

Zastosowanie termografii aktywnej do badań nieniszczących połączeń lutowanych

The application of active thermography for non-destructive testing of brazed joints

Streszczenie

W artykule opisano zastosowanie termografii aktywnej do badań nieniszczących połączeń lutowanych. Omówiono metodologię badań oraz zastosowane stanowisko badawcze własnej konstrukcji. Uzyskane obrazy termograficzne próbek zostały porównane z wynikami badań radiograficznych. Na podstawie wyników stwierdzono, że zaproponowana metoda badawcza może być z powodzeniem zastosowana do nieniszczącej analizy jakości zakładkowych połączeń lutowanych.

Abstract

The application of active thermography for non-destructive testing of brazed lap joints was presented in this article. The methodology and applied self-constructed apparatus were discussed. Thermal images of the specimens obtained during experiments were compared with radiography examination results. On the basis of obtained results, it was summarized that the proposed testing method can be successfully applied for non-destructive quality analysis of brazed lap joints.

Wstęp

Połączenia doczołowe i zakładkowe są podstawowymi rodzajami połączeń lutowanych. Wszystkie inne połączenia są jedynie ich kombinacją lub odmianą. Jeżeli głównym kryterium projektowym jest wysoka wytrzymałość połączeń lutowanych, stosowane mogą być jedynie połączenia zakładkowe. Oprócz kształtu i geometrii złącza lutowanego, na jego właściwości mechaniczne wpływają: rodzaj lutu, gatunek lutowanych materiałów, szerokość szczeliny lutowniczej i in. Jednak nawet zapewnienie optymalnych ww. parametrów nie gwarantuje odpowiedniej jakości złącza w przypadku braku całkowitego wypełnienia szczeliny lutowniczej [1].

Warunkiem całkowitego wypełnienia szczeliny lutowniczej jest odpowiednia zdolność zwilżania

powierzchni łączonych przez ciekły lut, która zależy od wielkości napięcia powierzchniowego na granicach: ciekły lut – materiał podstawowy, ciekły lut – topnik, materiał podstawowy – topnik. Należy przy tym mieć na uwadze, że wyniki procesu lutowania nie są do końca przewidywalne, a jakość uzyskanego połączenia może być potwierdzona jedynie za pomocą badań nieniszczących.

Jedną z najczęściej stosowanych metod badań nieniszczących, dającą obraz stopnia wypełnienia szczeliny lutowniczej oraz występowania ewentualnych wad i niezgodności w połączeniu lutowanym oraz materiale podstawowym, jest metoda radiograficzna. Jednakże metoda ta jest stosunkowo droga i czasochłonna, a jej stosowanie znajduje uzasadnienie tylko w przypadku „odpowiedzialnych” połączeń, np. pracujących pod wysokim ciśnieniem.

Ze względu na coraz szersze zastosowanie połączeń lutowanych w wielu produktach, np. w przemyśle lotniczym czy motoryzacyjnym, zachodzi potrzeba badań ich jakości w sposób nieniszczący, dający podstawową informację o tym, czy szczelina lutownicza została właściwie wypełniona ciekłym lutem.

Dr inż. Sebastian Pawlak – Politechnika Śląska, Gliwice, **dr inż. Maciej Róžański** – Instytut Spawalnictwa w Gliwicach, **mgr Grzegorz Muzia** – Instytut Metali Nieżelaznych, Gliwice.

W ostatnim dziesięcioleciu obserwuje się znaczny wzrost zainteresowania termografią aktywną jako nieniszczącą metodą badań materiałów inżynierskich. Obecnie najczęściej wykorzystuje się tę metodę w przemyśle lotniczym do badań materiałów kompozytowych o osnowie polimerowej. Najwięcej opracowań w tym zakresie poświęconych jest głównie takim aspektom badawczym, jak: wykrywanie rozwarstwień, pustek lub obcych wtrąceń, detekcja pęknięć i uszkodzeń wywołanych uderzeniem [2]. Znacznie mniej uwagi poświęca się tej metodzie w zastosowaniu do badań różnego typu połączeń materiałowych [3, 4]. Nie znaleziono informacji o możliwości zastosowania termografii aktywnej do badań nieniszczących najczęściej spotykanych zakładkowych połączeń lutowanych. Celem niniejszej pracy było zatem sprawdzenie możliwości zastosowania termografii aktywnej do badań nieniszczących tego typu połączeń w aspekcie poszukiwania skutecznej i efektywnej metody badań umożliwiającej wykrycie obszaru próbki, w którym doszło do nieprawidłowego (lub niecałkowitego) wypełnienia szczeliny lutowniczej.

Metodyka badań

W celu sprawdzenia możliwości zastosowania termografii aktywnej do badań zakładkowych połączeń lutowanych opracowano metodykę badań uwzględniającą dobór: próbek do badań, parametrów procesu nagrzewania próbek oraz standardowej metody do weryfikacji lub porównania uzyskanych wyników badań termograficznych. Przy wyborze termografii aktywnej do badań połączeń lutowanych założono, że niewypełniony ciekłym lutem obszar pomiędzy dwoma łączonymi kawałkami blachy zaburzać będzie nieustalony przepływ ciepła w kierunku grubości próbki badanej, co może spowodować wystąpienie nierównomiernego rozkładu temperatury na obrazie termograficznym zarejestrowanym na powierzchni tej próbki. W celu sprawdzenia stopnia wypełnienia szczeliny lutowniczej w badanych połączeniach wykonano badania radiograficzne metodą podstawową. Wyniki tych badań, dla rozpatrywanych połączeń próbnych, przedstawiono w dalszej części artykułu na rysunkach 3b, 4b i 5b. Uzyskane obrazy termograficzne o największej wartości kontrastu temperaturowego zostały poddane analizie porównawczej z wynikami badań radiograficznych.

Materiał do badań i przygotowanie próbek

Jako materiał podstawowy do wytworzenia próbek zastosowano wysokostopową stal ferrytyczną X6Cr17 wg PN-EN 10088-2:2007 w postaci blachy o grubości

Tablica I. Skład chemiczny wysokostopowej stali nierdzewnej użytej do wytworzenia próbek

Table I. Chemical composition of stainless steel used for specimens preparation

Oznaczenie stali	Skład chemiczny stali, %							
	C	Si	Mn	Cr	Ni	P	S	Ti
X6Cr17	0,08	1,00	1,00	16,0÷18,0	–	0,04	0,015	–

1,5 mm i składzie chemicznym, przedstawionym w tablicy I. Taki gatunek stali wykazuje ograniczoną zwilżalność przez ciekłe luty srebrne [5]. Z blachy wycięto laserowo kawałki w kształcie kwadratu o boku 30 mm. Jako spoiwa do lutowania wybrano następujące luty srebrne (oznaczenia wg PN-EN ISO 17672:2010):

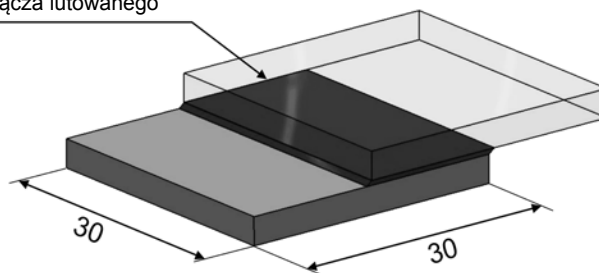
- B-Ag72Cu-780 (Ag72Cu28) – w postaci pręta o średnicy 1,0 mm;
- B-Ag59CuPd – 824/852 (Ag59Cu31Pd10) – w postaci pręta o średnicy 2,0 mm;
- B-Ag68CuSn-730/755 (Ag68Cu28Sn4) – w postaci folii o grubości 0,1 mm.

Próbne połączenia lutowane do badań wykonano w piecu próżniowym w Instytucie Spawalnictwa w Gliwicach. Do procesu lutowania ułożono jeden kawałek blachy na drugim z zakładką 15 mm, bez ustalania szczeliny lutowniczej. Przy krawędzi zakładki umieszczano każdorazowo spoiwo o masie 1,5 g. Próbkę lutowano w próżni w temperaturze 950°C i czasie 10 min. Podczas nagrzewania do temperatury lutowania stosowano wytrzymałość w temperaturze 700°C w czasie 20 min, celem umożliwienia wystąpienia zjawisk desorpcji gazów i ewentualnych zanieczyszczeń z warstw wierzchnich. Prędkość nagrzewania próbek do temperatury lutowania wynosiła 30÷40°C/min. Na rysunku 1 pokazano geometrię wytworzonego złącza lutowanego z zaznaczoną analizowaną powierzchnią.

Uzyskane tym sposobem połączenia lutowane ponumerowano od 1 do 3. Złącze nr 1 lutowano przy użyciu lutu srebrnego z palladem B-Ag59CuPd – 824/852, złącze nr 2 – eutektycznym lutem srebrnym B-Ag72Cu-780, a złącze nr 3 – lutem B-Ag68CuSn-730/755.

Wszystkie próbki przed badaniami termograficznymi pokryto od strony rejestracji obrazów czarną matową farbą, której współczynnik emisyjności wynosił ok. 0,93.

Analizowana powierzchnia złącza lutowanego

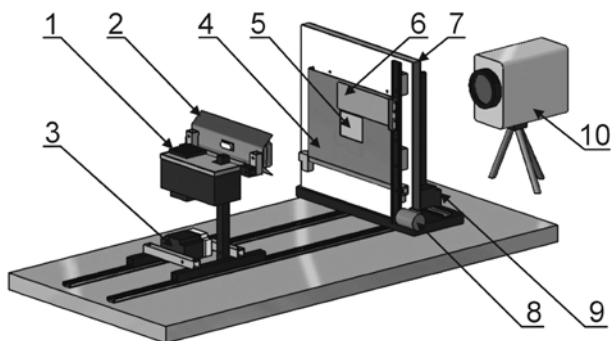


Rys. 1. Analizowana powierzchnia złącza lutowanego na zakładkę
Fig. 1. Analyzed bonding area of brazed lap joint

Badania termograficzne i stanowisko do badań

Badania termograficzne przeprowadzono w Instytucie Metali Nieżelaznych (IMN) w Gliwicach na stanowisku do badań (rys. 2), które skonstruowano i wykonano na potrzeby realizacji pracy [6].

Stanowisko do badań zapewniało jednakowe warunki nagrzewania dla każdej próbki badanej za pomocą przesłony ruchomej (zasłaniającej czołową powierzchnię próbki), której napęd sterowany był programowalnym sterownikiem PLC. Próbki podczas badań poddawano nagrzewaniu w czasie 1 s z odległości 30 mm. Czas nagrzewania oraz odległość źródła ciepła od nagrzewanej powierzchni próbki ustalono eksperymentalnie tak, aby uzyskać jak największą wartość kontrastu temperaturowego $\Delta T(t)$, definiowanego jako różnica temperatury pomiędzy dwoma punktami; jeden punkt pochodzący z obszaru bez wady (niezgodności), drugi punkt pochodzący z obszaru zawierającego wadę (niezgodność). Z praktyki badań termograficznych wiadomo, że wartość kontrastu temperaturowego oscylująca wokół zera (dowolnej jednostki temperatury), w całym przedziale czasu rejestracji zmian temperatury wskazuje na brak występowania wady (lub niezgodności) w materiale. Natomiast wystąpienie charakterystycznego wzrostu wartości kontrastu temperaturowego (np. o ok. 1°C) wskazuje na istnienie wady materiałowej – w rozpatrywanym przypadku jest to brak całkowitego wypełnienia szczeliny lutowniczej ciekłym metalem pomiędzy dwoma łączonymi kawałkami blachy. Sekwencje obrazów termograficznych rejestrowane były kamerą termowizyjną ThermoCAMTM SC640 firmy Flir-Systems, współpracującą z komputerem PC z oprogramowaniem Researcher Professional 2.9. Rejestracji obrazów dokonywano podczas procesu nagrzewania, poczynając od rozpoczęcia



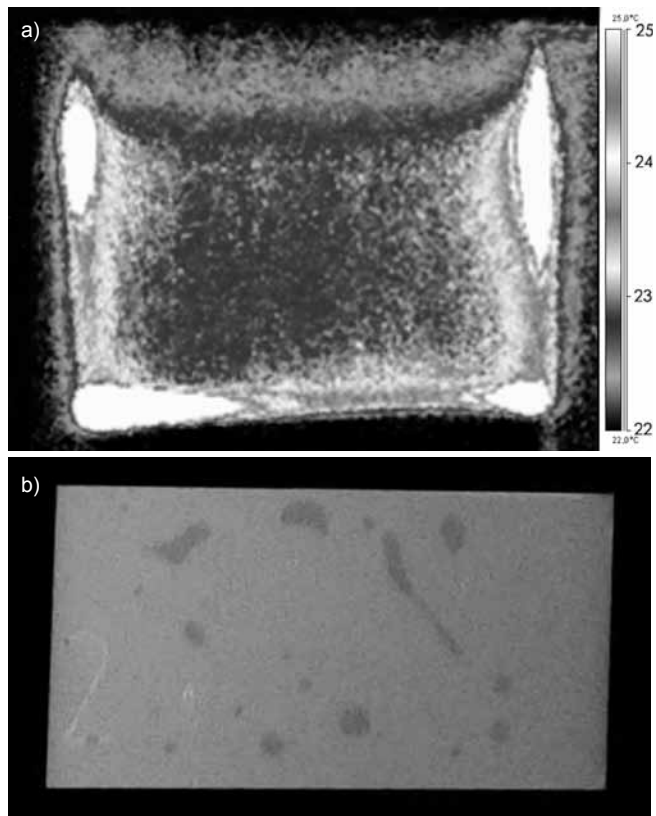
Rys. 2. Schemat stanowiska do badań [6, 7]; 1 – regulator temperatury, 2 – promiennik podczerwieni, 3 – przekaźnik z układem zabezpieczającym, 4 – przesłona stała, 5 – próbka badana, 6 – przesłona ruchoma, 7 – przegroda termiczna, 8 – napęd przesłony ruchomej, 9 – sterownik programowalny (PLC), 10 – kamera termowizyjna
Fig. 2. Scheme of the apparatus [6, 7]; 1 – temperature control unit, 2 – infrared radiator, 3 – relay with safety device, 4 – stationary shield, 5 – specimen tested, 6 – moveable shield, 7 – temperature barrier, 8 – drive of moveable shield, 9 – PLC controller, 10 – IR camera

nieustalonego przepływu ciepła przez próbkę badaną. Jako źródło ciepła do nagrzewania próbek zastosowano ceramiczny promiennik podczerwieni o mocy 1200 W i zakresie długości emitowanej fali od 2 do 10 μm . Powierzchnia robocza promiennika była znacząco większa od powierzchni próbki, co zapewniało jej jednorodne nagrzewanie.

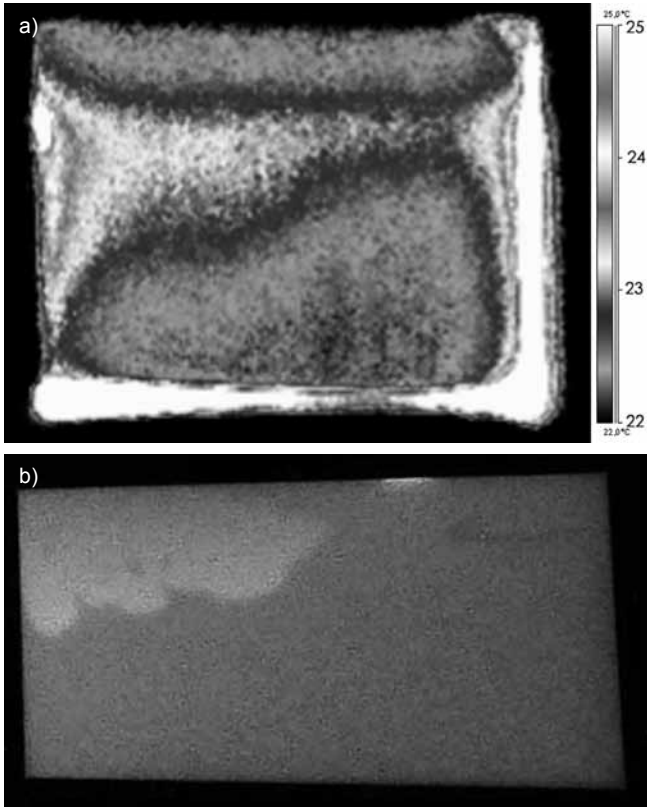
Wyniki badań

W wyniku badań termograficznych uzyskano sekwencje obrazów zarejestrowanych na powierzchni próbek, natomiast w niniejszej pracy wyselekcjonowano najbardziej reprezentatywne, tj. o największej wartości uzyskanego kontrastu temperaturowego. Wybrane obrazy termograficzne pochodzące z trzech próbek przedstawiono na rysunkach 3÷5a. Natomiast zdjęcia rentgenograficzne przedstawione na rysunkach 3÷5b pokazują dokładne położenie oraz geometrię powierzchni wypełnienia szczeliny lutowniczej.

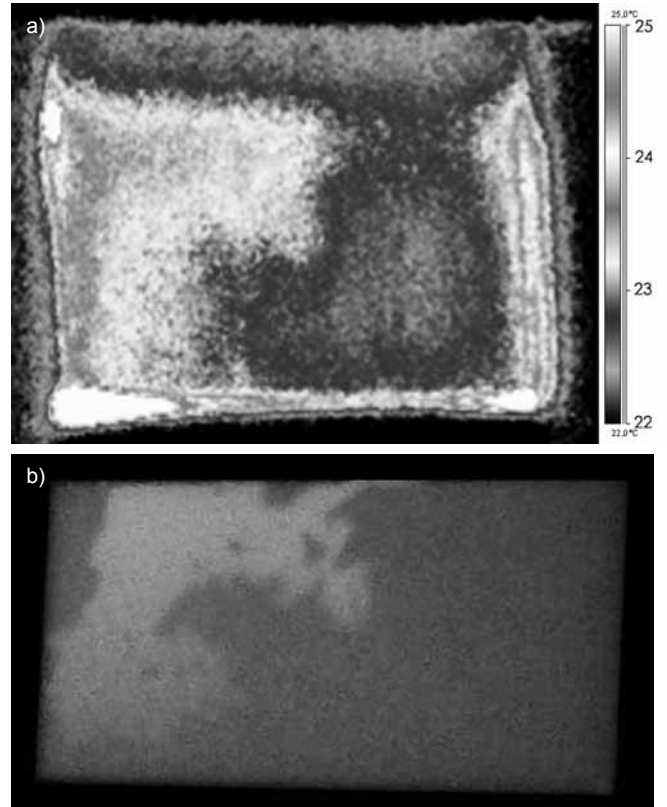
Na rysunku 3a przedstawiono obraz próbki nr 1, z całkowicie wypełnioną szczeliną lutowniczą, co bezpośrednio przełożyło się na jednorodny rozkład temperatury na powierzchni próbki, natomiast widoczne na tym obrazie jasne pola o znacznie podwyższonej temperaturze pochodzą od szybciej nagrzewających się krawędzi próbki i nie mogą być brane pod uwagę podczas analizy.



Rys. 3. Próbkę nr 1: a) obraz termograficzny, b) zdjęcie rentgenograficzne
Fig. 3. Specimen no. 1: a) thermal image, b) X-ray picture



Rys. 4. Próbkę nr 2: a) obraz termograficzny, b) zdjęcie rentgenograficzne
Fig. 4. Specimen no. 2: a) thermal image, b) X-ray picture



Rys. 5. Próbkę nr 3: a) obraz termograficzny, b) zdjęcie rentgenograficzne
Fig. 5. Specimen no. 3: a) thermal image, b) X-ray picture

Charakterystyczne szybsze nagrzewanie krawędzi badanych próbek może utrudniać poprawną interpretację uzyskanych obrazów termograficznych. Wyeliminowanie problemu szybszego nagrzewania krawędzi badanego połączenia lutowanego można uzyskać poprzez zastosowanie dodatkowej przysłony stanowiącej barierę termiczną zapobiegającą bezpośredniemu padaniu promieniowania podczerwonego. Należy więc przyjąć, że w warunkach prowadzonego eksperymentu zastosowana metoda badawcza nie zapewnia badania poprawności wypełnienia szczeliny lutowniczej wokół krawędzi połączenia.

Na rysunku 4a przedstawiono obraz termograficzny próbki nr 2, której szczelina lutownicza jest częściowo wypełniona lutem – obszar o barwie odpowiadającej wartości 23°C na skali temperatury odpowiada powierzchni szczeliny wypełnionej lutem (rys. 4b). Zgodnie z przewidywaniem, wskutek braku całkowitego wypełnienia lutem na obrazie widoczny jest niejednorodny rozkład temperatury na powierzchni próbki (w obszarze prawidłowego połączenia występuje wyższa temperatura o ok. 1°C w porównaniu z obszarem, w którym nie nastąpiło wypełnienie szczeliny lutowniczej).

Na rysunku 5a przedstawiono obraz termograficzny próbki nr 3, która była częściowo wypełniona lutem zlokalizowanym na jej lewej połowie (rzeczywisty kształt wypełnienia przedstawiono na rysunku 5b). Podobnie jak dla próbki nr 2, na obrazie z rysunku 5 widoczny jest niejednorodny rozkład temperatury na jej

powierzchni – w obszarze prawidłowego połączenia obu kawałków blachy występuje wyższa (o ok. 1°C) średnia temperatura na powierzchni jednej z nich na zamieszczonym obrazie. Również w tym przypadku na podstawie obrazu termograficznego można jednoznacznie wskazać położenie i przybliżony kształt obszaru wypełnionego lutem.

Przedstawione termogramy jednoznacznie wskazują na znaczące różnice w przepływie ciepła w różnych obszarach połączenia lutowanego. W obszarze szczeliny wypełnionej lutem, w którym zachowana jest fizyczna ciągłość materiału, przepływ ciepła jest zdecydowanie efektywniejszy (odbywa się jedynie drogą przewodzenia), niż w obszarze z wyraźną granicą metal – powietrze.

Wszystkie przedstawione obrazy termograficzne (rys. 3÷5a) zarejestrowane były po 2 s, licząc od chwili rozpoczęcia nagrzewania. Po czasie tym uzyskano największą wartość kontrastu temperaturowego, równą ok. 1°C we wszystkich trzech analizowanych przypadkach. Kolejne zarejestrowane obrazy przedstawiały zmniejszający się kontrast temperaturowy w wyniku wyrównywania się temperatury na powierzchni próbki. We wszystkich przypadkach uzyskano zadowalającą zgodność obrazu termograficznego ze zdjęciem rentgenograficznym, co potwierdziło skuteczność termografii aktywnej w nieniszczących badaniach zakładkowych połączeń lutowanych.

Podsumowanie

Omówiono możliwość zastosowania termografii aktywnej do badań nieniszczących zakładkowych połączeń lutowanych. Uzyskane podczas badań obrazy termograficzne pozwoliły wskazać jednoznacznie obszar próbki, który nie został wypełniony ciekłym metalem podczas procesu lutowania, co potwierdziło skuteczność termografii aktywnej w badaniach nieniszczących rozpatrywanych połączeń.

Metoda ta stanowi perspektywiczną, łatwą w realizacji i efektywną metodę badań nieniszczących połączeń lutowanych. W połączeniu z technikami

analizy i rozpoznawania obrazów może być też zastosowana do automatyzacji badań nieniszczących połączeń lutowanych w produkcji seryjnej [8].

Zastosowana metoda badawcza pozwala na szybką odpowiedź, czy w danym połączeniu szczelina lutownicza jest całkowicie wypełniona lutem i czy występują znaczące niezgodności lub wady. W warunkach prowadzonego eksperymentu nie było natomiast możliwe dokładne określenie położenia granic zwilżenia szczeliny lutem.

Literatura

- [1] Bates D., Smith G., Lu D., Hewitt J.: Rapid thermal non-destructive testing of aircraft components, Composites: Part B 31, 2000, 175-185.
- [2] Meola C., Carlomagno G.M., Squillace A., Giorleo G.: The use of infrared thermography for nondestructive evaluation of joints, Infrared Physics & Technology 46, 2004, 93-99.
- [3] Chaudhuri P., Santra P., Yeole S., Prakash A., Lachhvani L.T., Govindarajan J., Chenna Reddy D., Saxena Y.C.: Inspection of brazed joints between cooling tube and heat sink of PFC for SST-1 tokamak by IR thermography technique, Fusion Engineering and Design 73, 2005, 375-382.
- [4] Winiowski A., Różański M.: Lutowanie próżniowe stali nierdzewnych spoiwami srebrnymi zawierającymi nikiel i cynę, Biuletyn Instytutu Spawalnictwa 6/2011, 54-58.
- [5] Brazing Handbook, Fourth Edition, American Welding Society 1991.
- [6] Pawlak S.: Termograficzna metoda oceny rozkładu udziału włókien w kompozytach epoksydowo-węglowych, Rozprawa doktorska, Politechnika Śląska w Gliwicach, Wydział Mechaniczny-Technologiczny, Gliwice 2010.
- [7] Wróbel G., Pawlak S., Muzia G.: Thermal diffusivity measurements of selected fiber reinforced polymer composites using heat pulse method, Archives of Materials Science and Engineering 48/1, 2011, 25-32.
- [8] Fidałi M., Bzymek A., Timofiejczuk A., Czupryński A., Jamrozik W.: Ocena stanu procesu spawania na podstawie analizy obrazów wizyjnych i termowizyjnych. Biuletyn Instytutu Spawalnictwa w Gliwicach 2/2009, 50-56.

 4METAL.PL

Ponad 2000 podwykonawców z całego świata

[katalog firm] PONAD 2000 FIRM Z CAŁEGO ŚWIATA
PODZIELONYCH NA KATEGORIE

[giełda pracy] OGŁOSZENIA PRACOWNIKÓW
I PRACODAWCÓW Z BRANŻY

NEW

[giełda materiałów] OGŁOSZENIA KUPNA I SPRZEDAŻY, SZCZEGÓLOWO
PODZIELONE NA GATUNKI I KSZTAŁTY MATERIAŁÓW

[giełda maszyn] PONAD 2300 AKTUALNYCH OGŁOSZEN
KUPNA I SPRZEDAŻY

[wydarzenia] LISTA TARGÓW I IMPREZ BRANŻOWYCH
ZE ŚWIATA

[aktualności] TECHNOLOGIE, WYWIADY, SPRAWOZDANIA,
WSZYSTKO CZEGO POTRZEBUJESZ

[media] INFORMACJE O CZASOPISMACH
BRANŻOWYCH Z CAŁEGO ŚWIATA

[video] RELACJE, WYWIADY,
PREZENTACJE

 www.4metal.pl
 www.4metal.de
 www.4metal.cz
 www.4metal.com
 www.4metal.nl
 www.4metal.at
 www.4metal.be
 www.4metal.ru
 www.4metal.ch
 www.4metal.lt
 www.4metal.ro
 www.4metal.hu
 www.4metal.us



GET THE MEMBERSHIP