

Modelowanie zjawisk cieplnych w procesie napawania

Modelling of heat effects in the arc weld surfacing process

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki obliczeń numerycznych zjawisk występujących podczas napawania. Do modelowania zjawisk w spawalniczym łuku elektrycznym: topienia, krystalizacji, generacji ciepła oraz przepływów wielofazowych użyto pakietu CFD Fluent. Opracowano model 3D wycinka blachy 50 x 30 x 6 mm napawanej metodą GMA drutem litym o średnicy 1,2 mm. Skoncentrowano się głównie na zaprezentowaniu rozkładu temperatury w czasie, badano proces topienia materiału dodatkowego do spawania, a następnie krystalizacji jeziorka oraz przenoszenie stopionego metalu w łuku spawalniczym. Przeprowadzono również wstępną weryfikację modelu, porównując wyniki z obrazem zarejestrowanym przez szybką kamerę z prędkością 1000 klatek/s.

Abstract

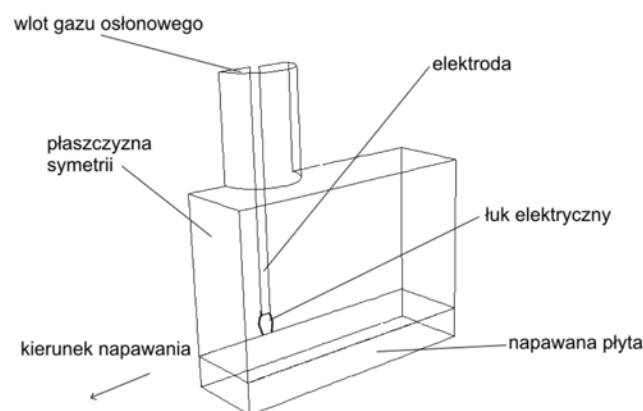
The results of numerical calculations of phenomena which occur in the arc weld surfacing was presented in the paper. The CFD Fluent package was used for modelling the following phenomena in the electric arc: melting, solidifying, generation of heat and multiphase flows. The 3D model of a 50 x 30 x 6 metal plate cutaway padded with the use of the GMA method with a wire of 1.2 mm diameter was developed. The presentation of the distribution of temperature in time, the process of melting and later solidifying of the material, as well as the transport of the material from the arc to the padding weld were focused the article. The initial verification of the model by comparison the results with a picture recorded by 1000 frames/second fast camera was shown.

Wstęp

W artykule badano zjawiska cieplne występujące w spawalniczym łuku elektrycznym podczas procesu napawania. Celem pracy było przygotowanie modelu numerycznego przy wykorzystaniu komercyjnego pakietu CFD do symulowania procesu napawania ze szczególnym naciskiem na zjawiska wymiany ciepła w obszarze działania spawalniczego łuku elektrycznego. Podstawą pracy było zagadnienie intensyfikacji procesu napawania oraz odprowadzania ciepła z obszaru łuku elektrycznego oraz układanej napoi. Podobne zjawiska obecnie są tematem prac badawczych prowadzonych na świecie [1]. Schemat badanego układu do napawania GMA zaprezentowano na rysunku 1.

Głowica do napawania porusza się ruchem posuwistym. Łuk elektryczny powstający pomiędzy drutem i napawanym materiałem powoduje topienie drutu,

a siły elektromagnetyczne przyspieszają ruch kropli metalu w kierunku napawanej blachy, gdzie powstaje przesuujące się jeziorko napoi. Spawalniczy łuk elektryczny nadtopia również napawaną blachę – następuje



Mesh (Time=5.3500e+00) ANSYS FLUENT 12.1 (3d, dp, pbn, vof, ske, transient) May 04, 2010

Rys. 1. Model układu do napawania GMA
Fig. 1. Model of GMA surfacing station

Mgr inż. Jacek Słoma, dr hab. inż. Ireneusz Szczygieł prof. PŚI., dr inż. Andrzej Sachajdak – Politechnika Śląska.

wymieszanie materiału stopionego z materiałem dodatkowym do spawania. Jest to zjawisko pożądane dla skutecznego i trwałego połączenia napoiny z napawaną blachą. Jednak nadmierne wymieszanie materiału napoiny i blachy jest niekorzystne ze względu na właściwości napoiny. Jakość napoiny zależy też od szybkości jej krystalizacji – tym lepsza napoina, im krystalizacja przebiega szybciej. Procesy te są zależne od prędkości posuwu uchwyty spawalniczego, mocy łuku i zdolności do odprowadzania ciepła z układu [2]. Parametrem, który powinien uwzględnić te zależności, jest energia liniowa spawania. Zależy ona wprost proporcjonalnie od iloczynu natężenia prądu spawania I i napięcia łuku elektrycznego U i odwrotnie proporcjonalnie od prędkości spawania v_{sp} , co opisuje zależność:

$$E_L = \frac{U \cdot I}{v_{sp}} \quad (1)$$

Jednak nie jest możliwe nieskończone zwiększanie prędkości spawania oraz prądu spawania i napięcia łuku elektrycznego. W pewnym momencie ograniczenia związane z odprowadzaniem ciepła z napawanego materiału uniemożliwiają wzrost tych parametrów. Modelowanie numeryczne może być narzędziem do określenia optymalnego ze względu na właściwości napoiny zakresu energii liniowej spawania.

Model matematyczny procesu

Model numeryczny przepływu masy i energii w pobliżu spawalniczego łuku elektrycznego podczas napawania przygotowano przy użyciu pakietu CFD Ansys-Fluent 12.1 [3]. Modelowanie zjawisk fizycznych oparto na zasadzie zachowania masy, równaniu transportu masy, równaniu pędu, modelu turbulencji k-epsilon, modelu przepływów wielofazowych VOF (*volume of fluid*) i opisano równaniami 2÷13.

Zasada zachowania masy (równanie ciągłości)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (2)$$

gdzie: ρ – gęstość, kg/m³; t – czas, s; v – wektor prędkości, m/s.

Równanie transportu masy

$$\frac{1}{\rho_q} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) \right] = \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \quad (3)$$

gdzie: \dot{m}_{qp} – strumień masy z fazy q do fazy p , \dot{m}_{pq} – strumień masy z fazy p do fazy q , α – udział objętościowy fazy q , ρ_q – gęstość fazy q , kg/m³; v_q – prędkość wektorowa fazy q , m/s.

Równanie pędu

Pojedyncze równanie pędu rozwiązane w domenie i wynikowe pole prędkości jest przypisane obu fazom. W przedstawionym poniżej równaniu pędu właściwości substancji przyjęto proporcjonalnie do udziału objętościowego faz.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = \nabla p + \nabla [\mu (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T)] + \rho \vec{g} + S \quad (4)$$

gdzie: p – ciśnienie, Pa; g – przyspieszenie ziemskie, m/s², μ – lepkość dynamiczna, kg/ms.

W obszarze krystalizacji przepływy modelowano jak dla ciała porowatego. Założono, że porowatość w każdej komórce jest proporcjonalna do udziału frakcji ciekłej, natomiast w całkowicie zestalonych obszarach porowatość jest równa zero – nie wyznaczano wówczas pola prędkości. Ujemne źródło momentu uwzględniające krzepnięcie materiału wyznaczano z następującego wzoru:

$$S = \frac{(1-\beta)^2}{\beta^3 + \varepsilon} A_{mush} (\vec{v} - \vec{v}_p) \quad (5)$$

gdzie: β – udział objętościowy fazy ciekłej, ε – mała liczba (0,001) zapobiegająca dzieleniu przez zero, A_{mush} – stała obszaru krystalizacji, v – prędkość ciała stałego wynikająca z wyciągania zestalonego materiału z obszaru obliczeń.

Równanie energii

Zjawisko krystalizacji/topienia opisuje równanie energii

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho H) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} H) = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q \quad (6)$$

Model VOF traktuje entalpię H oraz temperaturę T , jako zmienne uśrednione względem udziałów masowych faz:

$$H = \frac{\sum_{q=1}^n \alpha_q \rho_q H_q}{\sum_{q=1}^n \alpha_q \rho_q} \quad (7)$$

gdzie entalpię H_q dla każdej fazy opiera się na ciepłe właściwym tej fazy, ciepłe utajonym i temperaturze uśrednionej dla obu faz. Właściwości p oraz k (przewodność cieplna) są uśrednione dla obu faz. Udział fazy ciekłej β określany jest jako:

$$\beta = 0 \quad \text{jeśli } T < T_{\text{solidus}} \quad (8)$$

$$\beta = 1 \quad \text{jeśli } T > T_{\text{liquidus}} \quad (9)$$

$$\beta = \frac{T - T_{\text{solidus}}}{T_{\text{liquidus}} - T_{\text{solidus}}} \quad \text{jeśli } T_{\text{solidus}} < T < T_{\text{liquidus}} \quad (10)$$

Wartość ciepła utajonego (zmiany fazy) można przedstawić jako ciepło utajone materiału L

$$\Delta H = \beta L \quad (11)$$

Wartość ciepła utajonego może mieć wartość zero dla ciała stałego, a L dla cieczy.

Człon źródłowy Q zawiera udział promieniowania cieplnego wyliczanego przy użyciu metody Discrete Ordinate oraz inne objętościowe źródła ciepła, w tym energię wydzielaną w łuku elektrycznym:

$$Q = Q^R + Q^{EA} \quad (12)$$

gdzie:

$$Q^{EA} = \frac{I^{EA} U^{EA}}{V^{EA}} \quad (13)$$

oraz: I^{EA} – natężenie prądu spawania, A; U^{EA} – napięcie łuku elektrycznego, V; V^{EA} – objętość łuku elektrycznego, m³.

Założenia modelu

Przedstawiony przypadek 3D obejmował wycinek 50 x 30 mm blachy 500MC grubości 6 mm o następujących właściwościach materiałowych: gęstość 7850 kg/m³, temperatura liquidus 1520°C, temperatura solidus 1350°C, ciepło właściwe 460 J/(kg x K), ciepło topnienia 272 kJ/kg.

Napawanie wykonano drutem Autrod 13.91 o średnicy 1,2 mm.

Geometrię wykorzystaną w modelu numerycznym wraz z naniesioną siatką pokazano na rysunku 2.

Obszar analizy podzielono na 2 miliony komórek wielościennych (*polyhedra*), wykorzystując symetrię układu. Dodatkowo wydzielono obszar łuku elektrycznego pomiędzy drutem elektrodowym a napawaną płytą. W obszarze tym zastosowano funkcje opisujące wydzielanie się energii cieplnej z łuku elektrycznego w postaci członu źródłowego w równaniu energii.

Głowica urządzenia spawalniczego z elektrodą przesuwa się równoległe do płyty z prędkością 0,0026 m/s. Jednocześnie następuje topienie i posuw drutu elektrodowego z prędkością 0,02 m/s w kierunku płyty. Natężenie przepływu gazu osłonowego (argonu) wynosi 12 l/min. Wartości te odpowiadają standardowym parametrom napawania.

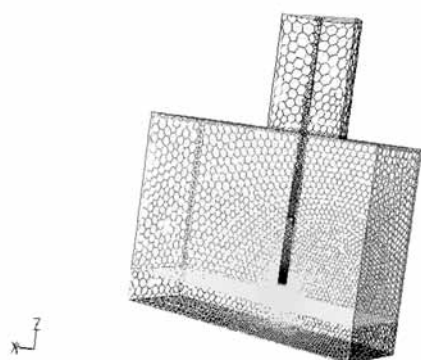
Założono następujące warunki brzegowe:

- natężenie przepływu gazu osłonowego 12 l/min,

- prędkość posuwu drutu 0,02 m/s,
 - temperatura otoczenia $t_{am} = 20^\circ\text{C}$,
 - ciśnienie otoczenia $p_{am} = p_{oper} = 101\,325\text{ Pa}$,
 - na dolnej powierzchni napawanej płyty założono współczynnik wnikania ciepła $a = 30\text{ W}/(\text{m}^2 \times \text{K})$,
 - temperatura otoczenia 300 K,
 - prędkość posuwu elektrody względem napawanej płyty 0,0026 m/s,
 - obszar ograniczono warunkiem brzegowym typu *pressure-outlet* mającym odzwierciedlać oddziaływanie obszaru spawania z otoczeniem.
- Ponieważ modelowanie zjawisk topienia i krystalizacji wraz z przepływami wielofazowymi nadal jest zagadnieniem skomplikowanym, na granicy możliwości pakietów CFD takich jak Fluent, obliczenia prowadzono wieloetapowo od zjawisk najprostszych po najbardziej złożony model według następującego schematu:
- przepływ gazu osłonowego,
 - przepływ gazu osłonowego oraz krystalizacja napoiny,
 - przepływ gazu osłonowego, krystalizacja napoiny, topienie drutu.

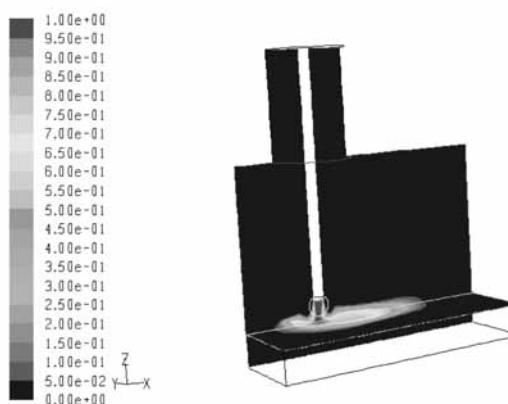
Wyniki obliczeń numerycznych

Na rysunkach 3-6 przedstawiono wyniki obliczeń numerycznych dla analizowanego przypadku. Głównym celem obliczeń dla badanego zjawiska napawania jest rozkład temperatury oraz warunki rozplywu ciepła z obszaru spawalniczego łuku elektrycznego. Jednakże bezpośredni wpływ na badany rozkład ma wiele innych zjawisk biorących udział w procesie napawania. Jest to główną z przyczyn, które powodują, że modelowanie takiego procesu jest nadal niezwykle trudne i czasochłonne oraz wymaga wprowadzania wielu uproszczeń. Rysunki zamieszczone w artykule przedstawiają wyniki symulacji zjawisk mających wpływ na wynikowe pole temperatury. Na rysunku 3



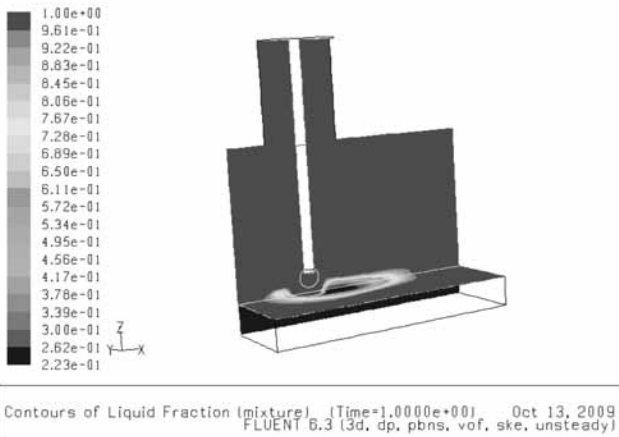
Grid (Time=0.0000e+00) Aug 03, 2009
FLUENT 6.3 (3d, dp, pbns, ske, unsteady)

Rys. 2. Przekrój modelu wraz z siatką
Fig. 2. The cross section of model with grid

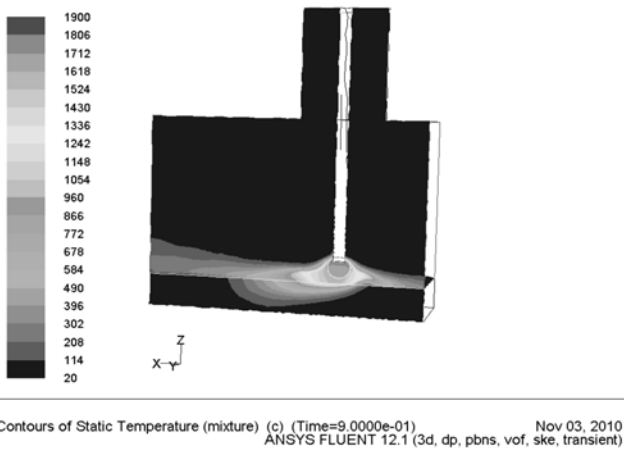


Contours of Volume fraction (phase-2) (Time=1.0000e+00) Oct 13, 2009
FLUENT 6.3 (3d, dp, pbns, vof, ske, unsteady)

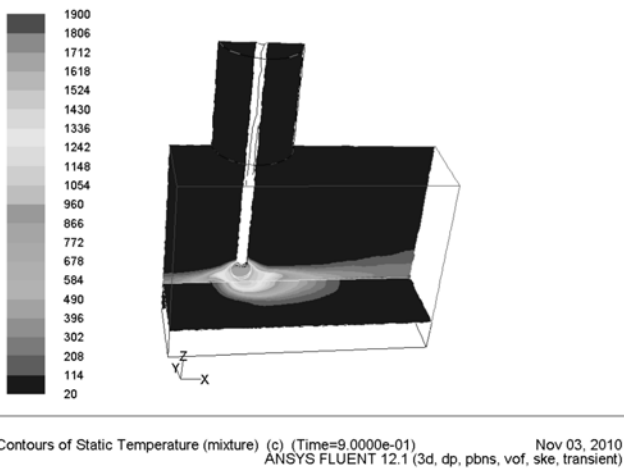
Rys. 3. Ułożenie materiału po 1 sekundzie
Fig. 3. The padding weld after 1 second



Rys. 4. Krystalizacja materiału po 1 sekundzie
Fig. 4. Crystallization of material after 1 second



Rys. 5. Temperatura po 1 sekundzie – przekrój wzdłuż płaszczyzny symetrii
Fig. 5. The temperature decomposition after 1 second – cross section along the plane of symmetry



Rys. 6. Temperatura po 1 sekundzie – widok z góry
Fig. 6. The temperature decomposition after 1 second – the top view

Tablica I. Parametry napawania

Table I. The parameters of process of the arc weld surfacing

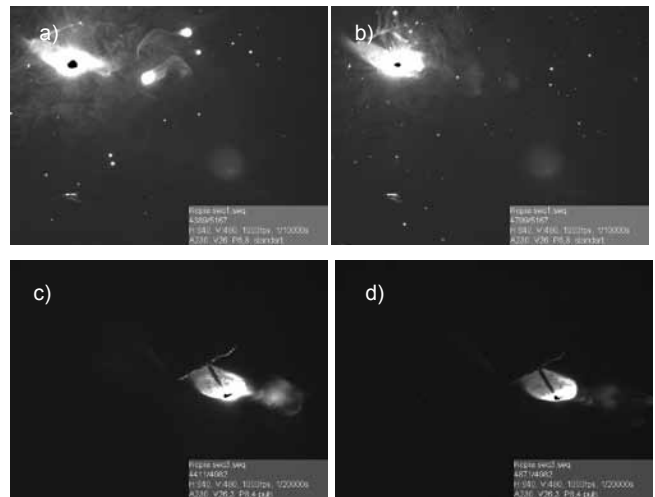
Przykłady	Ustawienia spawarki				Uwagi	Ustawienia kamery		
	Natężenie A	Napięcie V	Posuw drutu m/min	Rodzaj łuku spawalniczego		Ilość klatek/s fps	Czas migawki s	Uwagi
1	230	26,0	6,8	zwarciowy	drut Autrod 13.91	1.000	1/20.000	przesłona 11
2	230	26,3	8,4	impulsowy	drut Autrod 13.91	1.000	1/10.000	przesłona 11

przedstawiono udział napawanego materiału podczas symulacji przepływu substancji w badanym układzie. W przybliżeniu taki rozkład można traktować jako sposób ułożenia napoiny na napawanym materiale. Na rysunku 4 przedstawiono wyniki symulacji procesu krystalizacji napawanego materiału. Rozkłady temperatury pokazane na rysunkach 5 i 6 należy traktować jako wynik końcowy symulacji, na podstawie którego wnioskować można np. o przewidywanej jakości spoiny.

Dokumentowanie procesu

Przeprowadzono wstępną walidację modeli przez filmowanie rzeczywistego procesu za pomocą szybkiej kamery. Badano spawanie dwoma rodzajami łuku: łukiem impulsowym i łukiem zwarciowym.

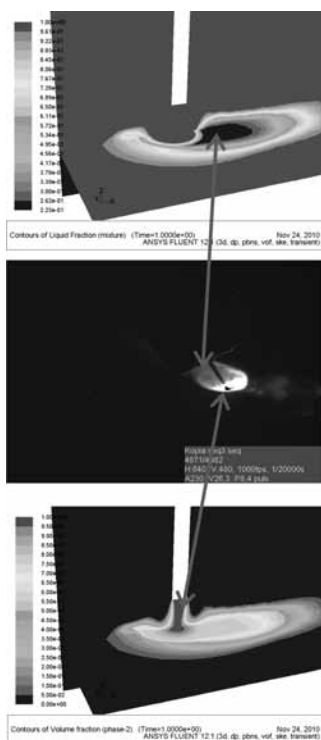
Parametry napawania przedstawiono w tabelcy I. Na rysunku 7 przedstawiono sekwencję napawania klatka po klatce, na której można zaobserwować różnice pomiędzy dwoma rodzajami łuku spawalniczego. W łuku zwarciowym (rys. 7a i 7b) widoczny jest ciągle strumień topionego metalu. Przy łuku impulsowym (rys. 7c i 7d) widoczna jest powstająca kropla, tzw. mostek, a następnie jarzący się łuk.



Rys. 7. Sekwencja napawania: a-b) łuk zwarciowy; c-d) łuk impulsowy
Fig. 7. The arc weld surfacing process: a-b) the dip-transfer arc, c-d) the pulse arc

Porównanie wyników

Na rysunku 8 przedstawiono porównanie obrazów wizualnych z wynikami obliczeń numerycznych. Mimo ograniczeń porównywania techniki wizualizacji z wynikami analitycznymi zaobserwowano pewne prawidłowości – kształt jeziora spawalniczego i krystalizującego się czoła napoiny został oddany prawidłowo. Zaobserwować również można strumień stopionego metalu przepływający od elektrody do jeziora spawalniczego. Świadczy to o poprawności założeń przyjętych w modelu. Na podstawie analizy zdjęć obszaru napawania wyciągnięto także wnioski mogące



Rys. 8. Porównanie uzyskanego obrazu z obliczeniami numerycznymi

Fig. 8. The comparison of visual image with numerical calculation

usprawnić działanie modelu w przyszłości, przede wszystkim dotyczące kształtu i granic łuku elektrycznego czy odległości elektrody od napawanego materiału.

Wnioski

Opracowano wstępny model numeryczny napawania z uwzględnieniem topienia i krystalizacji napoiny w geometrii 3D. Wstępne obliczenia wykazują, że możliwe jest modelowanie przedstawionych zjawisk za pomocą dostępnego obecnie sprzętu komputerowego i oprogramowania, jednakże przy bardzo krótkich skokach czasowych oraz dość długich czasach obliczeń.

Uzyskane sekwencje zdjęć mogą być podstawą do wstępnej weryfikacji modeli numerycznych ze względu na wyraźne podobieństwo kształtu jeziora na symulacjach numerycznych oraz z pomiarów.

Planowany jest dalszy rozwój i usprawnienie modelu numerycznego w celu skrócenia czasu obliczeń, co wydaje się warunkiem koniecznym dla wykorzystania modelu w praktyce.

Literatura

- [1] Xu G., Hu J., Tsai H.L.: Three-dimensional modeling of arc plasma and metal transfer in gas metal arc welding, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52/2009, s. 1709–1724.
- [2] Fic A., Szczygieł I., Sachajdak A.: Analiza wrażliwości temperatury względem oporu kontaktowego w układzie do napawania powierzchni, XIII Sympozjum Wymiany ciepła i masy.
- [3] Ansys Fluent 12.0 Theory Guide.

Krajowe konferencje i seminaria spawalnicze w 2011 roku

pod patronatem medialnym Przeglądu Spawalnictwa

Tytuł konferencji	Data	Miejsce	Organizator
XV Gdańskie Spotkanie Spawalników i XIII Pomorskie Sympozjum Spawalnictwa	8 września	Gdańsk	Zakład Inżynierii Spajania Politechniki Gdańskiej i Linde Gaz Polska Sp. z o.o. Jednodniowe wykłady, pokazy sprzętu spawalniczego, spotkanie towarzyskie, zaświadczenie o szkoleniu tel.: 58 511 28 00; e-mail: iwona.janson@pl.linde-gas.com
1. Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna Napawanie – postęp i zastosowania	19-21 września	Wrocław	Dolnośląska Sekcja Spawalnicza SIMP; Zakład Spawalnictwa Instytutu Technologii Maszyn i Automatykacji; Wydział Mechaniczny Politechniki Wrocławskiej; EUROMAT, Wrocław tel.: 71 720 20 74; e-mail: anna.wozna@pwr.wroc.pl
53. Naukowo-Techniczna Konferencja Spawalnicza Nowe kierunki w procesach spajania i cięcia metali	12-14 października	Poznań	SIMP – Sekcja Spawalnicza w Poznaniu, Technika Spawalnicza Poznań, Rywal RHC tel.: 602 118 401; e-mail: mirosław.nowak@techspaw.com.pl