

Wpływ pulsacji łuku MIG na strukturę spoin stopów aluminium

Influence of pulsation of the MIG arc on the structure of aluminium alloys welds

Streszczenie

W artykule omówiono kierunki rozwoju urządzeń spawalniczych w Japonii. Przedstawiono wyniki badań wpływu spawania metodą MIG z pojedynczą i podwójną pulsacją łuku na makrostrukturę spoin aluminiowych. Ustalono, że spawanie z podwójnym pulsem ze względu na niższą energię liniową (tzw. zimne jezioro) daje najbardziej rozdrobnioną strukturę krystaliczną. Spawanie z pojedynczym pulsem powoduje powstanie struktury krystalicznej rozdrobnioną tylko w samym nadlewie, natomiast spawanie bez pulsacji łuku wytwarza w spoinie bardzo niekorzystne kryształy słupkowe, które zwiększają skłonność do pęknięć na gorąco.

Abstract

In the article trends of development of welding equipment in Japan were discussed. Results of examinations of influence of welding using MIG method with both single and double arc pulsation on a macrostructure of aluminium welds are presented. It was stated that, because of lower line energy (so called cold weld pool), welding with double pulse has the most disintegrated crystalline structure. Welding with a single pulse results in crystalline structure in a weld reinforcement only, while welding without arc pulsation causes formation of very adverse columnar crystals, which increase susceptibility to hot cracking.

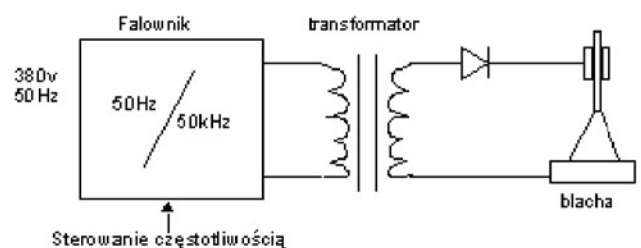
Wstęp

Rozwój elektroniki, technologii, fizyki łuku i informatyki spawalniczej (mechatroniki) spowodował, że spawalnicze źródła zasilania, a także ich wyposażenie znacznie się zmieniły. Różne sposoby kontroli parametrów wyjściowych spawarek i metody kontroli procesów spawalniczych spowodowały, że techniki, które tradycyjnie byłyby niemożliwe do zastosowania, mogły być stosunkowo łatwo realizowane.

Istotnie rozwinięto kontrolę temperatury jeziora spawalniczego, a tym samym kontrolę struktury metalurgicznej i parametrów wytrzymałościowych materiałów drobnoziarnistych, stali stopowych i aluminium.

Nowoczesne urządzenia spawalnicze znacznie różnią się od urządzeń starego typu, ponieważ wykorzystują inwertorowe źródła zasilania z wewnętrzną zmianą częstotliwości,

dające możliwość uzyskania odpowiedniej charakterystyki statycznej $U(I)$ i dynamicznej na wyjściu $U(I, t)$. Zastosowane mikrokomputerowe systemy sterowania parametrami prądu pulsacyjnego i kontroli tych parametrów na wyjściu umożliwiły precyzyjne sterowanie zjawiskami zachodzącymi podczas spawania w łuku elektrycznym. Rozwój tego typu urządzeń, w których elektronika steruje sygnałem prądowym uzyskiwanym na wyjściu, kontroluje go, a także zmienia w zależności od czynników zakłócających, spowodował, że urządzenia te za pomocą odpowiedniego programu mogą realizować pro-



Rys. 1. Schemat spawarki inwertorowej
Fig. 1. Diagram of an inverted welding machine

Prof. dr hab. inż. Edmund Tasak – AGH Kraków, Adam Jastrzębski – student Inżynierii Spajania V roku AGH i II roku budownictwa Politechniki Krakowskiej.

cesy niemożliwe do zrealizowania przy zastosowaniu urządzeń tradycyjnych.

Zastosowanie odpowiedniego programu pulsacji łuku umożliwia spawanie:

- przetopu zimnym jeziorkiem, „STT” i „FastRoot”,
- impulsowe zwarciove aluminium ze stałą,
- stali nierdzewnych z pojedynczym pulsem,
- aluminium z podwójnym pulsem,
- kilkoma łukami w jednym dużym i zimnym jeziorku spawalniczym.

Pozostaje jeszcze omówić budowę regulatorów prądu i napięcia proporcjonalno-całkująco-różniczkujących działających na jeden ze sposobów:

- kształtowanie przebiegu prądu w czasie stosowane jest w urządzeniach do spawania łukiem zwarciowym wykorzystywanych do wykonywania przetopów,
- kształtowanie przebiegu napięcia w czasie stosowane jest w urządzeniach z natryskowym forsowaniem łuku powodującym zawężenie łuku, wzrost ciśnienia i wtopienia w wyniku obniżenia temperatury łuku chłodzonego strumieniem przemieszczających się małych kropeł [2].

Zastępuje to sztywną i opadającą charakterystykę statyczną tradycyjnych urządzeń w warunkach dynamicznych.

W dalszej części artykułu zostaną omówiono różne rodzaje pulsacji łuku. Podczas spawania MIG/MAG bardzo często pulsację łuku stosuje się w celu zmniejszenia ilości odprysków, nie jest to jednak jedyny efekt, który pulsacja łuku powoduje.

Rodzaje pulsacji łuku

Metody pulsacji łuku możemy podzielić na puls: pojedynczy tzw. Standard puls, podwójny tzw. Super puls, hybrydowy. Wszystkie rodzaje i odmiany pulsacji łuku pokazano w tabelcy I.

Pojedynczy puls polega na pulsacji prądu od prądu bazy I_b do prądu impulsu I_p . Puls ten może odbywać się jako puls DC i AC. Pojedynczy puls prądu DC to puls, którego wahania odbywają się w zakresie prądu stałego. Puls ten pozwala kontrolować przenoszenie kropeł ciekłego metalu w łuku spawalniczym, czego efektem jest przenoszenie jednej kropli w czasie jednego impulsu, a tym samym ograniczenie odprysków spawalniczych. Natomiast puls AC jest bardzo zbliżony kształtem do DC, z tą zasadniczą różnicą, że prąd bazy na wykresie znajduje się po przeciwnej stronie osi 0, a więc pulsacja odbywa się w zakresach prądu przemiennego. Taka pulsacja pozwala kontrolować przenoszenie kropeł i ilość wprowadzonego ciepła, co powoduje, że możemy przenosić jedną kroplę w czasie jednego impulsu, ograniczyć wtopienie i zwiększyć wydajność topienia drutu.

Prąd AC prostokątny niesymetryczny dzięki regulacji balansu (udziału czasu jarzenia się łuku DC+ do czasu jarzenia się łuku DC-) i offsetu (udziału napięcia dodatniego do napięcia ujemnego) pozwala na płynną regulację szybkości stapiania elektrody (zabieranie ciepła topienia), głębokości wtopienia (obniżanie temperatury jeziorka ciepłem topienia), szerokości ściegu i grzania jeziorka.

Tablica I. Rodzaje pulsacji łuku [1]

Table I. Types of arc pulsation [1]

Rodzaj pulsu	Charakterystyka prądowa	Pozwala kontrolować			Spowodowany efekt
		przenoszenie kropeł	ciekle jeziorko	wprowadzane ciepło	
Standardowy puls (pojedynczy puls)	D C 				- w czasie jednego pulsu przenoszona jedna kropla - ograniczenie odprysków spawalniczych
	A C 				- w czasie jednego pulsu przenoszona jedna kropla - płytsze wtopienie - wysoka prędkość topienia drutu
Super puls z niską częstotliwością pulsu (podwójny puls)	D C 				- sterowanie topieniem jeziorka za pomocą charakterystyki prądowej - przeciwdziałanie wadom spoiny przez pulsację topionego jeziorka
	A C 				- sterowanie topieniem jeziorka za pomocą charakterystyki prądowej - zapobieganie przepaleniom podczas spawania cienkiej blachy - kontrola wprowadzonego ciepła
AC/DC hybrydowy puls					- kontrola trwania DC/AC - kontrola topionego jeziorka i wprowadzonego ciepła - kontrola szerokości topienia

Stosowanie tradycyjnych źródeł ciepła dających stałą szybkość topienia materiału dodatkowego wymusiło teoretyczne rozpracowanie techniki spawania i uczenie spawaczy wpływanie na procesy cieplne przez zmianę położenia łuku w stosunku do jeziorka. Spawacz prowadząc łuk na początku jeziorka zwiększał wtopienie, odbierał ciepło topienia i obniżał temperaturę jeziorka, a prowadząc uchwyt wolniej w końcowej części jeziorka zmniejszał wtopienie i zgodnie z zasadami termodynamiki podwyższał temperaturę jeziorka [4].

Te mało znane metody nie mogły pokonać wiary spawalników we wpływanie na strukturę poprzez energię liniową. Zagraniczni konstruktorzy podchwycili tę myśl i nową generacją urządzenia STT do wykonywania przetopu przez zmianę własności łuku w wyniku parowania wykrywają położenie łuku w stosunku do jeziorka. Gdy spawacz prowadzi łuk w początkowej części jeziorka, komputer spawarki zmniejsza moc topienia przez zmniejszenie częstotliwości impulsów, a gdy spawacz prowadzi łuk w końcowej części jeziorka, automatyka zwiększa moc topienia i obniża temperaturę jeziorka przez wzrost częstotliwości impulsów prądu zwarciovego.

Powstanie tych urządzeń usuwa w cień stosowane w przeszłości modele punktowego i liniowego źródła ciepła w obliczaniu procesów ciepłno-mechanicznych spawania i zamianie dotychczas stosowanej w WPS energii liniowej na energię potrzebną do wykonania 1 kg spoiny.

Podwójny puls łączy w sobie dwa pulsy, o dużej częstotliwości i o niskiej częstotliwości, który moduluje ten pierwszy. Oba pulsy w wyniku pulsacji jeziorka i mocy łuku powodują ograniczenie pęknięć, zabezpieczenie przed porowatością i zatrzymanie topienia. Pulsacja tego typu może być stosowana do sterowania DC i AC, a obie te pulsacje zarówno dla prądu DC, jak i AC dzięki kontroli przenoszenia kropli do ciekłego jeziorka, a w przypadku AC także ilości wprowadzonego ciepła, pozwalają na sterowanie jeziorkiem przez topienie podłoża, przeciwdziałanie wadom spoiny, zapobieganie przegrzaniu i przepaleniu materiału.

Puls hybrydowy jest to metoda alternatywnej wymiany w określonym czasie pomiędzy pulsacją prądu AC i DC. Wymiana ta pozwala na sterowanie kształtem zgodnie z czasem trwania AC do DC. Puls hybrydowy umożliwia kontrolę jeziorka przez odbieranie ciepła topienia podłoża i ilości wprowadzonego ciepła oraz kontrolę szerokości topienia.

Charakterystyka pojedynczej i podwójnej pulsacji prądu

W czasie spawania aluminium największą trudnością jest topienie podłoża, które wymaga podgrzania blach o bardzo dużej przewodności cieplnej. Parametry spawania impulsowego ustawia się tak, aby w trakcie trwania prądu bazy blacha była nagrzewana, a podczas prądu impulsu była topiona. Ta zmiana wartości prądu wytwarza pole magnetyczne, które urywa kroplę i stabilizuje jej przechodzenie w łuku elektrycznym do jeziorka (rys. 2).

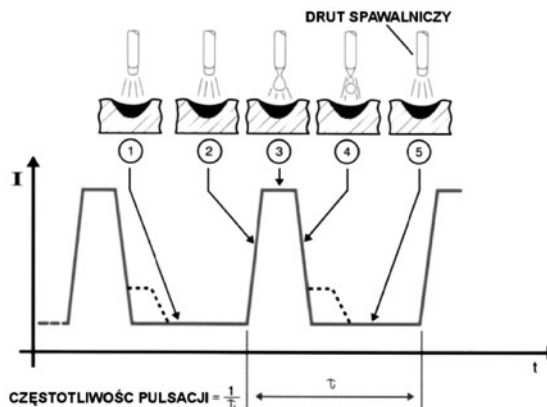
Kropla stopionego metalu jest „zimna” w stosunku do temperatury metalu w jeziorku spawalniczym i w kontakcie z nim może spowodować rozprysk metalu. Urywanie mniejszych kropli zwiększa stosunek powierzchni grzania do masy kropli, co powoduje, że w trakcie przechodzenia kropli w łuku elektrycznym małe krople wpadając do ciekłego jeziorka nie powodują rozprysków. Aby to uzyskać, zwiększa się częstotliwość pulsacji, co powoduje zwiększenie częstotliwości urywania mniejszych kropli.

Spawanie pojedynczym pulsem powoduje, że proces krystalizacji jest prawie ciągły, gdyż małe krople wpadające do

jeziorka nie przerywają krystalizacji i nie powodują jej zatrzymywania.

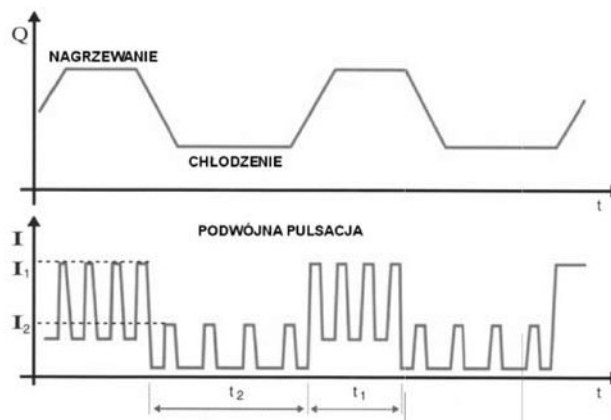
W celu uzyskania krystalizacji o charakterze przerywanym, co znacznie rozdrabnia strukturę, musimy wprowadzić podwójny puls, który polega na modulacji impulsu wysokiej częstotliwości impulsem małej częstotliwości (ta operacja znana jest z techniki radiowej). Podczas spawania z podwójnym pulsem występuje nagrzewanie i chłodzenie ciekłego jeziorka (rys. 3). W wyniku zwiększania i zmniejszania ilości doprowadzonego ciepła proces krystalizacji staje się przerywany, a wizualnym efektem jest pojawienie się regularnej łuski.

Na rysunku 4 porównano wygląd spoiny aluminiowej z pojedynczym i podwójnym pulsem.



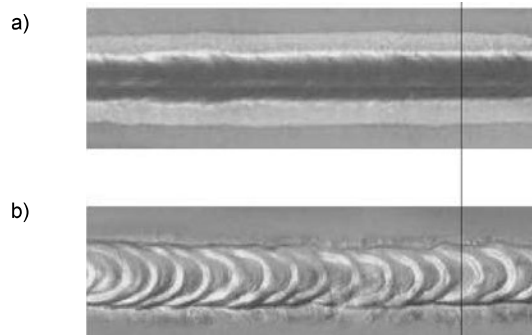
Rys. 2. Schemat przebiegu prądu podczas spawania z pojedynczym pulsem [3]

Fig. 2. Current waveform during welding with a single pulse [3]



Rys. 3. Schemat przebiegu prądu podczas spawania z podwójnym pulsem [3]

Fig. 3. Current waveform during welding with a double pulse [3]



Rys. 4. Spoina wykonana: a – pojedynczym pulsem b – podwójnym pulsem

Fig. 4. Weld carried out: a – with a single pulse b – with a double pulse

Następnym problemem podczas spawania aluminium metodą MIG jest przegrzanie materiału związane z wysoką temperaturą jeziora spawalniczego. Przez wprowadzenie podwójnego pulsu można efektywnie obniżyć temperaturę jeziora, ograniczyć rozrost ziaren i zmniejszyć wymieszanie materiału w jeziorce.

Urządzenia zastosowane do badań

Spawalne stopy aluminium charakteryzują się skłonnością do pęknięcia na gorąco. Znaczący wpływ na pęknięcie ma charakter krystalizacji podczas krzepnięcia spoiny. Z metalurgii spawania wiadomo, że rozdrobnienie struktury powstałej podczas krzepnięcia istotnie wpływa na zwiększenie odporności na pęknięcie gorące. Celem pracy było sprawdzenie możliwości zewnętrznego oddziaływania na proces krzepnięcia i strukturę spoiny przez pulsację łuku.

Obecnie nowoczesne urządzenia do spawania metodą MIG mają inwertorowe układy zasilania. Są to urządzenia, które przekształcają prąd o częstotliwości 50 Hz na częstotliwość od 20 do 100 kHz. Regulacja prądu spawania odbywa się przez zmianę częstotliwości. Przy niższych częstotliwościach prąd jest mniejszy. Wzrost częstotliwości powoduje wzrost wartości prądu spawania. Spawanie może odbywać się z podwójną lub pojedynczą pulsacją łuku.

Próbki do badań wykonano w Morskiej Stoczni Remontowej Świnoujście za pomocą urządzenia firmy ESAB Synergimig 402 i Fronius.

Zalety inwertorowego układu zasilania MIG z podwójnym pulsem są następujące:

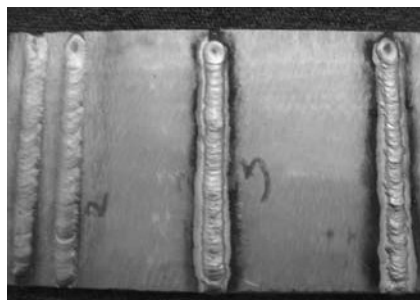
- bardzo dokładna regulacja prądu spawania, nawet przy dużych natężeniach prądu spawania,
- dużo lżejsze i mniejsze od tradycyjnych źródła zasilania tej samej mocy,
- możliwość regulacji parametrów statycznych $U(I)$ i dynamicznych $U(I, t)$,
- możliwość regulacji przechodzenia metalu w łuku, temperatury łuku, kąta rozwarcia łuku i kontrola głębokości wtopienia,
- większa sprawność tych urządzeń pozwalająca uzyskiwać takie same efekty przy nastawach parametrów o 30% mniejszych w stosunku do tradycyjnych.

Wykonanie połączeń spawanych

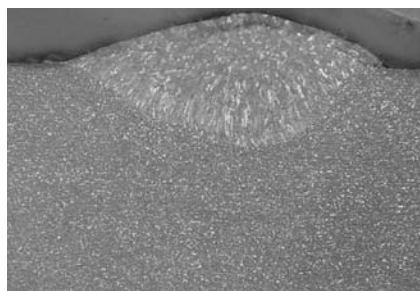
Połączenia spawane wykonane zostały wg opracowanych instrukcji spawania (WPS).

Na blasze aluminiowej o wymiarach 300 x 150 mm i grubości 12 mm zostały wykonane 4 napoiny w odpowiedniej odległości, tak aby strefy wpływu ciepła nie nakładały się na siebie. Dwie napoiny były wykonane tradycyjną metodą MIG, jedna z pojedynczym pulsem i jedna z podwójnym pulsem. Ponieważ spawanie aluminium wymaga podgrzania do temperatury 20÷50°C i technika spawania jest silnie uzależniona od temperatury podgrzania, to zimną próbkę spawano najpierw metodą z podwójnym pulsem, a następnie już podgrzaną próbkę spawano pojedynczym pulsem, na końcu dobrze nagrzaną próbkę spawano bez pulsu. Spawanie w odwrotnej kolejności powodowało powstawanie przyklejeń. Wygląd pospawanej płyty pokazano na rysunku 5. Parametry wykonywania napoin oraz energię liniową spawania podano w tablicy II.

Z napawanej płyty wycięto próbki poprzeczne do badań makroskopowych. Wygląd makrostruktury napoin pokazano na rysunkach 6÷8.



Rys. 5. Płyta próbna z wykonanymi napoinami
Fig. 5. Test plate with padding welds carried out

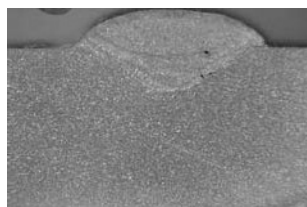


Rys. 6. Makrostruktura napoiny aluminiowej wykonanej bez pulsacji
Fig. 6. Macrostructure of aluminium pudding weld carried out without arc pulsation

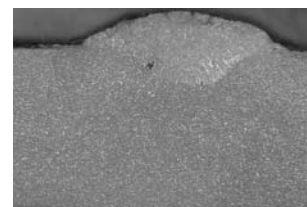
Napoina wykonana bez pulsacji łuku wykazuje wyraźną strukturę dendrytyczną (rys. 6), natomiast napoiny wykonane z pulsem pojedynczym (rys. 7) i podwójnym (rys. 8) mają wyraźnie drobniejszą makrostrukturę oraz nie wykazują struktury kolumnowej. Widoczne są ponadto linie przystankowe występujące w procesie krzepnięcia (rys. 7). Napoiny wykonane z pulsacją łuku mają wyraźnie wyższy nadlew, co świadczy o intensywniejszym topieniu drutu w porównaniu z topieniem materiału blachy.

Tablica II. Parametry napawania
Table II. Parameters of surfacing

Ścieg	Natężenie prądu, A	Napięcie, V	Energia liniowa, J/mm	Uwagi
1.	160	23,3	500	bez pulsu + zakosy
2.	162	23,2	580	bez pulsu + zakosy
3.	107	22	516	puls pojedynczy + zakosy
4.	96	21,8	482	puls podwójny + zakosy



Rys. 7. Makrostruktura napoiny aluminiowej wykonanej z pojedynczym pulsem łuku. Rozdrobniona struktura w nadlewie
Fig. 7. Macrostructure of aluminium pudding weld carried out with a single arc pulse. Disintegrated structure in the reinforcement



Rys. 8. Makrostruktura napoiny aluminiowej wykonanej z podwójną pulsacją łuku. Rozdrobniona strefa wtopienia i nadlew
Fig. 8. Macrostructure of aluminium pudding weld carried out with a double arc pulse. Disintegrated fused zone and reinforcement

Wnioski

Przeprowadzone badania wykazały, że możliwe jest rozdrobnienie struktury spoiny wskutek oddziaływania na sposób topienia i przenoszenia metalu w łuku. Zastosowanie pojedynczego i podwójnego pulsu podczas

spawania nowoczesnymi urządzeniami spawalniczymi pozwala zmienić charakter krzepnięcia, obniżyć energię liniową spawania, a przez to zwiększyć odporność na pęknięcia gorące.

Literatura

- [1] Tsuneo Mita, Shoji Hasrada: Trend and Perspective of Welding Power Source in Japan, Materiały z corocznej konferencji Międzynarodowego Instytutu Spawalnictwa IIW w Osace, 12-14 lipca 2004 r., Japonia, dokument IIW Nr XII-1824-04.
- [2] Lucas J.W., Smith S., Bertaso D., Melton G. and Balfour C.: Wizyjna kontrola rozmiaru jeziorka spawalniczego w czasie rzeczywistym, Przegląd Spawalnictwa nr 1/2009.
- [3] Japońskie Stowarzyszenie Spawalnicze: Yōsetsu gakkai-hen, Yōsetsu, setsugō gijutsu tokuron. Shinpan, Wydawnictwo Sanpō, 2008 (podręcznik międzynarodowego inżyniera spawalnictwa).
- [4] Jastrzębski R., Cenin M., Latała Z., Godniak M., Kaczor M., Padula H., Zielińska M., Yalinkilicli B.: Application of Space Technology i the Programing of Inteligent Vision Systems for Industrial Welding Robots, Materiały z corocznej konferencji Międzynarodowego Instytutu Spawalnictwa IIW w Osace, 12-14 lipca 2004 r., Japonia, dokument IIW Nr XII-1831-04.

II Międzynarodowa Konferencja Natryskiwania Ciepłego Metalizacja w Przemysle – dziś i jutro

Szklarska Poręba, 21-23 września 2009

ZAPROSZENIE • INFORMACJE

ORGANIZATORZY KONFERENCJI: Ośrodek Doskonalenia Kadr SIMP, Dolnośląska Sekcja Spawalnicza SIMP, Instytut Technologii Maszyn i Automatyzacji, Politechniki Wrocławskiej, Instytut Mechaniki Precyzyjnej, Warszawa

ZAKRES KONFERENCJI: Międzynarodowa konferencja poświęcona natryskiwaniu cieplnemu jest organizowana przez środowisko inżynieryjno-naukowe skupione wokół Sekcji Spawalniczej Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Mechaników Polskich. Konferencja ma na celu przedstawienie najnowszych badań naukowych z tej dziedziny jak, również omówienie nowych materiałów powłokowych, nowych urządzeń i nowych zastosowań przemysłowych. Zostaną omówione zagadnienia związane z wymaganiami stawianymi procesowi i zatrudnionemu personelowi przez normy ustanowione w Unii Europejskiej oraz zagadnienia związane z jakością i właściwościami powłok natryskanych cieplnie. Dodatkowo przewidziana jest sesja posterowa. Konferencji będzie towarzyszyć wystawa sprzętu i prezentacja osiągnięć zaproszonych firm z dziedziny natryskiwania ciepłego.

MATERIAŁY KONFERENCYJNE: Wszystkie zgłoszone referaty będą recenzowane i po zakwalifikowaniu do druku zostaną opublikowane w „Przeglądzie Spawalnictwa”. Uczestnicy otrzymają również zbiór referatów w formie elektronicznej.

JĘZYKI KONFERENCJI: Referaty będą wygłaszane w językach polskim i niemieckim.

ZGŁASZANIE UCZESTNICTWA: Wypełnione karty uczestnictwa prosimy przesyłać do 15 sierpnia 2009 roku.

KOSZT UCZESTNICTWA: Koszt uczestnictwa w konferencji wynosi 1250 złotych. Niższa opłata konferencyjna przewidziana dla autorów referatów wynosi 875 złotych. Organizatorzy zapewniają: materiały z wydrukowanymi referatami, płytę CD z tekstami artykułów, poczęstunek pomiędzy sesjami, obiady, kolacje, uroczystą kolację i atrakcyjny program imprez towarzyszących konferencji. W opłatę konferencyjną są wliczone koszty noclegów w hotelu. Opłatę konferencyjną prosimy przelać do dnia 15 sierpnia 2009 na konto:

Ośrodek Doskonalenia Kadr SIMP we Wrocławiu
PKO BP S.A. III O/Centrum we Wrocławiu
34 1020 5242 0000 2602 0192 4232

WYSTAWA: Konferencji będzie towarzyszyć wystawa poświęcona osiągnięciom zaproszonych firm specjalizujących się w natryskiwaniu cieplnym. Organizatorzy zapewniają powierzchnię wystawienniczą. Koszt stoiska o powierzchni 4 m² wynosi 2000 zł + VAT. Prosimy o zgłoszenie wystąpienia promocyjnego do 15 sierpnia 2009.

ZGŁASZANIE REFERATÓW: Autorzy proszeni są o zgłaszanie tytułów i streszczeń referatów (do 500 słów) nigdzie dotąd niepublikowanych. Termin nadsyłania pełnego tekstu referatu upływa 31 lipca 2009. Warunkiem opublikowania przyjętego do druku tekstu referatu w „Przeglądzie Spawalnictwa” będzie wnie sienie opłaty konferencyjnej. Propozycje referatów (pisanych wg wskazówek „Przeglądu Spawalnictwa”, www.pspaw.ps.pl) prosimy zgłaszać pod adres:

*mgr inż. Anna Olbrycht,
Instytut Mechaniki Precyzyjnej
ul. Duchnicka 3, 01-796 Warszawa
e-mail: korozja@imp.edu.pl*

MIEJSCE OBRAD: Miejscem obrad konferencji będzie hotel SUDETY w Szklarskiej Porębie, największej stacji klimatycznej Dolnego Śląska, położonej u podnóża Karkonoszy i Gór Iżerskich. Miasto ma wygodne połączenie drogowe z Wrocławiem, Warszawą oraz Pragą i łatwy dojazd kolejowy.

Hotel SUDETY
ul. Krasickiego 10, 58-580 Szklarska Poręba
tel.: 0-75 717 27 36 fax: 0-757172736
www.hotel-sudety.pl

SEKRETARIAT KONFERENCJI: Zgłoszenia uczestnictwa w konferencji i wystawie przyjmuje:

*Ośrodek Doskonalenia Kadr SIMP
ul. Piłsudskiego 74, p. 228,
50-020 Wrocław
tel./fax: 071 344 81 26
e-mail: simpodk@interia.pl*

