

Tomasz GIESKO*, **Adam PIETRAS****, **Jordan MEŻYK***,
Szymon KOWIESKI**

* Instytut Technologii Eksploatacji – Państwowy Instytut Badawczy, Radom

** Instytut Spawalnictwa, Gliwice

KONCEPCJA SYSTEMU WIZYJNEGO DO MONITOROWANIA PROCESÓW ZGRZEWANIA TARCIOWEGO

Słowa kluczowe

Zgrzewanie tarciove FSW, kontrola jakości, optyczna inspekcja, analiza termograficzna.

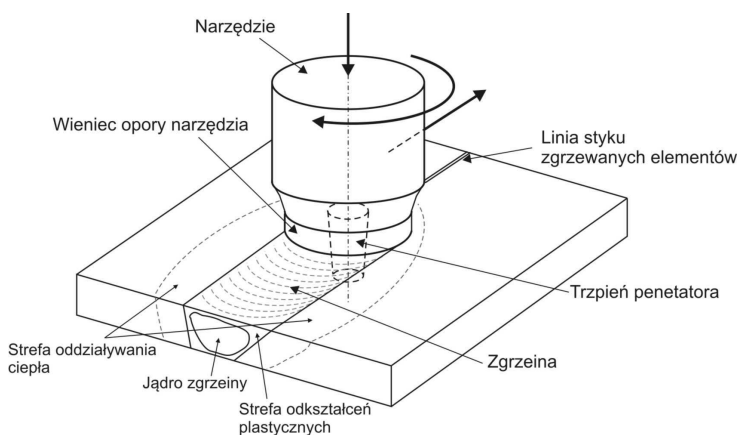
Streszczenie

W artykule zaprezentowano koncepcję metody i systemu do monitorowania procesów zgrzewania tarciovego FSW z wykorzystaniem analizy obrazów w podczerwieni i paśmie widzialnym. Termogramy pokazujące rozkład i zmiany temperatury w obrębie zgrzeiny zawierają kompleksowe informacje o przebiegu procesu zgrzewania tarciovego oraz o strukturze zgrzeiny. Połączona analiza obrazów zgrzeiny, zarejestrowanych za pomocą kamery termowizyjnej i kamery wizyjnej umożliwi monitorowanie on-line procesu zgrzewania tarciovego oraz detekcję wad powierzchniowych i podpowierzchniowych zgrzeiny. W artykule omówiono najważniejsze zagadnienia modelowania systemu wizyjnego i algorytmu inspekcji.

Wprowadzenie

Technologia zgrzewania tarciovego z mieszaniem materiału FSW (ang. Friction Stir Welding) została opracowana i opatentowana przez The Welding Institute (TWI) w 1991 roku [16], znajdując szybko liczne zastosowania w róż-

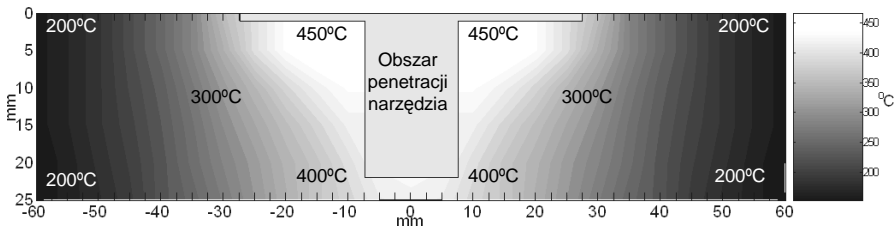
nych gałęziach przemysłu, gdzie wymaga się wykorzystania innowacyjnych technologii wytwarzania. Jest to metoda łączenia materiałów przez ich mieszanie, po doprowadzeniu do stanu uplastycznienia za pomocą odpowiedniego narzędzia. W efekcie ruchu obrotowego narzędzia następuje lokalny wzrost temperatury materiału a następnie jego uplastycznienie, wzajemne wymieszanie i połączenie materiałów obu łączonych elementów (rys. 1). Jednoczesny ruch obrotowy i liniowy narzędzia wzdłuż styku obu elementów powoduje powstanie zgrzeiny i trwałe ich połączenie. W procesie zgrzewania nie występuje przejście materiału ze stanu stałego w stan ciekły, ograniczając tym samym problemy występujące w innych metodach łączenia materiałów, takich jak zmiany objętości, kształtu materiału czy absorbowanie gazów przez spoinę. Proces FSW, w porównaniu ze spawaniem łukowym, charakteryzuje się niższą temperaturą, co przyczynia się do znaczącej redukcji odkształceń oraz naprężeń, dając w efekcie zwiększoną odporność zmęczeniową [11,13].



Rys. 1. Schemat prezentujący zgrzewanie metodą FSW

Do podstawowych parametrów procesu zgrzewania metodą FSW należą: prędkość obrotowa narzędzia, prędkość ruchu postępowego narzędzia, siła docisku narzędzia, kąt nachylenia narzędzia w stosunku do powierzchni zgrzewanych detali. Istotne znaczenie ma także typ narzędzia oraz jego kształt i wymiary. Bezpośredni wpływ na wielkość i rozkład temperatur w strefie roboczej ma prędkość obrotowa i prędkość przemieszczania się narzędzia wzdłuż zgrzeiny. Źródłem ciepła są siły tarcia generowane w kontakcie narzędzia z materiałem oraz energia uwalniania w trakcie deformacji plastycznej materiału [13]. Maksymalne temperatury występują w obszarach wienca opory oraz trzpienia, osiągając około 450°C, w zależności od łączonych materiałów i warunków procesu zgrzewania. W procesie zgrzewania temperatura uplastycznienia materiału wynosi około 70% jego temperatury topnienia. Temperatura w obszarze zgrzeiny

maleje w miarę oddalania się od strefy roboczej narzędzia. Na przykładzie zaprezentowanym na rys. 2 w odległości równej dwukrotnej średnicy narzędzia następuje blisko dwukrotny spadek wartości temperatury. Wraz ze zwiększaniem odległości od osi zgrzeiny zmniejsza się gradient temperatur w linii pionowej, w przekroju poprzecznym połączonych detali.



Rys. 2. Rozkład temperatur w przekroju poprzecznym złącza wykonanego z połączenia płyt ze stopu aluminium AA2519

Monitorowanie procesu zgrzewania w czasie rzeczywistym jest warunkiem utrzymania właściwych parametrów technologicznych oraz uzyskania powtarzalnych połączeń detali, spełniających wymagania jakościowe. Obecnie najczęściej stosowane metody kontroli procesu zgrzewania polegają na pomiarach podstawowych parametrów: prędkości obrotowej narzędzia, prędkości przesuwu narzędzia oraz siły docisku [17]. W eksperymentalnych systemach kontroli wykorzystuje się pomiar temperatury w strefie roboczej za pomocą termopar, które są umieszczane wewnątrz materiału zgrzewanego [2], w uchwytach mocujących łączone elementy lub w narzędziu roboczym [4]. Badania zgrzeiny są przeprowadzane po zakończeniu procesu zgrzewania, na wybranych próbkach, poza stanowiskiem produkcyjnym. Główną przyczyną braku zintegrowanych systemów inspekcji zgrzeiny w trakcie procesu wytwarzania jest utrudniony lub wręcz niemożliwy dostęp sensorów do strefy roboczej. W badaniach nieniszczących zgrzeiny wykonanych na próbkach wykorzystuje się m.in. metody prądów wirowych, metody ultradźwiękowe lub radiograficzne. Wspomagającą, ważną rolę w ocenie procesów zgrzewania tarcowego pełnią modele analityczne umożliwiające predykcję rozkładu temperatury w obszarze roboczym [10, 15]. Doświadczalne metody analizy dystrybucji ciepła opisano w pracach [1, 4, 14], gdzie zastosowano kamerę termowizyjną do rejestracji termogramów powierzchni zgrzeiny w czasie rzeczywistym. Analiza problemu przeprowadzona przez autorów dotyczyła m.in. wpływu emisyjności powierzchni łączonych materiałów na dokładność pomiarów. Uzyskane wyniki eksperymentów potwierdziły możliwość wykorzystania analizy niejednorodności rozkładu temperatury w procesie zgrzewania do badania i oceny wykonanego połączenia.

Z przeglądu dostępnych publikacji naukowych i technicznych wynika, że brak jest opracowanych hybrydowych systemów inspekcji wykorzystujących połączone metody termowizyjne i wizyjne do wykrywania wad zgrzeiny w trakcie procesu jej wytwarzania i umożliwiającą kierowanie informacji o wyniku inspekcji bezpośrednio do systemu sterowania maszyny lub do operatora.

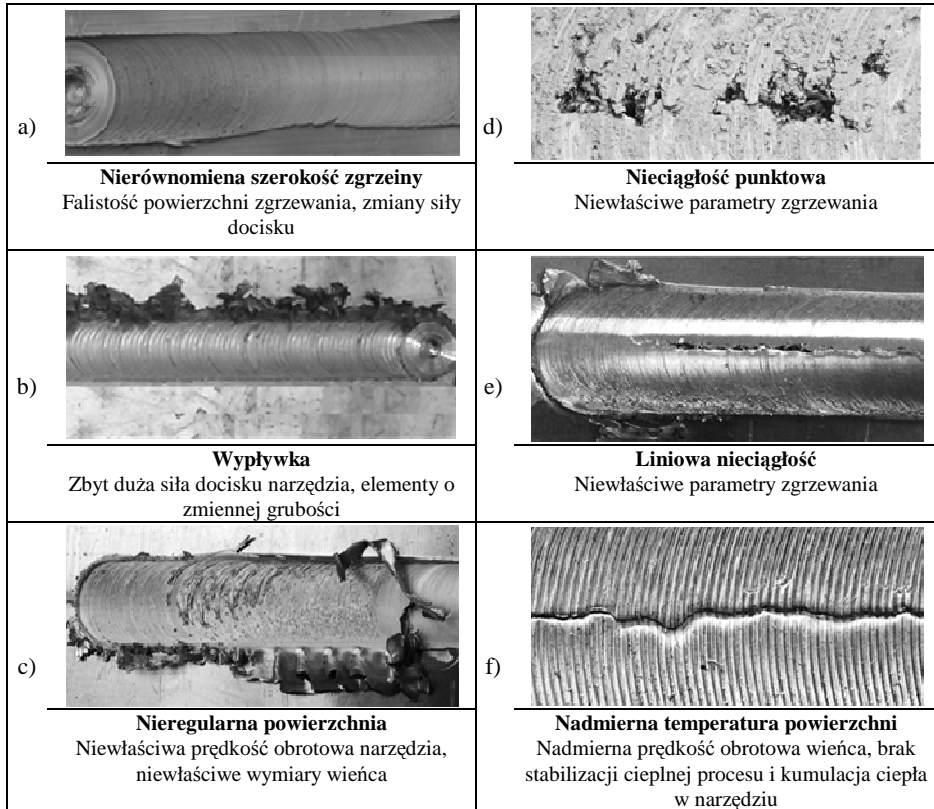
1. Charakterystyka typowych wad w procesie zgrzewania tarcowego

W procesie zgrzewania tarcowego mogą wystąpić wady, których przyczyny mają związek z niewłaściwym doбором parametrów procesu, narzędziem lub elementami zgrzewanymi.

Do najważniejszych wad i niezgodności identyfikowanych z użyciem technik wizyjnych i termowizyjnych należą:

1. Wady związane z elementami zgrzewanymi:
 - wielkość szczeliny między elementami;
 - stan powierzchni w obszarze bezpośredniego oddziaływania wieńca opory narzędzia.
2. Wady związane ze stanem narzędzia do zgrzewania:
 - kształt i wymiary trzpienia narzędzia;
 - wymiary i stan krawędzi wieńca opory narzędzia.
3. Wady związane z niewłaściwie dobranymi siłami docisku zgrzewania lub niewłaściwym pozycjonowaniem narzędzia podczas procesu:
 - nadmierna penetracja wieńca opory narzędzia, w tym nadmierny rąbek uplastycznionego metalu z jednej lub obu stron powierzchni zgrzeiny;
 - wahania szerokości powierzchni zgrzeiny;
 - odkształcenie elementów po zgrzewaniu.
4. Wady związane z niewłaściwie dobranymi parametrami procesu (kątem ustawienia narzędzia, prędkości: obrotowa i liniowa zgrzewania, kierunek obrotu narzędzia):
 - nierównomierny rąbek uplastycznionego metalu;
 - nadmierna chropowatość powierzchni zgrzeiny;
 - cykliczna, punktowa nieciągłość na powierzchni zgrzeiny;
 - liniowa nieciągłość na powierzchni zgrzeiny;
 - nadmierna temperatura powierzchni elementów po zgrzewaniu.

Wymienione wady lub zjawiska związane są z procesem zgrzewania FSW i występować mogą w przypadku różnych materiałów, zarówno stopów aluminium, jak i innych metali nieżelaznych czy stali. Przykłady najczęściej występujących wad zaprezentowano na rys. 3.

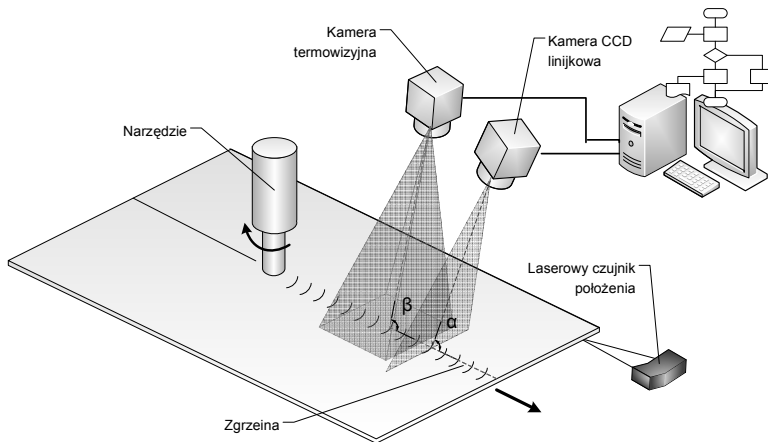


Rys. 3. Przykłady typowych wad zgrzeiny w procesie FSW i ich przyczyny

Większość wad i niezgodności powstających w procesie FSW może być sparametryzowana przez uwzględnienie ich geometrii. Pomiary prowadzone na podstawie rejestrowanych, za pomocą kamer cyfrowych, obrazów powierzchni zgrzeiny umożliwiają wykrywanie i identyfikację wad jako odstępstw od wzorców znajdujących się w bazie danych systemu inspekcji. Termogram powierzchni zgrzeiny zarejestrowany za pomocą kamery podczerwieni może zawierać także informacje o występujących wadach podpowierzchniowych. Obszary nieciągłości wewnętrznych w materiale, w postaci pęknięć lub rozwarstwień mogą być identyfikowane na podstawie analizy lokalnych zaburzeń rozkładu temperatury [5]. Jednym z przykładów wykorzystania analizy termogramów do wykrywania wad i niezgodności podpowierzchniowych jest opracowana metoda inspekcji spoin spawanych [6].

2. Metoda inspekcji

Zaproponowana metoda inspekcji polega na wykorzystaniu hybrydowego systemu wizyjnego do obserwacji powierzchni zgrzeiny w podczerwieni i paśmie widzialnym, w trakcie realizowanego procesu produkcyjnego. Odpowiednio usytuowane kamery rejestrują obrazy powierzchni zgrzeiny bezpośrednio za narzędziem. Zarejestrowane obrazy są poddawane analizie w celu detekcji i identyfikacji występujących wad zgrzeiny. Informacja o stanie jakościowym zgrzeiny jest przekazywana do operatora. W rozwiązaniu opcjonalnym, uwzględniającym automatyzację procesu produkcyjnego, sygnał zawierający wynik inspekcji może być kierowany do systemu sterowania maszyny w celu korekty parametrów technologicznych.



Rys. 4. Schemat poglądowy metody inspekcji w procesie FSW

Uwzględniając prezentowane w publikacjach wyniki badań oraz teoretyczne modele zjawisk cieplnych zachodzących w trakcie zgrzewania tarcowego FSW [8], przyjęto podstawowe założenia dla systemu obserwacji obszaru roboczego z wykorzystaniem techniki termowizyjnej i wizyjnej. Do przeprowadzenia inspekcji zgrzeiny szerokość okna obserwacji kamery termowizyjnej powinna być ok. 4–5 razy większa od średnicy narzędzia. Przyjęty wymiar umożliwi analizę obszarów cieplnych bezpośrednio w obrębie zgrzeiny, a także w sąsiadującej strefie zewnętrznej. Zakres obserwacji w paśmie widzialnym może być ograniczony wyłącznie do obszaru zgrzeiny. Jednym z podstawowych parametrów układu wizyjnego jest rozdzielczość pola obserwacji, odległość od powierzchni obiektu i szybkość rejestracji. Wytypowane kamery i obiektywy zapewniają realizację pomiarów geometrii zgrzeiny na wymaganym poziomie (tab. 1).

Tabela 1. Podstawowe parametry torów wizyjnych

Typ kamery/ typ obiektywu	Rozdzielczość sensora	Odległość widzenia min.	Rozdzielczość obrazu maks.	Szybkość rejestracji
Kamera IR matrycowa Obiektyw 27 mm (20°x16°)	320x256 px	160 mm	0,2 mm/px	170 Hz
Kamera CCD linijkowa Obiektyw x0,1-x0,4	2048 px	170 mm	8 μm/px	9,7 kHz

Obserwacja powierzchni metalowych o dużej refleksyjności w wysokich temperaturach jest jednym z najtrudniejszych problemów w inspekcji termowizyjnej. Powierzchnie metalowe niepokryte zanieczyszczeniami i bez powłok charakteryzują się bardzo małą emisyjnością, co utrudnia wiarygodny pomiar ich temperatury. Krzywe emisyjności metali wykazują jednocześnie zależność od długości fali promieniowania [12]. Ich wartości rosną dla krótkich długości fal. Wartość emisyjności może znacznie się zmienić, gdy kąt obserwacji (kąt względem powierzchni badanego obiektu) przekracza 50°.

Dokonyując wyboru typu kamery termowizyjnej, uwzględniono przede wszystkim czynniki emisyjności oraz takie parametry, jak zakres pomiarowy i czułość termiczna sensora. Wytypowana kamera posiada chłodzony sensor InSb o zakresie pomiarowym 5°C÷1500°C i rozdzielczości termicznej NETD (Noise Equivalent Temperature Difference) o wartości ≤ 25mK. Na etapie weryfikacji systemu wizyjnego konieczne będzie przeprowadzenie analizy błędów niepewności i oszacowanie dokładności pomiarów temperatury, wykorzystując opracowane modele i procedury [3, 12]. Wpływ wybranych czynników na błąd względny pomiaru temperatury pokazuje przybliżony wzór [18]:

$$\Delta T \cong \frac{\lambda_p}{c_2} T^2 \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon} \quad (1)$$

gdzie:

- T – temperatura powierzchni,
- ε – nominalna emisyjność powierzchni,
- c_2 – druga stała Planck’a,
- λ_p – długość fali promieniowania podczerwonego.

Zgodnie z przedstawioną zależnością, w celu minimalizacji błędów, pomiary należy wykonywać w zakresie krótkich długości fal promieniowania. Na etapie opracowywania modelu systemu inspekcji wytypowano sensor do pomiarów w paśmie SWIR (short wave infrared) 2,5÷5 μm.

W przyjętej koncepcji system wizyjny jest zespolony konstrukcyjnie z głowicą roboczą i jest nieruchomy względem narzędzia wykonującego połączenie elementów. Roboczy ruch posuwisty wykonuje stół maszyny z zamoco-

wanymi elementami. System wizyjny realizuje skanowanie powierzchni zgrzeiny z prędkością przesuwu stołu roboczego. Krok skanowania wzdłuż osi zgrzeiny określa wzór:

$$\Delta s = \frac{v}{f} \quad (2)$$

gdzie:

- v – prędkość przesuwu zgrzewanych elementów względem kamery,
- f – częstotliwość akwizycji obrazów.

Projektując system wizyjny, należy przeprowadzić analizę zjawiska rozmycia obrazu. Obraz elementu będącego w ruchu może zostać rozmyty przy niewłaściwie ustalonym czasie rejestracji kamery. Wielkość rozmycia B obrazu elementu wyrażoną w pikselach określa zależność:

$$B = \frac{v \cdot T_e \cdot N}{W} \quad (3)$$

gdzie:

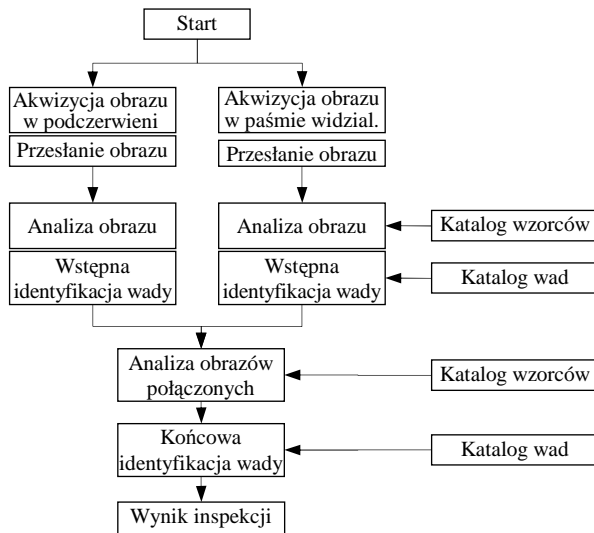
- v – prędkość elementu w czasie rejestracji obrazu,
- T_e – czas rejestracji obrazu przez kamerę (czas ekspozycji),
- N – wymiar sensora kamery w pikselach,
- W – wymiar pola widzenia kamery wzdłuż kierunku ruchu elementu.

Obraz nie wykazuje rozmycia, gdy $B \leq 1$. Ze wzoru (3) można wyznaczyć minimalną częstotliwość rejestracji kamery dla przyjętego poziomu rozmycia obrazu. Dla wytypowanej kamery IR (tab. 1), zakładając średnią prędkość przesuwu stołu 10 mm/s, wymiar pola widzenia ok. 50 mm, minimalna częstotliwość rejestracji zapewniająca ostry obraz wynosi około 50 Hz. Wykorzystując funkcję zawężenia wymiaru okna obserwacji kamery można proporcjonalnie zwiększyć maksymalną częstotliwość rejestracji kamery.

Analiza profilu temperaturowego wzdłuż prostopadłej do kierunku tworzenia pozwoli na ocenę równomierności rozkładu termicznego w obu łączonych elementach. Analiza profilu temperaturowego wzdłuż kierunku ruchu pozwoli m.in. na ocenę szybkości stygnięcia zgrzeiny. Analiza obrazów 2D umożliwi wykrywanie obszarów niezgodności. Wady powierzchniowe i wady podpowierzchniowe zgrzeiny (np. nieciągłości punktowe i liniowe, pęknięcia) mają swoje odzwierciedlenie w przebiegu profili temperaturowych. Konieczne będzie wyznaczenie profili wzorcowych lub określenie parametrów profilu dla zgrzeiny prawidłowej. W pracach zostaną wykorzystane najnowsze normy określające wymagania jakościowe dla procesu FSW i wykonywanych połączeń, które obecnie są na etapie zatwierdzania [9].

3. Algorytm inspekcji

Na rys. 5 zamieszczono ogólny algorytm inspekcji zgrzeiny prowadzonej w trakcie procesu zgrzewania tarcowego. Pierwszy etap obejmuje rejestrację obrazów z kamery termowizyjnej i linijkowej kamery CCD oraz przesłanie do pamięci komputera. Na drugim i głównym etapie jest realizowany proces przetwarzania i analizy obrazów, którego efektem jest detekcja i identyfikacja wad zgrzeiny.



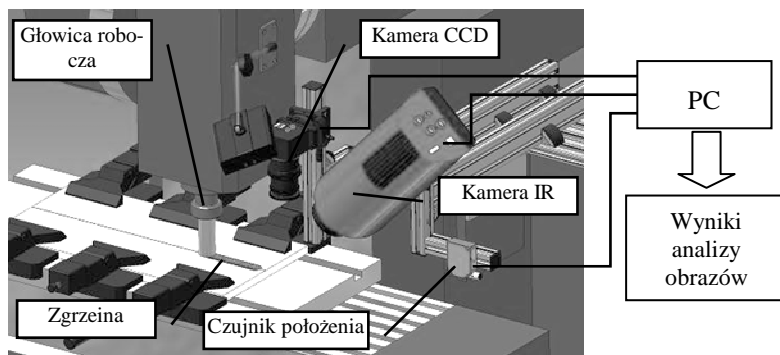
Rys. 5. Ogólny algorytm inspekcji zgrzeiny

Zadania analizy obrazów z obu torów wizyjnych są realizowane współbieżnie. Ponadto zadania akwizycji i analizy kolejnych obrazów są przeprowadzane w niezależnych wątkach. Zapewni to osiągnięcie możliwie dużej wydajności systemu inspekcji. Na etapie końcowym jest dokonywana analiza obrazów połączonych przez dopasowanie obrazów znormalizowanych po operacjach niezbędnych przekształceń geometrycznych. Do detekcji i identyfikacji wad przewiduje się wykorzystanie m.in. metody cyfrowej korelacji obrazów z wykorzystaniem obrazów wzorcowych.

4. Stanowisko badawcze

Opracowany model komputerowy eksperymentalnego stanowiska badawczego zaprezentowano na rys. 5. Konstrukcja nośna kamer umożliwi zmiany ich położenia w celu wyznaczenia optymalnych kątów obserwacji powierzchni zgrzeiny. W systemie sterowania zaplanowano zastosowanie lasero-

wego czujnika pomiaru położenia stołu roboczego względem kamer, w celu synchronizacji kamer i umożliwienia lokalizacji wykrytych wad w zgrzeinie.



Rys. 5. Komputerowy model eksperymentalnego stanowiska badawczego

Badania eksperymentalne modelowego systemu inspekcji zostaną przeprowadzone na stanowisku roboczym przeznaczonym do zgrzewania metodą FSW, znajdującym się w Instytucie Spawalnictwa.

Podsumowanie

Przedstawiona metoda monitorowania procesu zgrzewania tarcowego FSW polega na wykorzystaniu informacji zawartych w obrazach zgrzeiny, wykonanych w podczerwieni i paśmie widzialnym. Zaproponowany hybrydowy system inspekcji, dzięki modułowej i elastycznej strukturze, może być zastosowany w różnych procesach FSW.

Jednym z podstawowych warunków, decydujących o skuteczności systemu inspekcji jest baza danych zawierająca katalog wzorców oraz katalog wad zgrzein. Jednym z założeń autorów podczas projektowania oprogramowania systemu jest uwzględnienie otwartej struktury bazy i możliwości rozszerzania zasobów katalogów.

Metoda jest głównie dedykowana do monitorowania procesów zgrzewania tarcowego FSW. Ogólna koncepcja jednoczesnego wykorzystania analizy obrazów w podczerwieni i paśmie widzialnym daje także możliwości zastosowań, m.in. do monitorowania procesów spawania, do monitorowania procesów montażu elementów na gorąco, w badaniach elementów konstrukcyjnych w wysokich temperaturach.

Praca naukowa wykonana w ramach realizacji Programu Strategicznego pn. „Innowacyjne systemy wspomagania technicznego zrównoważonego rozwoju gospodarki” w Programie Operacyjnym Innowacyjna Gospodarka.

Bibliografia

1. Birsan D., Visan D., Mircea O.: Temperature monitoring in friction stir welding using thermovision method. The Annals of “Dunarea de Jos” University of Galati, Fascicle XII, Welding Equipment and Technology, pp. 45.
2. Chao Yuh J., Qi X., Tang W.: Heat Transfer in Friction Stir Welding—Experimental and Numerical Studies. Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 125, pp. 138–145.
3. Chrzanowski K.: Non-contact thermometry. Measurement errors. Research&Development Treatises vol. 7. SPIE Polish Chapter, Warsaw 2001.
4. Covington J.L.: Experimental and numerical investigation of tool heating during friction stir welding. Department of Mechanical Engineering Brigham Young University, 2005.
5. De Mey G., Więcek B.: Termowizja w podczerwieni. Podstawy i zastosowania. Wydawnictwo PAK, Warszawa 2011.
6. Fidali M., Timofiejczuk A.: Assessment of welded joints quality by means of analysis of its thermovision images recorded during welding process. Diagnostyka, 1(49), 2009, p. 49–56.
7. Fleming P.: Monitoring and Control in Friction Stir Welding. PhD Dissertation. Vanderbilt University, 2009.
8. Heurtier P., Jones M.J., Desrayaud C., Driver J.H., Montheillet F., Allehaux D.: Mechanical and thermal modelling of Friction Stir Welding. Journal of Materials Processing Technology 171 (2006) 348–357.
9. ISO/FDIS 25239-5: Friction stir welding - Aluminium - Part 5: Quality and inspection requirements.
10. Kovacevic R., Song M.: Thermal modeling of friction stir welding in a moving coordinate system and its validation. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 43:605–615, 2003.
11. Lohwasser D., Chen Z.W.: Friction Stir Welding – from basics to applications. Woodhead Publishing Ltd., Cambridge 2010.
12. Minkina W., Dudzik S.: Infrared Thermography: Errors and Uncertainties. John Wiley & Sons Ltd, 2009.
13. Nandan R., DebRoy T. and Bhadeshia H.K.D.H.: Recent Advances in Friction Stir Welding – Process, Weldment Structure and Properties. Progress in Materials Science 53 (2008) pp. 980–1023.

14. Rusu C.C., Mistodie L.R.: Thermography used in friction stir welding processes. The Annals of „Dunarea de Jos” University of Galati Fascicle XII, Welding Equipment and Technology, Volume 21, 2010.
15. Schmidt H.B., Hattel J.H.: Thermal modelling of friction stir welding. Scripta Materialia 58 (2008) pp. 332–337.
16. Thomas W.M., et al.: Friction stir butt welding. International Patent Application PCT/GB92. Patent Application GB9125978.8, 1991.
17. Yang Y., Kalya P., Landers R.G., Krishnamurthy K.: Automatic gap detection in friction stir butt welding operations. International Journal of Machine Tools & Manufacture 48 (2008) 1161–1169.
18. www.flir.com/thermography/eurasia/en/

Recenzent:
Jan PILARCZYK

Concept of the vision system for monitoring of friction stir welding process

Key words

Friction stir welding FSW, quality inspection, optical inspection, thermal analysis.

Summary

The paper presents the idea of a method and system for monitoring of friction stir welding FSW with the use of analysis of infrared and vision images. Thermal images present a temperature distribution and fluctuation within a weld joint, and contain complex information about welding process and weld structure. The combined analysis of infrared and vision images of weld will enable the on-line process monitoring and detection of surface and subsurface defects. The key aspects of modeling of a vision system and inspection algorithm are described in the paper.