dwie główne klasy: 1) defekty liniowe (brak wtopienia i pęknięcia) i 2) defekty lokalne (pory, niemetaliczne i metaliczne wolframowe wtrącenia, wtrącenia powłok tlenkowych) [8]. Defekty liniowe są rozmieszczone przeważnie wzdłuż spoiny i ich długość jest o wiele większa niż głębokość i szerokość. W defektach lokalnych wszystkie geometryczne parametry są zbliżone.

Do kontroli nieniszczącej złączy spawanych najczęściej stosuje się metody: rentgenowską i ultradźwiękową [4÷7]. Zdarzają się sytuacje, kiedy te metody są mało efektywne lub nieprzydatne. Metoda rentgenowska wymaga dwustronnego dostępu do kontrolowanego obiektu – nie zawsze może być zapewniony, zwłaszcza w końcowych spoinach gabarytowych konstrukcji, poza tym jest dosyć droga i ma szkodliwe działanie na środowisko przyrodnicze. Wadami metody rentgenowskiej jest bardzo niska odporność na niezgodności typu „zlepianie” się w złączach spawanych wyrobów ze stopów aluminium [3]. Z kolei wadą metody ultradźwiękowej jest niska czułość na niektóre charakterystyczne dla złączy spawanych niezgodności (przyklejenie, tlenki, wtrącenia wolframu) oraz ograniczenia przy kontroli cienkościennych konstrukcji i konieczność użycia płynów kontaktowych [7]. Metoda z wykorzystaniem proszków magnetycznych jest przydatna do ujawnienia przeważnie wad i niezgodności powierzchniowych, ale ograniczeniem jest możliwość jej zastosowania jedynie do metali ferromagnetycznych [7]. Poza tym, metoda proszków magnetycznych ma stosunkowo niską wydajność.

Do ujawnienia wad i niezgodności różnego typu w konstrukcjach metalowych często stosuje się metodę kontroli prądami wirowymi [10÷11]. Przy defektoskopii prądowirowej złączy spawanych powstaje jednak wiele specyficznych problemów, bez rozwiązania których efektywność tej metody obniża się znacznie. W szczególności, kontrola prądowirowa złącza komplikuje się z powodu dużej niejednorodności względnej przewodności elektrycznej (PE) w tym obszarze, obecności umocnienia struktury lub złego stanu powierzchni po jego usunięciu, a także krzywizny powierzchni

(zwłaszcza przy przesunięciu krawędzi). Z tego powodu, przez długi czas metoda prądów wirowych była uważana za pozbawioną perspektyw dla złączy spawanych i nie została przewidziana w normach państwowych na Ukrainie (w odróżnieniu od Unii Europejskiej, gdzie metoda prądów wirowych jest konieczną składową odpowiedniego systemu zapewnienia jakości). Współczesna praktyka przemysłowa wskazuje duże perspektywy tej metody badań nieniszczących złączy spawanych, zwłaszcza w odniesieniu do konstrukcji cienkościennych o grubości ścianki do 3÷4 mm [8÷15]. Metoda prądów wirowych może być perspektywiczna i dla współczesnych metod spawania – promieniem lasera i tarciami. Te metody spawania w aspekcie wykorzystania metody prądów wirowych mogą mieć zastosowania przy produkcji nowych samolotów firmy Airbus [16]. W dalszej części artykułu przedstawiono przykłady zastosowania metody prądów wirowych do kontroli złączy spawanych, będące efektem prac własnych i innych naukowców.

Metody badań i ich przebieg

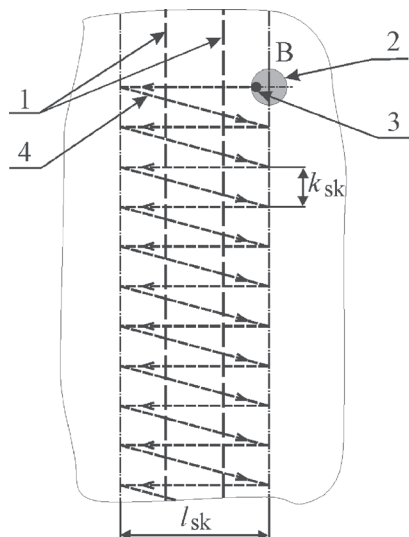
Kontrola metodą prądów wirowych złączy spawanych wiązką elektronową (SWE)

Opracowanie metody prądów wirowych w kontroli spoin konstrukcji spawanych kompleksu promu komicznego „Buran” przeprowadzono m.in. w Fizyczno-Mechanicznym Instytucie im. G.W. Karpienki Państwowej Akademii Nauk we Lwowie [17÷19]. Celem prowadzonej kontroli było ujawnienie wad i niezgodności typu przyklejenie w konstrukcji spawanej ze stopu 1201, będącej skutkiem ugięcia wiązki elektronów od styku krawędzi podczas spawania. Warto zaznaczyć, że niezgodność ta wychodziła na kontrolowaną powierzchnię i miała, z reguły, długość powyżej 10 mm przy dosyć dużej (powyżej 2÷3 mm) głębokości. Bez względu na stosunkowo duże rozmiary i potencjalne niebezpieczeństwo z jej występowania, niezgodność ta nie jest wykrywana za pomocą tradycyjnych metod ręcznej kontroli badaniami nieniszczącymi.

Kontrola podłużnych złączy spawanych metodą prądów wirowych jest oparta na stosowaniu defektoskopu typu DUET-C w komplecie z przetwornikiem prądów wirowych (PPW) typu multidyferencjalnego o powierzchni roboczej o średnicy 12 mm [20]. Częstotliwość robocza kontroli wynosi 1 kHz.

Kontrolę przeprowadzono po oczyszczeniu strefy wokół złącza spawanego. Na rysunku 1 przedstawiono schemat skanowania strefy złącza w metodzie ręcznej. Według metodyki kontroli należy ustalić PPW w odległości 10÷15 mm od granicy spoiny w punkcie B (2 na rys. 1).

Skręt PPW trzeba zorientować tak, aby otrzymać maksymalną czułość względem podłużnych do spoiny



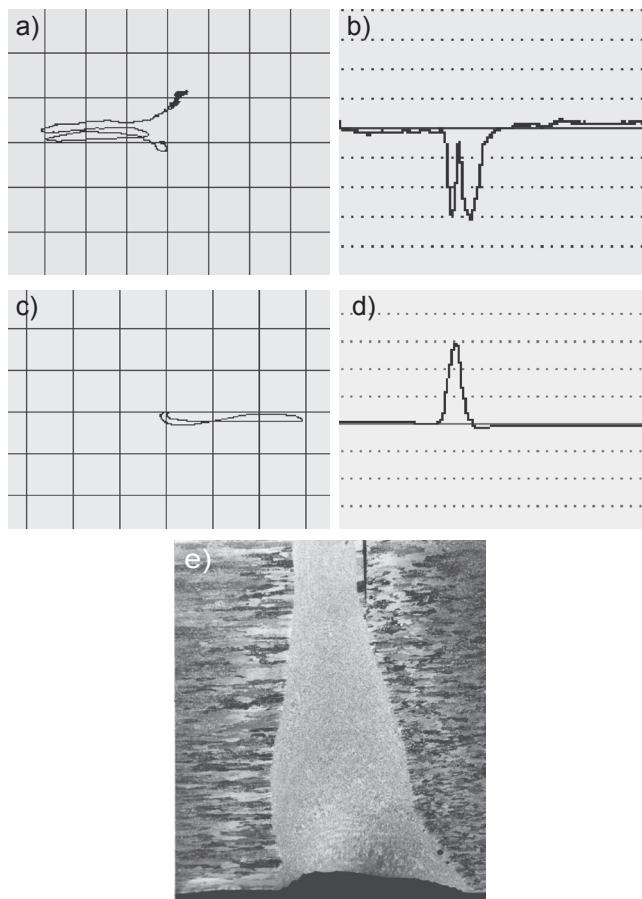
Rys. 1. Schemat skanowania strefy spoiny: 1 – zasięgi spoiny; 2 – położenie PPW przy przeprowadzaniu kompensacji dysbilansu; 3 – znak na korpusie PPW; 4 – zygzakowaty schemat skanowania; k_{sk} – krok skanowania; l_{sk} – szerokość strefy skanowania

Fig. 1. The scheme of the weld zone scanning: 1 – the boundaries of the weld joint; 2 – position of eddy current probe (ECP) during the unbalance compensation, 3 – the mark on the ECP case; 4 – zig-zag scanning scheme, k_{sk} – scanning step; l_{sk} – the width of the scanning area

defektów (znak 3 na korpusie PPW powinien być zorientowany w kierunku spoiny) i przeprowadzić kompensację dysbilansu sygnału PPW. Strefa spoiny skanowana jest po zygzakowatej trajektorii symetrycznie względem środka spoiny po kropkowanej linii 4 krokiem $k_{sk} = 1,0 \div 2,0$ mm (rys. 1). Szerokość strefy skanowania $l_{sk} = 20 \div 30$ mm.

Zaproponowana, efektywna metoda może być zrealizowana z stosowaniem współczesnych defektoskopów uniwersalnych (w szczególności WD 3-81 produkcji ukraińskiej [21]) z nowymi selektywnymi PPW [20]. Uniwersalne defektoskopy nowego typu umożliwiają przeprowadzenie kontroli w szerokim zakresie częstotliwości roboczej i obserwację sygnału PPW w płaszczyźnie kompleksowej lub ze skanowaniem czasowym, stosowanie filtrów różnego typu, rejestrowanie sygnałów w pamięci defektoskopu z możliwością ich dalszej obróbki i zachowania w pamięci komputera [21].

Poniżej przedstawiono wyniki, otrzymane w wyniku stosowania defektoskopu prądowirowego EddyMax, wyposażonego w PPW typu MDF 0801 [15, 20]. Na rysunku 2 przedstawiono sygnały PPW w płaszczyźnie kompleksowej (rys. 2a) i ze skanowaniem czasowym (rys. 2b) na ekranie defektoskopu przy skanowaniu wolnej od niezgodności strefy spoiny, czyli sygnały przeszkód uwarunkowane są niejednorodnością metalu. Na rysunkach 2c i 2d przedstawiono sygnały od defektu typu przyklejenie o głębokości 3 mm. Czulość defektoskopu w tym przypadku ustawiono o 24 dB niżej, aniżeli dla sygnału, przedstawionego na rysunkach 2a i 2b. Na rysunku 2d przedstawiono fotografię defektu, ujawnienie którego dla lepszej obserwacji powiększono przez odpowiednie odkształcenie i trawienie. Niezgodność tę zamodelowano technologicznie przez



Rys. 2. Sygnały przy skanowaniu wolne od niezgodności strefy spoiny (a, b), od defektu typu przyklejenie (c, d) i powierzchnia z defektem typu przyklejenie (e)

Fig. 2. Signal responses for flaw free weld zone scanning (a, b), for the no melted type defect (c, d) and the micro-section of the no melted type defect (e)

znikome odchylenie promienia wiązki elektronowej od styku, co odpowiada rzeczywistym defektom kontrolowanej konstrukcji.

Przedstawione wyniki pokazują efektywność PPW typu MDF 0801, ponieważ sygnał od spoiny wolnej od niezgodności jest o wiele mniejszy, aniżeli sygnał od defektu. Udało się to osiągnąć przez zmniejszenie bazy rozmieszczenia czujników pomiarowych. Sygnały uwarunkowane niejednorodnością spoiny i sygnały od defektu mają różny znak (rys. 2b i 2c), co upraszcza ich separację, podwyższa selektywność i wiarygodność kontroli.

Wyznaczenie metodą prądów wirowych strefy zmniejszenia wytrzymałości złączy spawanych

Przy spawaniu wyrobów ze stopów aluminium umocnionych cieplnie powstają dwa obszary: przetopiony metal i strefa wpływu ciepła, w której obserwuje się strefy pełnej lub częściowej rekrytalizacji [3]. Przy czym zmieniają się warunki optymalnej dla tego materiału obróbki cieplnej, co doprowadza do przemian struktury i pogorszenia właściwości mechanicznych. Wiadomo, że spawanie wiązką elektronową pozwala łączyć

stopu aluminium bez istotnego umocnienia [22]. Może to być powodem wysokiej prędkości procesu spawania, kiedy krzywa grzania i stygnięcia cyklu cieplnego nie przecina się z krzywami rozpadu roztworu stałego [23]. Jednak rozszerzenie strefy wpływu ciepła i, odpowiednio, strefy zmniejszenia wytrzymałości może nastąpić przy niezachowaniu odpowiednich warunków spawania, zwłaszcza przy konieczności ponownego spawania w miejscach ujawnionych niezgodności.

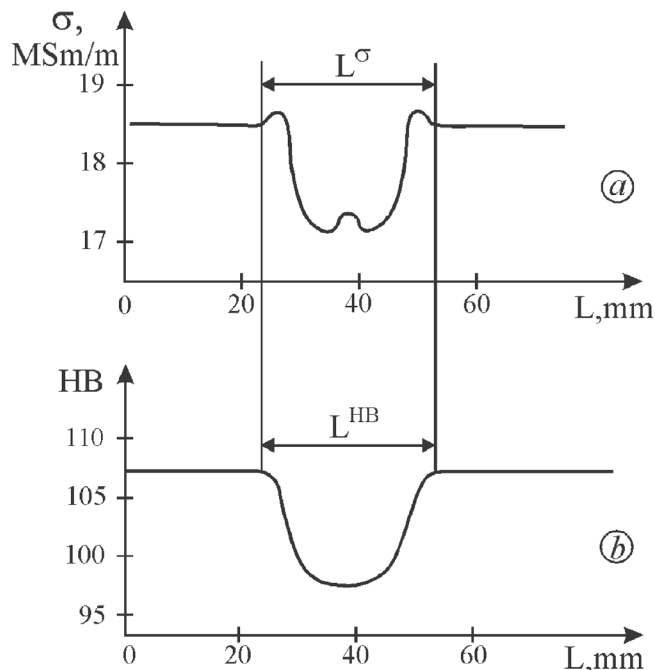
Tradycyjnym sposobem kontroli strefy wpływu ciepła jest analiza rozkładu twardości materiału w strefie wokół złączy spawanych. Z drugiej strony efektywna jest też kontrola rozmiarów strefy wpływu ciepła przez pomiar przewodności elektrycznej (PE) metodą prądów wirowych. Kontrola ta jest oparta na wzajemnym związku przemian właściwości wytrzymałościowych stopów aluminium i ich PE. Podobne podejście wykorzystuje się do wyznaczenia stref obniżenia wytrzymałości konstrukcji lotniczych po przegrzaniu, np. po pożarze [11].

Badania eksperymentalne połączeń spawanych stopu aluminium 1201 umocnionego cieplnie ujawniły związek między twardością i rozdziałem PE w strefie spoiny, co przedstawiono na rysunku 3. Analiza zależności pokazuje pełną odpowiedniość punktów, w których odbywa się przemiana PE i twardości. Rozmiary strefy obniżenia wytrzymałości można zatem kontrolować przez pomiar podziału PE z rejestracją zasięgu strefy, gdzie obserwuje się jej przemiany [10, 14]. Dokładne wyznaczenie strefy wpływu ciepła i odpowiedniego umocnienia materiału przy spawaniu (i po spawaniu) pozwoliło uzasadnić wybór szerokości strefy pogrubienia konstrukcji w różnych obszarach spoiny i zmniejszyć ogólną wagę konstrukcji bez obniżenia jej trwałości. Podobne sposoby stosuje się do diagnostyki złączy spawanych w różnych krajach. W pracy [23] przedstawiono zależność twardości i PE w strefie spoiny ze stopu aluminium 2014-T6. Przedstawione wyniki potwierdzają istotną niejednorodność strefy złącza spawanego zgodnie z pomiarami PE, co jest przyczyną przeszkód przy defektoskopii wiroprądowej (rys. 2a).

Do automatyzacji kontroli rozmiarów strefy wpływu ciepła i umocnienia połączeń spawanych ze stopów aluminium umocnionych cieplnie jest opracowany specjalny wiroprądowy strukturoskop „Strefa” [10]. Jego praca polega na nieprzerwanym pomiarze PE materiału podczas przemieszczania PPW prostopadle do złącza spawanego i późniejszym odzwierciedleniu przemian na ekranie matrycy wskaźnika. W strukturoskopie „Strefa” wykorzystuje się fazowy sposób pomiaru sygnału z automatyczną korekcją instrumentalnego błędu metodą miary wzorcowej.

Defektoskopia wiroprądowa złączy spawanych metodą łukową w osłonie argonu

W pracy [12] przedstawiono metodykę wiroprądowej kontroli złączy spawanych pojemników chemicznych z magnetycznej stali 12Kh18N10T i wyniki jej



Rys. 3. Zmiany PE (a) i twardości (b) stopu 1201 w poprzek połączenia spawanego, wykonanego spawaniem wiązką elektronową: L_{swc}^{σ} – strefa wpływu ciepła po pomiarach PE; L_{swc}^{HB} – strefa wpływu ciepła po pomiarach twardości

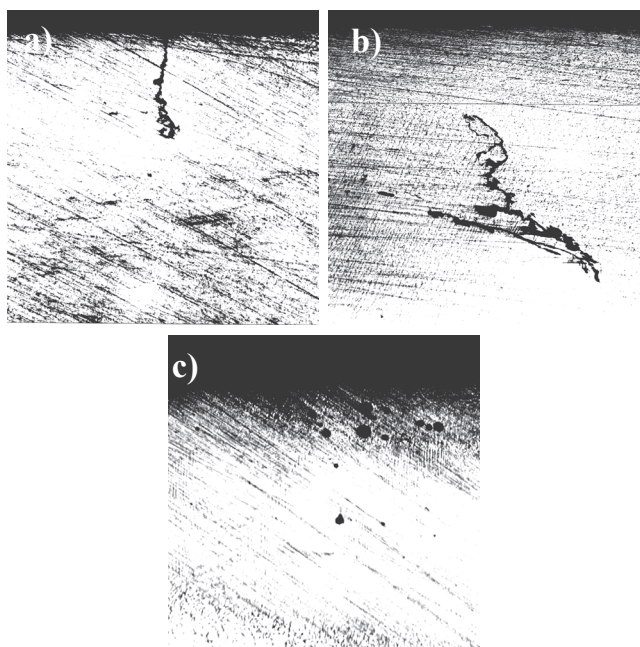
Fig. 3. Changes on conductivity (a) and hardness (b) near the electron-beam welding joints made of 1201 type alloy: L_{swc}^{σ} – heat-affected zone for conductivity changes; L_{swc}^{HB} – heat-affected zone for hardness changes

stosowania w przemyśle. Przewodnictwo elektryczne stali 12Kh18N10T wynosi 1,69 MSm/m. Zawartość ferromagnetycznej fazy λ – nie więcej niż 0,5%. Zawartość fazy λ w metalu spoiny może zwiększać się do 5%. Metodyka badań oparta jest na stosowaniu multidyferencjalnego PPW, co w połączeniu z amplitudowo-fazowym sposobem wydzielania pożytecznego sygnału pozwoliło obniżyć wpływ niejednorodności PE w strefie spoiny.

Kontrolę przeprowadzano bez usunięcia warstwy umocnienia o wysokości do 0,5 mm. W celu ujawnienia niezgodności podpowierzchniowych roboczą częstotliwość wybrano dość niską wynoszącą 1 kHz. Przy kalibrowaniu wykorzystano standardowe próbki ze spoiny z karbem o długości 20 mm, szerokości 0,6 mm i głębokości 0,4 mm do imitacji ciągłych niezgodności typu pęknięcie czy brak przetopu. Do imitacji lokalnych niezgodności typu pory czy wtrącenia żużla na próbce jest wykonywany otwór cylindryczny z płaskim dnem o średnicy 0,6 mm i głębokości 0,4 mm. Głębokość niezgodności wynosi 10% grubości kontrolowanej ścianki. W trakcie badania sprawdzane były obrobione wyniki wiroprądowej, kapilarnej kontroli i radiografii 1400 m złączy spawanych kontenerów i rurociągów. Zestawienia wyników pokazały, że wiarygodność ujawnienia niezgodności metodą wiroprądową wynosi: 0,886 dla przyklejeń; 0,794 dla porów i 0,824 dla wtrąceń żużla. Wskazuje to, że metoda wiroprądowa jest bardziej wrażliwa dla ciągłych niezgodności typu brak przetopu. Minimalna średnica ujawnionych porów wynosi 0,8 mm przy

maksymalnej głębokości zalegania do 2 mm. Przedstawione wyniki wskazują wysoką efektywność metody wiroprądowej przy kontroli konstrukcji spawanych i wrobów ze stali austenitycznej o grubości do 4 mm.

W pracy [9] rozwiązano ważny problem ujawniania powłok tlenkowych na złączach spawanych stopów aluminium AMG-6, wykonanych metodą łukową w osłonie argonu. Dla powłok tlenkowych jest charakterystyczny niski stopień ujawnienia i ich dowolna orientacja, co nie pozwala na stosowanie ultradźwięków lub badań rentgenowskich. Wyniki badań pokazały, że powłoki tlenkowe w warstwie wierzchniej można ujawniać metodą wiroprądową z zastosowaniem specjalnych multidyferencjalnych PPW z małą bazą rozmieszczenia czujników pomiarowych. Próg czułości kontroli odpowiadał otworowi o średnicy 0,5 mm i głębokości 0,5 mm. Kontrolę wiroprądową przeprowadzano dla częstotliwości roboczej 40 kHz z boku po stronie grani spoiny po usunięciu strefy umocnienia i oczyszczeniu. Przy opracowaniu metodyki kontroli wiroprądowej równolegle prowadzono kontrolę wizualną i rentgenowską. Do wyznaczenia progu czułości przy ujawnieniu naturalnych niezgodności wykorzystywano analizę metalograficzną. Na rysunku 4 przedstawiono powierzchnie stref spoiny z ujawnionymi niezgodnościami. Ustalono, że metoda wiroprądowa pozwala ujawniać powłoki tlenkowe o grubości powyżej 0,5 mm, a w poszczególnych przypadkach nawet 0,3 mm (rys. 4a). Poza tym pozwala ona ujawniać podpowierzchniowe powłoki tlenkowe o głębokości do



Rys. 4. Defekty złączy spawanych, ujawnione metodą wiroprądową: a – powierzchniowa powłoka tlenkowa o grubości 0,3 mm i pęknięcie o szerokości 0,03 mm; b – podpowierzchniowa powłoka tlenkowa o rozmiarze 1,2 mm na głębokości 0,5 mm; c – skupisko porów o średnicy 0,04 mm na głębokości 0,15 mm

Fig. 4. Defects in weld joints detected by eddy current method: a – surface oxide film of 0.3 mm and 0.03 mm opening; b – subsurface 1.2 mm size oxide at a 0.5 mm depth; c – the cluster of the 0.04 mm diameter pores at a 0.15 mm depth

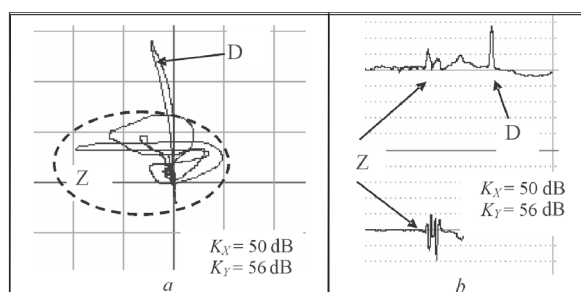
0,5 mm (rys. 4b), w tym zavalcowane przy oczyszczaniu powierzchni. Co więcej, możliwe jest ujawnianie porów przypowierzchniowych o średnicy powyżej 0,5 mm i ich skupisk o mniejszej średnicy (rys. 4c).

Należy podkreślić, że przedstawiona technologia pozwala ujawniać tylko przypowierzchniowe powłoki tlenkowe na głębokości do 0,5 mm. Ujawnianie powłok tlenkowych zalegających głębiej nie stanowiło przedmiotu prowadzonych badań. Zatem, do przeprowadzenia NDT wybrano metodę, która na częstotliwości roboczej 40 kHz ma stosunkowo niską głębokość kontroli. Ujawnienie za jej pomocą niezgodności na głębokości powyżej 0,5 mm jest problematyczne, co potwierdzono wynikami współczesnych badań [8]. Wyniki wskazują przydatność metody wiroprądowej do ujawnienia powłok tlenkowych w konstrukcjach spawanych ze stopów aluminium.

Wykonano badania dotyczące NDT końcowych złączy spawanych pojemników paliwowych ze stopu aluminium AMG-6, których z powodu braku dwustronnego dostępu nie można skontrolować metodą rentgenowską. W tym wypadku należy ujawniać nie tylko przypowierzchniowe powłoki tlenkowe, lecz i wewnętrzne defekty (pory, przyklejenia, pęknięcia) zalegające na głębokości do 2÷3 mm.

Badanie możliwości ujawnienia wewnętrznych niezgodności złączy spawanych w warunkach działania przeszkód przeprowadzono za pomocą uniwersalnego komputerowego systemu kontroli wiroprądowej na bazie systemu typu EddyMax. Badania wykazały, że przy nieobecności charakterystycznych dla spoiny szumów współczesne PPW pozwalają ujawniać defekty typu pęknięcie o długości 2 mm przy głębokości ich zalegania do 6 mm. Jednak przeszkody te mogą istotnie (w 2 przypadkach) ograniczyć głębokość kontroli.

Badania na próbkach z rzeczywistej spoiny wykazały, że amplituda sygnału od defektu o głębokości zalegania 3 mm niewiele przekracza poziom szumów, uwarunkowanych niejednorodnością geometrii spoiny nawet po usunięciu wzmocnienia. Na rysunku 5 przedstawiono sygnały od defektu $h_z = 3$ mm (oznaczone literą D), które można zestawić z sygnałami od przeszkód (obwiedzono linią przerywaną i oznaczono literą Z). Oprócz sygnałów w kompleksowej



Rys. 5. Sygnały przeszkód i defektu z głębokością zalegania $h_z = 3,0$ mm: a – płaszczyzna kompleksowa; b – sygnał z tymczasowym rozszerzeniem

Fig. 5. Eddy current probe signal responses for the subsurface defect with depth of bedding $h_z = 3.0$ mm: a – in the complex plane, b – in time base mode

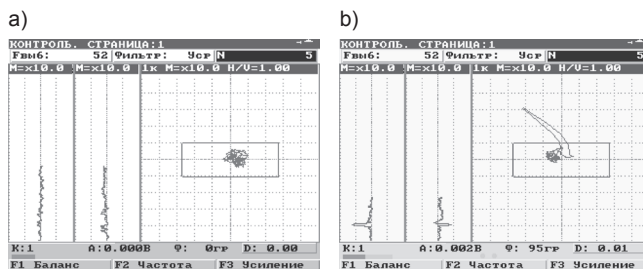
płaszczyźnie na rysunku 5b jest zapisana pionowa (z góry) i pozioma (od spodu) składowa sygnału z rozszczepieniem tymczasowym.

Przy wybranym powrocie płaszczyzny kompleksowej ($h_z = 3$ mm) jest efektywne stosowanie różnego powiększenia wzdłuż pionowej i poziomej osi. W omawianym przypadku powiększenie K_y wzdłuż pionowej osi ustalono na 6 dB powyżej powiększenia K_x wzdłuż osi poziomej. Widoczne jest, że pionowa składowa sygnału od defektu w przybliżeniu o 6 dB przekracza sygnały od szumów, szczególnie przy pionowej składowej sygnału ze skanowaniem czasowym (rys. 5b z góry). Taka współzależność sygnał-szum jest uważana za dostateczną dla wiarygodnego ujawnienia defektu.

Przedstawione na rysunku 5 sygnały pokazują możliwość separacji użytecznych sygnałów od defektu z $h_z = 3,0$ mm od sygnałów szumów na podstawie odmienności fazy tych sygnałów, ponieważ sygnały od szumów tłumią się w płaszczyźnie kompleksowej w kierunku poziomym, charakterystycznym dla niezgodności powierzchniowych.

Na podstawie przeprowadzonych badań opracowano metodykę, która przewiduje stosowanie defektoskopu wiroprowadowego WD 3-81 [21], a przeprowadzenie kontroli jest możliwe w dwóch kierunkach za pomocą dwóch różnych PPW. Tryb główny przewiduje kontrolę za pomocą urządzenia Leotest MDF 0803 przy dwóch częstotliwościach roboczych: niskiej częstotliwości 1,2 kHz (kanał 1 defektoskopu) i średniej częstotliwości 12 kHz (kanał 2). Przy czym na ekranie defektoskopu obserwuje się sygnały niskiej częstotliwości (1,2 kHz) i jednocześnie za pomocą automatycznej sygnalizacji defektu uwidacznia się przekroczenie poziomu sygnału o częstotliwości 12 kHz. Gdy to konieczne, operator może przeprowadzić ponowne skanowanie strefy kontroli i dokonać obserwacji przy częstotliwości 12 kHz. Więc, w trybie głównym zapewnia się ujawnienie niezgodności podpowierzchniowych zalegających na głębokości do 2,5 mm, przy roboczej częstotliwości 1,2 kHz z jednoczesną rejestracją niezgodności powierzchniowych i przypowierzchniowych na głębokości do 0,5÷1,0 mm. Dodatkowy proces przewiduje kontrolę za pomocą PPW typu Leotest MDF 0603 przy częstotliwości roboczej 18 kHz. Przy stosowaniu wyższej częstotliwości PPW ma większą czułość i rozdzielczość przy ujawnianiu niezgodności powierzchniowych i podpowierzchniowych. Przy czym lepiej tłumione są przeszkody związane z niejednorodnością i geometrią spoiny. Zakres kontroli pod względem głębokości odbywa się przez odpowiedni wybór PPW o mniejszych rozmiarach i wyższej częstotliwości roboczej, co z kolei jest ograniczone głębokością warstwy powierzchniowej do 0,5 mm. Dodatkowe warunki są zalecane dla stref spoiny ze złą obróbką powierzchni, kiedy możliwość pracy w kierunku głównym jest ograniczona.

Na rysunku 6 przedstawiono sygnały przeszkód, otrzymane przy skanowaniu wolnej od niezgodności strefy spoiny, i sygnały od defektu typu przyklejenie, zalegające na głębokości 2 mm od powierzchni.



Rys. 6. Sygnały od spoiny wolnej od niezgodności (a) i podpowierzchniowego defektu typu przyklejenie o głębokości zalegania $h_z = 2,0$ mm (b) na ekranie defektoskopu WD 3-71

Fig. 6. Signals from a defect-free weld (a) and sub-surface defects such as lack of fusion with the depth of bedding $h_z = 2,0$ mm on the flaw detector WD 3-71

Defekt typu przyklejenie jest imitowany przecięciem o grubości 0,5 mm po niekontrolowanej stronie spoiny. Do imitacji sygnałów od przeszkód wybrano najbardziej niesprzyjające (dla przeprowadzania kontroli) próbki z dużym przesunięciem krawędzi, w wyniku czego po usunięciu wzmocnienia obserwuje się dużą krzywiznę powierzchni.

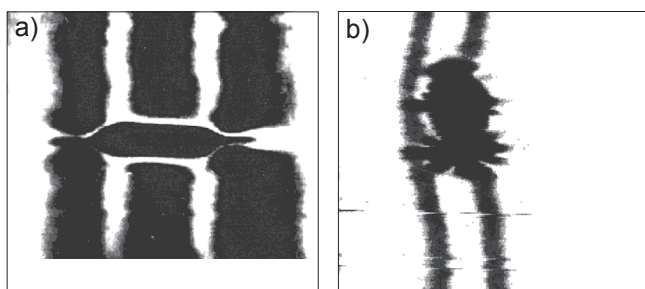
Metodyka czasowej kontroli wiroprowadowej końcowych spoin obejmuje sprawdzenie doświadczalno-przemysłowe w warunkach produkcji. Przypuszcza się, że stanie się ona elementem kompleksowych NDT złączy spawanych, przy których wysoka czułość metody wiroprowadowej przy ujawnieniu niezgodności w warstwie podpowierzchniowej o grubości do 3 mm będzie porównywalna z zaletami metody ultradźwiękowej przy ujawnieniu niezgodności na większej głębokości.

Dwuwymiarowa wizualizacja wyników kontroli wiroprowadowej złączy spawanych

Do kontroli niejednorodnych obiektów, do których zaliczają się połączenia spawane, może być efektywnie stosowana dwuwymiarowa wizualizacja wyników kontroli [19, 25]. Przewaga kontroli wiroprowadowej z wizualizacją wyników wynika ze zdolności ludzkiego oka do rozpoznawania nieregularności obrazu przez porównanie różnych jego obszarów. Tradycyjna aparatura do realizacji metody prądów wirowych nie pozwala na bezpośrednie otrzymanie dwuwymiarowego wykresu, odzwierciedlającego przestrzenny podział pola elektromagnetycznego prądów wirowych w kontrolowanym obiekcie. Do tego celu należy zastosować skanowanie kontrolowanej powierzchni z rejestracją i powiązaniem sygnału kontrolowanego ze współzrędną bieżącą PPW i z późniejszym przedstawieniem uzyskanych wyników w postaci obrazu dwuwymiarowego.

Jedno z pierwszych rozwiązań zadania dwuwymiarowej wizualizacji wyników kontroli wiroprowadowej otrzymano w Fizyczno-Mechanicznym Instytucie im. G.W. Karpieńki Państwowej Akademii Nauk we Lwowie [19]. Półtonową wizualizację zrealizowano metodą analogową, do czego wykorzystano odbiorczą część serijnego aparatu foto-telegraficznego. Takie aparaty zabezpieczają rejestrację obrazów na elektrochemicznym

papierze za pomocą zapisującej spiralnej elektrody, której pracę synchronizowano z przemieszczeniem postępowym urządzenia skanującego. Do defektoskopii ciągłych złączy spawanych detali wielkogabarytowych ze stopów aluminium opracowano przemysłowe urządzenie WICHR-FT [18]. Urządzenie składało się z defektoskopu wiroprowadowego DUET-C z nakładanym PPW, skanującym z blokiem sterowania aparatu foto-telegraficznego. Skanujące urządzenie zabezpieczało poprzeczne skanowanie liniowe strefy spoiny, synchronizowane z obiegiem spirali zapisującej aparatu foto-telegraficznego. Szerokość strefy kontroli wynosiła 75 mm. Na rysunku 7a przedstawiono dwuwymiarowy defektogram półtonowy kontroli spoiny z szerokością strefy spawania w przybliżeniu 10 mm, wykonanego w procesie spawania elektrołukowego płyt ze stopu aluminium AMG-6. W płycie za pomocą maszyny do badań zmęczeniowych wykonano poprzeczne pęknięcie powierzchniowe o długości 15 mm. Robocza częstotliwość kontroli wynosiła 8 kHz. Na rysunku 7b przedstawiono defektogram spoiny, wykonanej spawaniem wiązką elektronową z ciągłym defektem typu przyklejenie (rys. 2) [26].



Rys. 7. Wizualizacja wiroprowadowa przy kontroli złączy spawanych: a) spawanie elektrołukowe z pęknięciem poprzecznym; b) spawanie wiązką elektronową z przyklejeniem

Fig. 7. Eddy current visualization in the control of welds: a) arc welding with a transverse crack; b) electron-beam welding with lack of fusion.

Przy tworzeniu defektogramów dwuwymiarowych wykorzystuje się tryb pozytywny, przy którym optyczna wartość szernienia papieru elektrochemicznego jest proporcjonalna do amplitudy sygnału defektoskopu. Widać, że za pomocą półtonów dwuwymiarowych na defektogramach udaje się rozpoznawać pewnie defekt na tle sygnału, uwarunkowanego niejednorodnością materiału spoiny, która ma charakter systematyczny (zależnie od typu i szerokości spoiny – dwie lub trzy ciemne smugi). Na rysunku 7 widać również wykrzywienie spoiny wskutek technologicznego ugięcia wiązki. Stosowanie wizualizacji pozwoliło zbliżyć metodę wiroprowadową do rentgenowskiej i uzyskać dokumentację kontroli. Wadami opisanego powyżej analogowego systemu są: niska wydajność, ograniczona szybkość obiegu zapisującej spirali, masa aparatury i brak możliwości stosowania współczesnych algorytmów obróbki obrazów. Tych usterek są pozbawione współczesne cyfrowe systemy automatyzowanego KN, które pozwalają rejestrować dwuwymiarowe



Rys. 8. Dwuwymiarowy defektogram kontroli spoiny
Fig. 8. Two-dimensional defectogram weld inspection

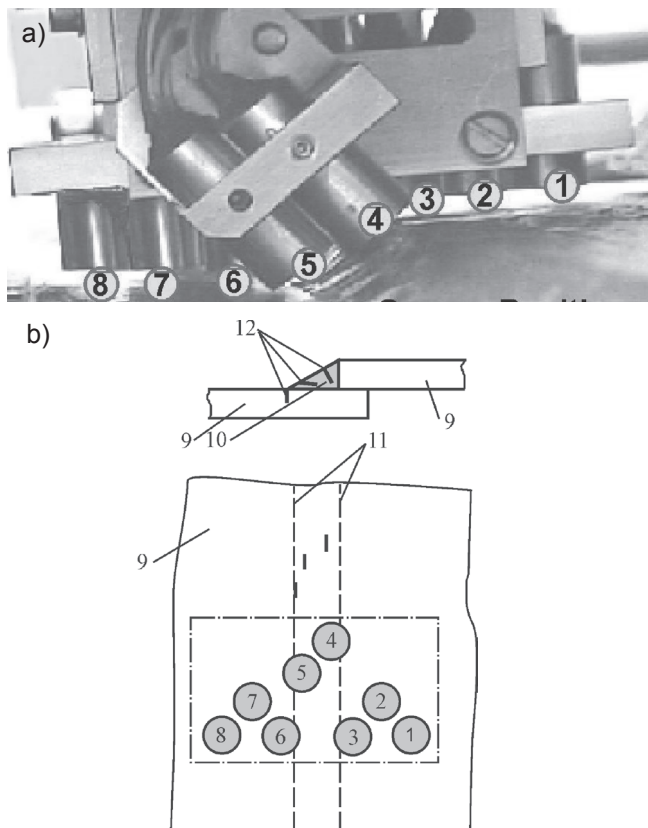
defektogramy za pomocą komputera [25]. Na rysunku 8 przedstawiono dwuwymiarowy półtonowy defektogram kontroli wiroprowadowej spoiny z trzema pęknięciami, rozmieszczonymi pośrodku spoiny i po obu jej stronach. Wyniki uzyskano przy częstotliwości roboczej 20 kHz za pomocą komputerowego systemu kontroli wiroprowadowej i PPW typu Leotest MDF 1201 [27].

Nowe perspektywy kontroli wiroprowadowej spoin odzwierciedlają metody tomografii wiroprowadowej, które pozwalają na obserwację położenia defektu nie tylko na kontrolowanej powierzchni, ale i w pionowym przekroju obiektu kontroli [28].

Kontrola wiroprowadowa spoin konstrukcji spawanych z materiałów ferromagnetycznych

Rozpatrzone powyżej metodyki przewidują skanowanie strefy spoiny wzdłuż linii i zygzakami. Produkcyjną kontrolę mogą zabezpieczyć wielokanałowe systemy kontroli wiroprowadowej, które dosyć łatwo mogą być realizowane za pomocą standardowych uniwersalnych defektoskopów. W szczególności, defektoskop wiroprowadowy OKO-01 produkcji ukraińskiej pozwala zbudować 16-kanałowy system kontroli [21]. Takie podejście było wykorzystane przez niemiecką firmę Test Maschinen Technik, która stworzyła dwa warianty wielokanałowych zmechanizowanych urządzeń do ujawnienia wad i niezgodności w strefie złącza spawanego przez warstwę ochronnej powłoki o grubości do 3 mm. Jeden wariant jest przeznaczony do kontroli wielościęgowych złączy spawanych, drugi – dla kątowych złączy spawanych. W tych przypadkach blok z 8 – multidyferencjalnych PPW typu MDF [20] pokrywa całą strefę kontroli (spoinę i strefę wpływu ciepła). Metodyka kontroli przewiduje tylko postępujące przemieszczenie bloku PPW wzdłuż spoiny. Ważną właściwością wykorzystywanych PPW jest ich dosyć duża czułość do wykrywania niezgodności przy obecności dielektrycznej powłoki lub odstępu między PPW i kontrolowaną powierzchnią. Na przykład, sygnał od pęknięcia głębokości 0,5 mm przy kontroli przez powłokę o grubości 7 mm przekracza poziom szumów o więcej niż 12 dB [29].

Na rysunku 9a przedstawiono blok PPW do kontroli połączeń, otrzymanych spawaniem wielościęgowym. Widać, że PPW jest umieszczony pod różnym kątem w celu zabezpieczenia normalnego położenia PPW względem kontrolowanej spoiny. Na rysunku 9b pokazano rozmieszczenie PPW, przy którym osiąga się pełne

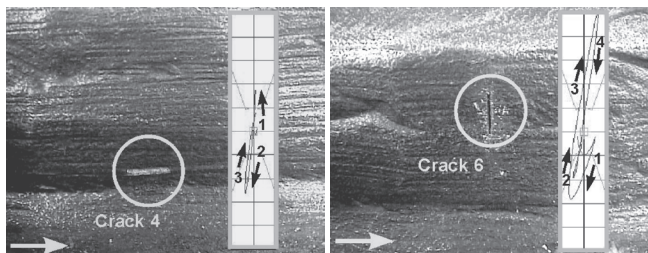


Rys. 9. Blok PPW do kontroli spoin wielościęgowych (a) i rozmieszczenie PPW względem spoiny (b): 1+8 – PPW; 9 – spawane płyty; 10 – spoina; 11 – zasięgi spoiny; 12 - defekty sztuczne.

Fig. 9. Block ECP (a) to control the seam welded „overlap”, and the location relative to the GSP weld (b): 1+8 – ECP; 9 – welded plates; 10 – weld; 11 – boundaries of the weld; 12 - artificial defects

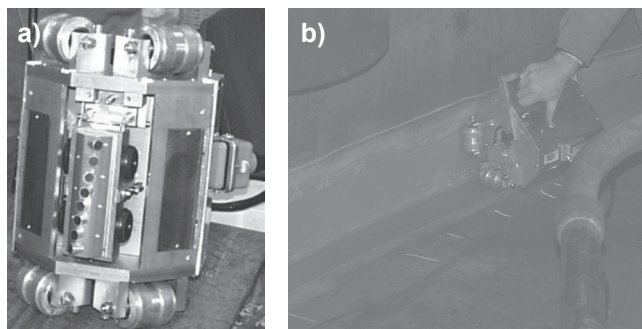
pokrycie strefy spoiny i strefy wpływu ciepła. Na rysunku 9b pokazano również rozkład sztucznych niezgodności o różnej orientacji, wykorzystywanych do sprawdzenia efektywności pracy systemu kontroli. Defekty wykonano frezem o grubości 0,3 mm na głębokość 2 mm i o długości od 2 do 4 mm.

Na rysunku 10 przedstawione fragmenty spoiny z podłużnym (a) i poprzecznym (b) defektem typu pęknięcie (obwiedzione kołem) z odpowiednimi sygnałami w płaszczyźnie kompleksowej. Strzałkami pokazano kolejność przemiany sygnału od defektu przy skanowaniu wzdłuż spoiny.



Rys. 10. Obraz strefy spoiny z podłużnym (a) i poprzecznym (b) defektem typu pęknięcie i odpowiednie sygnały PPW

Fig. 10. The images of welding zone with longitudinal (a) and transversal (b) with crack type defect and appropriated ECP signal responses



Rys. 11. Widok kanałowego skanera do kontroli kątowych złączy spawanych: a – wygląd ze strony PPW; b – kontrola narożnej spoiny od wnętrza pojemnika (rezerwuaru)

Fig. 11. Eight channel scanner for fillet weld inspection: a – the view from ECP side; b – the inspection of fillet weld inside the tank

Na rysunku 11a przedstawiono skaner dla kontroli narożnych spoin. Widać osiem PPW typu MDF 1201, które są rozmieszczone pod różnym kątem (skrajne PPW jest obrócone o 90°) celem kontroli całego przecięcia spoiny, i nakierowujące wrotki do skanowania wzdłuż spoiny narożnej. Na rysunku 11b pokazano skaner, ustawiony w strefie narożnej spoiny przy dnie pojemnika (rezerwuaru). Obecność nakierowujących wrotek upraszcza operację przemieszczania skanera wzdłuż spoiny.



Rys. 12. Przeprowadzenie defektoskopii wiroprądowej złączy spawanych podwodnej części konstrukcji morskich

Fig. 12. The eddy current inspection of weld in underwater marine structures

We współczesnej praktyce powstaje konieczność prowadzenia kontroli złączy spawanych w niezwykle trudnych warunkach, w tym i pod wodą. Problem rozwiązuje się za pomocą metody wiroprądowej, ponieważ na jej czułość nie wpływają zabrudzenia i płyny na kontrolowanej powierzchni oraz w pustce niezgodności. Firma Test Maschinen Technik opracowała specjalistyczny przyrząd DC-UW-20, który jest przeznaczony do podwodnych inspekcji spoin konstrukcji ze stali węglowych. Dostyc przekonującym potwierdzeniem tego jest rysunek 12, na którym operator-nurek przeprowadza defektoskopię spoin podwodnej części morskiej platformy naftowej.

Wnioski

1. Metoda wiroprądowa może być pomyślnie zastosowana dla NDT spoin, w szczególności, dla oceny przemian strukturalnych i ujawnienia powierzchniowych i podpowierzchnowych wad i niezgodności.
2. Kontrola wiroprądowa spoin komplikuje się szumami, uwarunkowanymi niejednorodnością przewodności elektrycznej i naruszeniami geometrii.
3. Dla defektoskopii spoin perspektywiczne są selektywne PPW typu multidyferencjalnego. Dla wytłumienia przeszkód uwarunkowanych niejednorodnością spoiny, efektywne jest stosowanie PPW z małą bazą rozmieszczenia punktów pomiarowych.
4. Przy defektoskopii wiroprądowej spoin efektywne jest użycie dwuwymiarowej wizualizacji wyników kontroli.
5. Wydajność kontroli wiroprądowej spoin może być podniesiona stosowaniem wielokanałowych systemów, które wyłączają poprzeczne skanowanie strefy spoiny.
6. Metoda wiroprądowa pozwala przeprowadzać kontrolę w niezwykle trudnych warunkach, w tym zrealizować defektoskopię złączy spawanych podwodnej części konstrukcji morskiej.
7. Dla szerokiego wdrożenia metody wiroprądowej NDT spoin należy stworzyć normatywną bazę. W szczególności, w najbliższym czasie docelowo przeprowadzić harmonizację odpowiednich europejskich standardów.

Literatura

- [1] Paton B.Je., Lasków G.I., Zywago L.I.; Specyfika utworzenia spoiny przy spawaniu wiązka elektronowa// Spawanie automatyczne, 1973, N 3, s.1+5.
- [2] Ignatjew W.G., Rabkin D.M.; Ocena trwałości aluminium i jego stopów przeciw utworzeniu gorących pęknięć, Spawanie aluminium stopów kriogenicznego i ogólnego przeznaczenia, Pod red. D.M. Rabkina, Kijow: Naukowa Dumka, 1984, s.4+9.
- [3] Sazonow Ju.I. Problemy diagnostyki technicznej spawania wiązką elektronową, Defektoskopia, 2006, N 12, s.70+88.
- [4] Troickij W.A., Radko W.P., Demidko W.G.; Defekty połączeń spawanych i środka ich ujawnienia, Kijow: Wyższa szkoła, 1983, s.144
- [5] Troickij W.A., Demidko W.G.; Tendencje rozwoju teorii i praktyki kontroli nie niszczącej połączeń spawanych.- Spawanie aluminium stopów kriogenicznego i ogólnego przeznaczenia, Pod red. D.M. Rabkina, Kijow: Naukowa Dumka, 1984, s.143+148.
- [6] Troickij W.A.; Kontrola magneto proskowa połączeń spawanych i detali maszyn, Kijow: Feniks, 2002, s.300
- [7] Kontrola nie niszcząca. W 5 t. T.2 Akustyczne metody kontroli: poradnik, I.N. Jermolajew, N.P. Aljoszin, A.I.Potapow; Pod red. W.W.Suchorukowa., Moskwa: Wyższa szkoła, 1991, s.283
- [8] Badanie przetworników wiroprądowych dla ujawnienia niezgodności złączy spawanych cienkościennych elementów konstrukcji kosmicznych, Uczanin W.M., Cichy B.Г., Kiriczenko I.I. Elektromagnetyczna, akustyczna i optyczna kontrola materiałów i wyrobów, Seria: Fizyczne metody i środki kontroli środowisk, materiałów i wyrobów, Lwów: Fizyko-Mechaniczny Instytut imienia G.W.Karpienki Państwowej Akademii Nauk, 2006, Wyp. 11, s.123+126.
- [9] Stosowanie przyrządów wiroprądowych dla ujawnienia tlenkowych powłok w spoinach spawanych wyrobów ze stopów aluminium, A.Ja. Teterko, Uczanin W.M., B.M. Rybakow, L.N. Jemeljanowa, Diagnostyka techniczna i kontrola nieniszcząca, 1989, N 2, s.66+68.
- [10] Teterko A.Ja., Nazarczuk Z.T. Selektowna wiroprądowa defektoskopia, Lwów: Fizyko-Mechaniczny Instytut imienia G.W.Karpienki Państwowej Akademii Nauk, 2004, s.248
- [11] Mechanika pęknięcia i wytrzymałość materiałów: Poradnik Pod red. W.W.Panasnyuka, t. 9 : Wytrzymałość i długo trwałość materiałów awiacyjnych i elementów konstrukcji O.P. Ostasz, W.M. Fedirko, Uczanin W.M. i in., Lwów: Spolom, 2007, s.1068
- [12] Właściwości kontroli wiroprądowej styków połączeń spawanych pojemności sprzętu chemicznego ze stali austenitowych, Z.A. Bernik, B.I. Kolidij, Uczanin W.M., A.A. Orłowski, Fizyko-chemiczna mechanika materiałów, 1989, N 4, s.113+115.
- [13] Uczanin W.M.; Metoda wiroprądowa ujawnienia niezgodności w spoinach konstrukcji spawanych z nieferromagnetycznych, Kontrola nie niszcząca i system kierowania jakością połączeń spawanych i lutowanych, Moskwa: CRDZ, 1992, s.59+64.
- [14] Rybaczuk W. G.; Elektromagnetyczna metoda kontroli nie niszczącej strefy cieplnego wpływu złączy spawanych wyrobów aluminium, Fizyko-chemiczna mechanika materiałów, 1991, N 1, s.107+109.
- [15] Wyznaczenie możliwości ujawnienia niezgodności złączy spawanych kosmicznych konstrukcji w warunkach działania przeszkód, Uczanin W.M., W.G. Tychyj, M.W. Chomczenko, I.I. Kyryczenko, Fizyczne metody i środki kontroli środowisk, materiałów i wyrobów, Lwów: FMI PAN, 2008, Wyp.13, s.20+26.
- [16] Assler H. Design of Aircraft Structure under Special Consideration of NDT, 9th Europ. Conf. for NDT, Berlin. 2006 (www.ndt.net, 2006, Vol. 11, N 11).
- [17] Teterko A.Ja., Uczanin W.M. Opracowanie środków kontroli wiroprądowej spoin konstrukcji spawanych ze stopów aluminium, Metody kontroli nieniszczącej w gospodarce narodowej, Ryga: NIINTI Łotwy, 1986, s.42+44.
- [18] Ustawienie automatyzowanej kontroli wiroprądowej złączy spawanych, Teterko A.Ja., L.F. Jakowlew, Uczanin W.M., Informacja Lwowskiego CNTI N 86-068, Lwów, 1986, 4 s.
- [19] Teterko A.Ja., Uczanin W.M. Defektoskopia wiroprądowa złączy spawanych z zastosowaniem półtonowej indykcji, Diagnostyka i prognozowanie niszczenia konstrukcji spawanych, 1988, Wyp. 6, s.69+72.
- [20] Uczanin W.M. Przetwornicy wiroprądowe multy dyferencjalne i ich stosowanie, Diagnostyka techniczna i kontrola nieniszcząca, 2006, N 3, s.34+41.
- [21] Uniwersalne defektoskopy wiroprądowe OKO-01 i WD 3-71 i ich stosowanie dla ujawnienia utajonych niezgodności w węzłach nie rozłączanych techniki lotniczej, Uczanin W.M., Łucenko Г.Г., Dzaganian A.W. i in. Prace konferencyjne 9j Konferencji „Kontrola nie niszcząca”, Kijów, 2007, s.139+146.
- [22] Bondarew A.A. Stan techniki i przewag procesu spawania wiązka elektronowa konstrukcji ze stopów aluminium, Spawanie aluminium stopów kriogenicznego i ogólnego przeznaczenia, Pod red. D.M. Rabkina, Kijow: Naukowa Dumka, 1984, s.10+19.
- [23] Rabkin D.M., Woropaj N. M., Bondarew A.A.; Właściwości spawania wiązka elektronowa stopów aluminium, Spawanie automatyczne, 1971, N 2, s.48+52.
- [24] Nondestructive Testing Handbook. Vol.4: Electromagnetic Testing (Eddy current, flux leakage and Microwave Nondestructive Testing). Second edition. Edited by R.C. McMaster and P.McIntire. USA: American Society for NDT, 1986, s.677
- [25] Mok G., Uczanin W.M. Wizualizacja wyników kontroli nie niszczącej metodą wiroprądową, Fizyczne metody i środki kontroli środowisk, materiałów i wyrobów, Lwów: FMI PAN, 2000, Wyp. 5, s.9+16.
- [26] Uczanin W.M. Badanie i opracowanie metody wiroprądowej i środków ujawnienia i oceny niezgodności w materiałach detali maszyn latających : Autoreferat pracy doktorskiej: 05.02.11 /CNIITMASH, Moskwa, 1982, s. 21
- [27] Uczanin W.M. Defektoskopia wiroprądowa elementów konstrukcji, Fizyko-chemiczna mechanika materiałów, 2006, N4, s. 66+73.
- [28] Subsurface imaging by deep penetrating eddy current tomography, A. Verity, S. Gavrilov, V. Uchanin et al, 10-th Intern. Workshop on Electromagnetic Nondestructive Evaluation. Michigan, USA, 1-2 June 2004, s. 91+92.
- [29] Uczanin W.M. Stosowanie metody wiroprądowej dla ujawnienia niezgodności w materiałach ferromagnetycznych przez warstwę powłoki ochronnej, Materiały jedenastej corocznej międzynarodowej konferencji „Współczesne metody i środki kontroli nieniszczącej i diagnostyki technicznej”, Jałta, 2003, s.180+182.