

# Wpływ fazy drgań ultradźwiękowych na strukturę i twardość napoin stopu aluminium 2017A

Effects of the ultrasonic vibrations phase on structure and hardness surface-welds of 2017A aluminum alloy

## Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań struktury i twardości napoin uzyskanych metodami MIG na falowodzie w kształcie walca ze stopu aluminium 2017A. Badania miały charakter porównawczy i polegały na zestawieniu wyników uzyskanych napoin ze wspomaganiami drganiami ultradźwiękowymi oraz bez stosowania drgań. Celem zaprezentowanych badań było określenie wpływu fazy drgań ultradźwiękowych na strukturę i twardość uzyskanych napoin. Budowa strukturalna i twardość napoin uzyskanych z zastosowaniem drgań wykazywały zależność od ich fazy.

## Abstract

The structure and hardness of the surface-welds and fusion-welds made on a 2017A aluminum alloy waveguide using the MIG method with and without the participation of ultrasonic vibrations were examined. Cross-sections of the fusions and surface-welds thus obtained were observed in a microscope and the hardness distributions were determined. The aim of the study was to analyze the effects of the ultrasonic vibrations applied to the melted metal pool by a vibrating substrate which in our experiments was a waveguide. The interactions of the ultrasonic vibrations with the molten metal during its solidification and also with the heat-affected zone were examined at various phases of the vibration wave. The ultrasonic vibrations affected the structure of weld. These changes are strongly depended of vibration wave phase.

## Wstęp

Prowadzone do tej pory prace badawcze wykazują, że istnieje wyraźny wpływ drgań mechanicznych na strukturę i właściwości złączy spawanych i napoin [1÷15]. Niezależnie od rodzaju spawanego materiału rodzimego i metody spawania obserwuje się zmianę budowy strukturalnej zarówno w strefie przetapianej, jak i w strefie wpływu ciepła. W dostępnej literaturze przedmiotu opisane są różne sposoby wprowadzania drgań do strefy spawania. Mogą to być przykładowo wibracje łuku elektrycznego [4, 5], oddziaływanie termiczne spójnej wiązki lasera [9], czy bezpośrednio doprowadzanie drgań do materiału rodzimego przez odpowiednio zastosowane falowody [6]. W wielu publikacjach na ten temat niestety nie omawia się szczegółów

technicznych dotyczących metod wprowadzania drgań. Z punktu widzenia kontroli zjawisk i wiarygodnego ilościowego opisu ich wpływu na uzyskiwane struktury, problem ten, jak i określenie wpływu fazy, amplitudy czy częstotliwości drgań na uzyskiwane struktury, wydają się kluczowe. W pracy [7] poruszono m.in. problem poprawy spawalności stopów aluminium. Autorzy uzyskali zmniejszenie wielkości ziaren, wzrost twardości w spoinie oraz ich spadek w strefie wpływu ciepła na skutek wprowadzania drgań, lecz sposób ich wprowadzania w strefę spawania niestety nie jest wyjaśniony i budzi wątpliwości co do możliwości kontroli amplitudy i dostarczanej energii. W pracy [8] omówiono spawanie metodą GTA stopu aluminium 7075 o wysokiej wytrzymałości poddawanego drganiom mechanicznym o częstotliwości od 105 do 2050 Hz. Zaobserwowano zmniejszenie podatności na gorące pęknięcie stopiwa przy zastosowaniu drgań 1025 i 2050 Hz. Drgania o częstotliwości 105 Hz spowodowały zaś wzrost podatności na pęknięcia gorące.

Dr inż. Arkadiusz Krajewski – Politechnika Warszawska.

Dzięki zastosowaniu drgań od 1025 do 2050 Hz podczas spawania stopu aluminium 7075 uzyskano strukturę o mniejszych ziarnach niż w przypadku użycia niższej częstotliwości drgań, a tym bardziej w porównaniu do gruboziarnistej struktury złączy spawanych bez drgań. Zastosowanie drgań mechanicznych w procesach spawalniczych prowadzące do poprawienia struktury i właściwości złączy zaprezentowano także w pracach [9÷14]. Można zauważyć, że głównym problemem podczas stosowania drgań mechanicznych w procesach spawalniczych jest techniczna trudność związana z bezpośrednią bliskością źródła ciepła oraz pola wysokich temperatur w materiale spawanym. Generalnie można stwierdzić, że odpowiednio wykorzystane drgania mechaniczne mogą korzystnie wpływać na strukturę i właściwości mechaniczne poszczególnych stref złączy spawanych. W opracowaniu [15] omówiono zastosowanie drgań ultradźwiękowych do wspomagania spawania laserowego, co pozwoliło uzyskać bardziej równomierny kształt lica, zwiększyć głębokość wtopienia oraz zmniejszyć prawdopodobieństwo powstawania pęknięć i porowatości przez zmniejszenie turbulentnego przepływu w jeziorku. Osiągnięcie pożądanych zmian struktury i właściwości złączy czy napoin z zastosowaniem drgań wymaga pełnej kontroli ich przebiegu, kierunku wprowadzania, jak i sterowania cyklem cieplnym. Tylko w nielicznych publikacjach można znaleźć zasygnalizowany wpływ parametrów drgań na budowę i właściwości struktur spawalniczych [11÷15].

Na podstawie wcześniej przeprowadzonych badań własnych [1÷3] wykazano, że faza wprowadzanych drgań do spawanego obiektu może determinować uzyskanie pożądanego lub szkodliwego efektu zmian w określonej strefie złącza. W niniejszej publikacji podjęto próbę wstępnej analizy termomechanicznej oddziaływania drgań ultradźwiękowych znajdujących się w określonej fazie. Znane są również z literatury [17, 18] zastosowania oddziaływania oscylacji ciśnienia plazmy, które umożliwia jednorodne rozproszenie ceramicznej fazy umacniającej w kąpeli metalicznej jeziorka spawalniczego podczas wytwarzania napoin kompozytowych. Ten sposób wprowadzania oscylacji jest niezależny od fazy drgań (nie wymaga stosowania falowodu) i należy się spodziewać, że może korzystnie wpływać na strukturę niezależnie od rozmiaru obrabianego obiektu.

## Odształcenia i naprężenia wywołane drganiami ultradźwiękowymi

Aby wybrać charakterystyczne i reprezentatywne zarazem miejsca przeprowadzenia badań strukturalnych i pomiarów twardości, wykonano także teoretyczną analizę przebiegu drgań (odkształceń/przemieszczeń) oraz naprężeń w falowodzie poddawanym drganiami ultradźwiękowym o mocy 2,5 kW, częstotliwości

20 kHz i amplitudzie 10  $\mu\text{m}$ . Do opisu zjawisk związanych z wprowadzaniem drgań przyjęto następujące dane materiałowe: amplituda drgań podłużnych  $A = 10^{-5}$  m, długość fali  $\lambda = 0,254$  m równa długości falowodu, częstotliwość drgań  $f = 20$  kHz, gęstość stopu aluminium 2017A  $\rho = 2800$  kg/m<sup>3</sup>, prędkość fali  $c = 5080$  m/s, współczynnik Poissona  $\nu = 0,33$ , moduł Younga  $E = 72,5$  GPa. Do wyznaczenia przebiegów odkształceń (przemieszczeń) w zależności od współrzędnej długości falowodu  $z = (0-\lambda)$  zastosowano klasyczne ujęcie matematyczne ruchu drgającego bez uwzględnienia tzw. zjawisk nieliniowych związanych z ograniczonymi wymiarami drgającego ośrodka czy tłumieniem.

Przemieszczenia podłużne  $\varepsilon_L$  i poprzeczne  $\varepsilon_T$  na skutek przebiegu fali stojącej drgań, jaka tworzy się w falowodzie o długości  $\lambda$ , opisują zależności:

$$\begin{aligned}\varepsilon_L &= A[\cos(2\pi f \frac{\lambda}{c} + \varphi) + \cos(2\pi f \frac{\lambda}{c} - \varphi)] \\ \varepsilon_T &= -A\nu[\cos(2\pi f \frac{\lambda}{c} + \varphi) + \cos(2\pi f \frac{\lambda}{c} - \varphi)]\end{aligned}\quad (2)$$

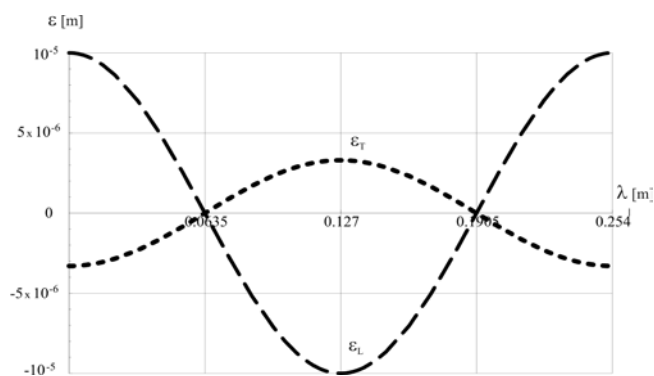
gdzie:  $\varphi$  jest kątem przesunięcia fazowego (0,  $2\pi$ ).

W celu wyznaczenia naprężeń od ciśnienia akustycznego  $P$ , podłużnych  $\sigma$ , poprzecznych  $\tau$  i zredukowanych wg hipotezy Hubera  $\sigma_z$  wykorzystano formuły:

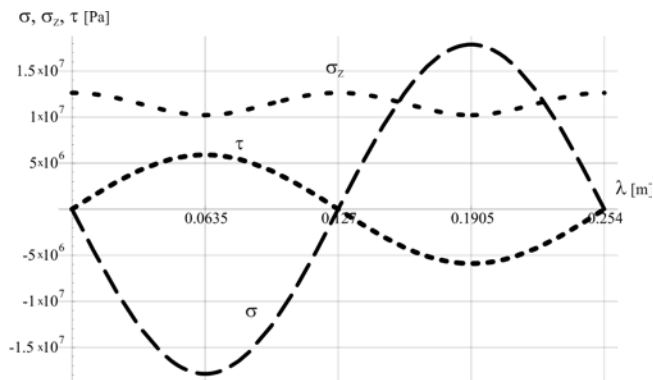
$$\begin{aligned}P &= 2\pi f c A, \quad \sigma = P[\cos(2\pi f \frac{\lambda}{c} + \varphi) + \cos(2\pi f \frac{\lambda}{c} - \varphi)] \\ \tau &= -\nu P[\cos(2\pi f \frac{\lambda}{c} + \varphi) + \cos(2\pi f \frac{\lambda}{c} - \varphi)] \quad \sigma_z = \sqrt{\frac{\sigma^2}{2} + 3\tau^2}\end{aligned}\quad (3)$$

Na rysunkach 1 i 2 przedstawiono wyniki analizy drgań mechanicznych, generujących w falowodzie określone przemieszczenia (odkształcenia) i naprężenia.

Jak można zauważyć na podstawie powyższych wyników, występuje symetria w następujących obszarach:  $1/4\lambda$  i  $3/4\lambda$  oraz  $\lambda$  równe 0,  $1/2\lambda$  i  $\lambda$ . Aby badania były reprezentatywne dla charakterystycznych miejsc falowodu o długości  $\lambda = 0,254$  m, wystarczy zatem wykonać badania struktury i twardości w dwóch tylko obszarach w odległości  $z = 1/2\lambda = 0,127$  m i  $z = 3/4\lambda = 0,1905$  m od zamocowania falowodu do układu drgającego.



Rys. 1. Przemieszczenie podłużne  $\varepsilon_L$  i poprzeczne  $\varepsilon_T$  w falowodzie  
Fig. 1. Longitudinal displacement  $\varepsilon_L$  and transversal displacement  $\varepsilon_T$  in a waveguide



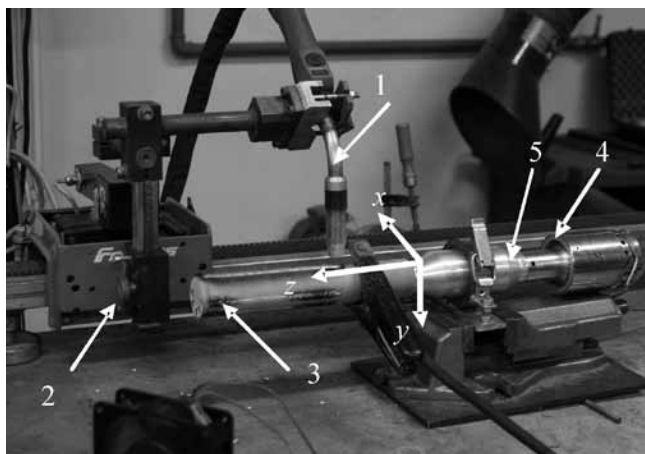
**Rys. 2.** Rozkład naprężeń osiowych  $\sigma$ , poprzecznych  $\tau$  i zredukowanych  $\sigma_z$

**Fig. 2.** Distribution of axial stresses  $\sigma$ , transverse stresses  $\tau$ , and reduced stresses  $\sigma_z$  in a waveguide

## Prace badawcze

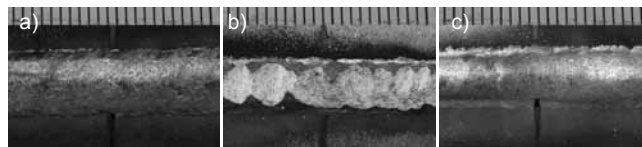
Przeprowadzone zostało napawanie metodą MIG z falowodem ze stopu aluminium 2017 (PA6), który miał formę walca o średnicy 45 mm i długości 254 mm. Jego długość była równa długości fali ultradźwiękowej o częstotliwości ok. 20 kHz w tym stopie. Uzyskano w ten sposób falowód o długości pojedynczej fali drgań  $1\lambda$ . Badania miały charakter porównawczy, a więc porównywano struktury i twardość uzyskanych napoin z udziałem drgań oraz bez nich.

W celu przeprowadzenia eksperymentu skonfigurowano stanowisko badawcze składające się z falowodu sprzężonego z przetwornikiem ceramicznym połączonym z generatorem ultradźwiękowym o mocy 2,5 kW za pomocą koncentratora o wzmocnieniu 1/1, źródła firmy Fronius ALU Edition do spawania metodą MIG, a także z zestawu do zmechanizowanego spawania prostoliniowego firmy Fronius (rys. 3). Zestaw do zmechanizowanego spawania został sprzężony



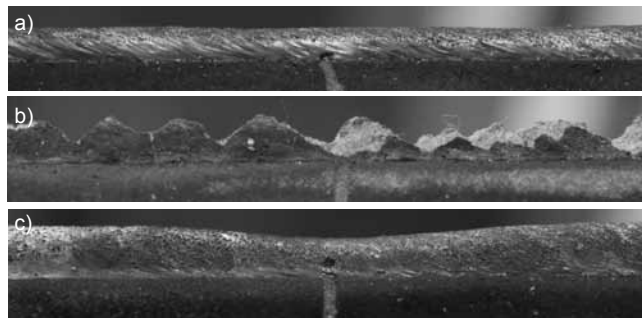
**Rys. 3.** Stanowisko do prób eksperymentalnych z układem drgającym: 1 – głowica spawalnicza, 2 – pozycjoner, 3 – falowód, 4 – przetwornik ultradźwiękowy, 5 – koncentrator o wzmocnieniu 1/1

**Fig. 3.** Experimental set-up with vibrating system: 1 – welding torch, 2 – linear manipulator, 3 – waveguide, 4 – ultrasonic transducer, 5 – concentrator



**Rys. 4.** Widok napoiny: a) bez drgań, b) z drganiami  $z = 0,127$  m, c) z drganiami  $z = 0,1905$  m

**Fig. 4.** MIG produced weld view: a) without vibrations, b) assisted with ultrasonic vibrations in the 0.127m ( $1/2\lambda$ ) region, c) with vibrations in the 0.1905 m region ( $3/4\lambda$ )

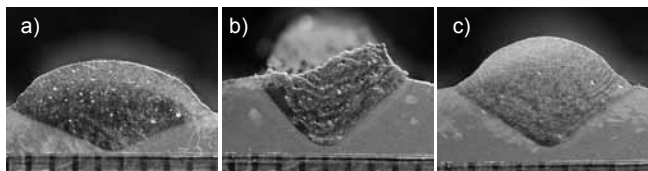


**Rys. 5.** Profil napoiny: a) bez drgań, b) z drganiami  $z = 0,127$  m, c) z drganiami  $z = 0,1905$  m

**Fig. 5.** Profile of the weld obtained by the MIG method: a) without the vibrations, b) with ultrasonic vibrations within the region  $z = 0.127$  m ( $1/2\lambda$ ), c) with ultrasonic vibrations in the region  $z = 0.1905$  m ( $3/4\lambda$ )

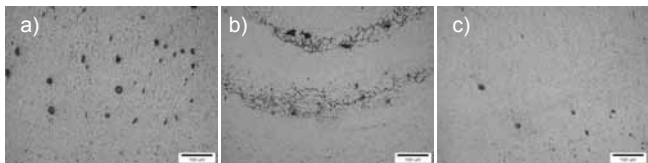
z urządzeniami spawalniczymi w taki sposób, aby zjarzenie łuku oraz moment rozpoczęcia przejazdu głowicy były zsynchronizowane. Uchwyt spawalniczy w obu przypadkach był osadzony na ramieniu przymocowanym do zestawu mechanizacyjnego i ustawiony jak do spawania w pozycji podolnej, a oś uchwytu spawalniczego była ustawiona w pionie. Do napawania metodą MIG został użyty drut AlMg5 o średnicy 1,2 mm. Proces został także całkowicie zautomatyzowany przez zsynchronizowanie zmechanizowanego przesuwu uchwytu spawalniczego wzdłuż wykonywanego napawania.

Wydatek argonu wynosił 17 l/min, natężenie prądu 167 A, napięcie łuku 19,4 V, a prędkość spawania 0,0127 m/s (0,73 m/min). Każda z kolejnych napoin była układana wzdłuż tworzącej walca, co  $45^\circ$ , aby uniknąć wzajemnego wpływu cykli cieplnych poszczególnych napoin. Wysokość lica napoiny wynosiła  $3\pm 5$  mm i zmieniała się w zależności od współrzędnej  $z$ . W odległości się 0,1905 m od czoła falowodu nastąpiło zapadnięcie się lica o ok. 1 mm (rys. 5c). Natomiast dla współrzędnej  $z = 0,127$  m nastąpiła dekompozycja lica spowodowana prawdopodobnie osiągniętą maksimum odkształceniem (rys. 5b). Napoina ułożona bez udziału ultradźwięków cechowała się stałą wysokością nadlewu lica wynoszącą ok. 4 mm. Na całej jej długości widoczne są pory w znacznie większej ilości niż w przypadku napoiny uzyskanej ze wspomaganie drgań. Po napawaniu metodą MIG wykonano zglady metalograficzne w wytypowanych powyżej przekrojach poprzecznych ( $z = 0,127$  m i  $z = 0,1905$  m), które poddano później obserwacjom mikroskopowym i pomiarom mikrotwardości. Makrowidoki i profile uzyskanych napoin zamieszczono na rysunkach 4÷7.



**Rys. 6.** Przekrój poprzeczny napoin: a) bez drgań, b) z drganiami  $z = 0,127$  m, c) z drganiami  $z = 0,1905$  m

**Fig. 6.** Cross-section of the MIG welds: a) without ultrasounds, b) with the participation of ultrasounds at  $z = 0,127$  m ( $1/2\lambda$ ), c) with the participation of ultrasounds at  $z = 0,1905$  m ( $3/4\lambda$ )



**Rys. 7.** Mikrografie (pow. 200x) napoin układanych metodą MIG: a) bez drgań, b) z drganiami  $z = 0,127$  m ( $1/2\lambda$ ), c) z drganiami  $z = 0,1905$  m ( $3/4\lambda$ )

**Fig. 7.** Micrograph (magn. 200x) of the MIG welds: a) without ultrasounds, b) with the participation of ultrasounds  $z = 0,127$  m ( $1/2\lambda$ ), c) with the participation of ultrasounds  $z = 0,1905$  m ( $3/4\lambda$ )

Jak widać na zdjęciach powstałych napoin, przebieg fali ultradźwiękowej miał istotny wpływ na wygląd lica, jego szerokość i nadlew. Krytyczne zmiany (rys. 4÷6) widoczne są w pobliżu węzłów ( $z = 0,1905$  m) oraz przy strzałce drgań ( $z = 0,127$  m).

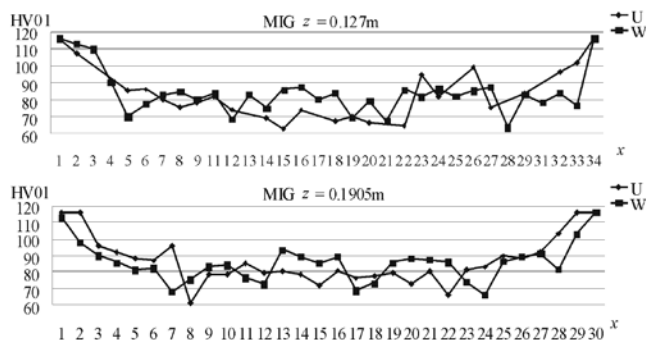
Już po oględzinach zewnętrznych uzyskanych napoin można zauważyć, że w obszarach maksymalnej deformacji falowodu ( $z = 0$ ,  $z = 0,127$  m oraz  $z = 0,254$  m) występują „osmalenia” świadczące o zaburzeniach w ochronie gazowej i piłokształna dekompozycja lica. W przypadku zastosowania drgań uzyskano szerokość lica dla  $z = 0,127$  m – 8,5 mm, zaś dla  $z = 0,1905$  m – 7,5 mm.

Można zatem przypuszczać, że drgania ultradźwiękowe powodują zjawisko podobne do zasysania bocznego powietrza pomimo występowania nadmuchu argonu z dyszy gazowej palnika. Prawdopodobnie tworzy się wówczas „poduszka powietrzna” w wyniku ciśnienia akustycznego drgań. Jest to proces niepożądany i nasila się w miejscach strzałki drgań, gdzie dodatkowo występują naruszenia ciągłości lica na skutek dekompozycji mechanicznej. Aby temu zaradzić, należałoby proces spawania prowadzić w komorze z argonem.

## Wyniki pomiarów twardości

Pomiary twardości wykonano metodą Vickersa pod obciążeniem 100 g. Na rysunku 8 zestawiono reprezentatywne rozkłady twardości na charakterystycznych przekrojach poprzecznych napoin układanych metodą MIG. Każdy z punktów na wykresie jest średnią z czterech pomiarów.

Pomiary twardości nie wykazały zasadniczych różnic pomiędzy napoinami uzyskanymi z udziałem drgań



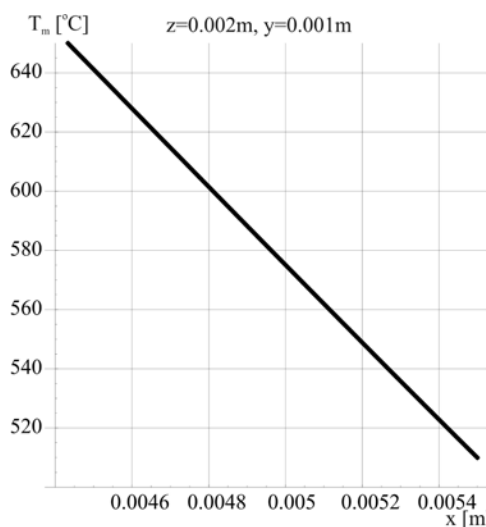
**Rys. 8.** Zestawienie rozkładów twardości na przekrojach poprzecznych uzyskanych napoin; U – z drganiami, W – bez drgań, dz – działki na osi x: a)  $z = 0,127$  m, U – 180  $\mu\text{m}/\text{dz}$ , W – 210  $\text{Mm}/\text{dz}$ ; b)  $z = 0,1905$  m, U – 250  $\mu\text{m}/\text{dz}$ , W – 250  $\mu\text{m}/\text{dz}$

**Fig. 8.** Hardness distributions on transverse cross-sections of the welds produced by (U – with the assistance of ultrasounds, B – without ultrasounds, div – divisions on the x axis: a) U – 180  $\mu\text{m}/\text{div}$ , B – 210  $\text{Mm}/\text{div}$ ; b) U – 250  $\mu\text{m}/\text{div}$ , B – 250  $\mu\text{m}/\text{div}$

i bez nich. Można jednak zauważyć, że zastosowanie drgań ultradźwiękowych powoduje pewne „spłaszczenie rozkładu”, czyli bardziej równomierne rozłożenie wartości twardości niezależnie od współrzędnej pomiaru. Ponadto drgania powodują niewielkie obniżenie krzywej rozkładu i większy spadek twardości w SWC napoiny dla współrzędnej  $z = 0,1905$  m.

## Podsumowanie

Aby właściwie zinterpretować budowę strukturalną charakterystycznych obszarów napoin uzyskanych metodą MIG (rys. 7), należy określić wpływ temperatury maksymalnej cyklu cieplnego w określonym miejscu napoiny i odnieść go do fazy drgań ultradźwiękowych [16]. W tym celu wykreślono rozkład temperatury w zakresie likwidus-solidus ( $645\div 510^\circ\text{C}$ ) w zależności od przyjętych parametrów spawania, właściwości



**Rys. 9.** Rozkład temperatury w falowodzie podczas spawania metodą MIG

**Fig. 9.** Distribution of the temperature in MIG welding

termicznych zastosowanego stopu 2017 oraz współrzędnych kartezyjskich procesu. Na rysunku 9 przedstawiono wyniki takiej analizy dla średnich współrzędnej położenia  $y = 0,001$  m związanej z głębokością w odległości  $z = 0,002$  m od źródła ciepła. Wynika z niej, że odległość pomiędzy frontem krystalizacji determinowanym temperaturą krzepnięcia a temperaturą topnienia wynosi niewiele ponad  $0,001$  m.

Zaprezentowane wyniki tej analizy nie uwzględniają wymiany ciepła z otoczeniem ani radiacji, mogą zatem być traktowane jedynie jako przybliżenie górnej granicy możliwych wartości. Niemniej jednak można pokusić się o pewne podsumowanie, gdy porównamy strukturę z rysunku 7b z otrzymanymi wynikami analizy. Otóż wyraźnie widać, że w przypadku napoiny uzyskanej

metodą MIG ze wspomaganie drganiami można ustalić odległość między kolejnymi frontami krystalizacji  $0,0005$  m, a więc dwukrotnie mniej niż wynika to z wykresu na rysunku 9. Warto zauważyć także, że w przypadku swobodnego krzepnięcia napoiny uzyskanej bez udziału drgań (rys. 7a), jak i dla napoiny krzepnącej (rys. 7c) w węźle drgań ( $z = 0,1905$  m) nie obserwuje się występowania budowy „pasmowej”. W wyniku zastosowania drgań ultradźwiękowych dużej mocy występujących w strzałce ( $z = 0,127$  m) energia kinetyczna cząstek ciekłego jeziora jest maksymalna, co prawdopodobnie jest przyczyną rozbijania frontów krystalizacji. Obserwujemy zatem wyraźnie układające się pasmowo obszary.

## Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań można wyciągnąć następujące wnioski:

- Zastosowanie podłużnych drgań ultradźwiękowych o dużym natężeniu w procesie spawania przynosi korzystne efekty w budowie strukturalnej napoiny jedynie w fazie będącej nieparzystą wielokrotnością  $1/4\lambda$ , czyli w miejscach występowania węzłów drgań. Ponadto występuje w tym przypadku niewielkie wklęsnięcie lica spowodowane prawdopodobnie ściskającymi naprężeniami wywołanymi w węzłach. Występują wtedy korzystne efekty w postaci rozdrobnienia ziarna i zmniejszenie porowatości.
- W strzałkach drgań dla całkowitych wielokrotności  $1/2\lambda$  obserwuje się powstawanie dyskwalifikującej dekompozycji lica i bardzo wyraźną strukturę pasmową spoin/napoiny. Jest to prawdopodobnie wynikiem występowania naprężeń rozciągających (w przypadku stopu 2017A o wartości ok.  $13$  MPa), co na pograniczu temperatury krzepnięcia i topnienia powoduje przekroczenie spójności materiału lica. Zastosowanie drgań w „strzałkach” drgań powoduje ponadto utratę skutecznej osłony gazowej, przyczyniając się do nasilenia porowatości.

## Literatura

- [1] Krajewski A.: Wspomaganie procesów spawalniczych drganiami mechanicznymi, Zeszyt Naukowy nr 229, s. 33-51 (seria Mechanika), pt. Innowacje w technikach spajania, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2009.
- [2] Krajewski A.: Badanie wpływu pola ultradźwiękowego na budowę i właściwości struktur spawalniczych, Zeszyt Naukowy nr 230, s. 71-82 (seria Mechanika), pt. Spajanie materiałów we współczesnej technice, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2010.
- [3] Krajewski A.: Drgania mechaniczne w procesach spawalniczych, Przegląd Spawalnictwa nr 6, s. 37-42, 2011.
- [4] Longbiao H., Minsheng W., Luming L., Hongwei H.: Ultrasonic generation by exciting electric arc: A tool for grain refinement in welding process, Applied Physics Letters, 89, 131504, 2006.
- [5] Lei Y.C., Wang Z.W., Chen X.Z.: Effect of arc ultrasound on microstructures and mechanical properties of plasma arc welded joints of SiCp/Al MMCs, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 21, s. 272-277, 2011.
- [6] Farrow M.: Laser/ultrasonic welding technique, United States Patent 4330699, 1982.
- [7] Weng-Long D.: Effects of high-intensity ultrasonic-wave emission on the weldability of aluminum alloy 7076-T6, Materials Letters 57, s. 2447-2454, 2003.
- [8] Dong H., Yang L., Dong C., Kou S.: Improving arc joining of Al to steel and Al to stainless steel, Materials Science and Engineering, A 534, s. 424-435, 2012.
- [9] Balasubramanian K.: Studies on the effect of vibration on hot cracking and grain size in AA7075 aluminum alloy welding, International Journal of Engineering Science and Technology, Vol. 3, No. 1, Jan. 2011.
- [10] Qingmei L., Yong Z., Yoling S., Feipeng Q., Qijie Z.: Influence of ultrasonic vibration on mechanical properties and microstructure of 1Cr18N9Ti stainless steel, Materials and Design, 28, s. 1949-1952, 2007.
- [11] Cui Y., Xu C. L., Han Q.: Effect of ultrasonic vibration on unmixed zone formation, Scripta Mater. 55, s. 975-978, 2006.
- [12] Weng-Long D.: Effects of high-intensity ultrasonic-wave emission on the weldability of aluminum alloy 7076-T6, Materials Letters 57, s. 2447-2454, 2003.
- [13] Kim. S., Watanabe T., Yoshida Y.: Ultrasonic vibration aided laser welding of Al alloys: improvement of laser welding-quality, Department of precision & Production Engineering and Faculty of Engineering, Chiba University, Japan, Journal of Laser Applications, 1995.
- [14] Weite W.: Influence of vibration frequency on solidification of weldments, Scripta Mater. 42, s. 661-665, 2000.

- [15] Zhiwu X.J.Y., Gaohui W.X., Kong S.Y.: Interface structure of ultrasonic vibration aided interaction between Zn-Al alloy and  $Al_2O_3/p/6061Al$  composite, *Composites Science & Technology*, No 65, 2005.
- [16] Chon L., Chin M.T.: ASM Hand Book vol. 6, Welding and Soldering, Heat Flow in Fusion Welding, 1993.

- [17] Włosiński W., Chmielewski T.: Wpływ rodzaju umocnienia ceramicznego chromowych powłok ochronnych nakładanych plazmowo na ich zwilżalność szkłem, *Kompozyty – Ogólnopolskie specjalistyczne czasopismo naukowo-techniczne*, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Rocznik 2, nr 5, 2002.
- [18] Włosiński W., Chmielewski T.: Plasma-hardfaced chromium protective coatings – effect of ceramic reinforcement on their wettability by glass, *Advances in Science and Technology* 32, s. 253-260, 2003.

## Poniższe artykuły zostaną opublikowane 2/2013 Miesięcznika Naukowo-Technicznego Przegląd Spawalnictwa

Sławomir Krajewski, Jerzy Nowacki

### **Właściwości połączeń spawanych ze stali dwufazowych – DP**

W pracy przedstawiono wyniki analizy wartości równoważnika węgla  $C_e$  stali dwufazowych DP ze stalami wielofazowymi CP i TRIP, konwencjonalnymi o wysokiej granicy plastyczności do obróbki plastycznej na zimno LAD+BD+YD i o podwyższonej granicy plastyczności w stanie ulepszonym cieplnie. Przedstawiono również wyniki badań metalograficznych i wybranych właściwości mechanicznych złączy spawanych metodą spawania GTAW stali dwufazowych: DP600Z140+M, DP800Z140+M i DP1000Z140+M.

Lechosław Tuz, Andrzej Kolasa

### **Wpływ wybranych parametrów spawania łukowego na spawalność odlewniczych stopów magnezu**

W artykule przedstawiono wpływ wybranych parametrów spawania łukowego na jakość złączy spawanych odlewniczych stopów magnezu należących do grupy Mg-Al-Zn.

W badaniach zastosowano dwie metody spawania łukowego w osłonie gazów obojętnych: elektrodą topliwą (MIG) i nietopliwą (TIG). Przedstawiono wyniki obserwacji wizualnych wykonywania złączy doczołowych, oraz ocenę makroskopową. W pracy skoncentrowano się na określeniu wpływu takich parametrów jak: rodzaj i natężenie prądu, napięcie łuku i prędkość spawania na wartość energii liniowej wykonywanych złączy oraz ich jakość (brak pęknięć gorących i porowatości).

Dariusz Fydrych, Jerzy Łabanowski

### **Zastosowanie techniki ściegu odpuszczającego do spawania mokrego**

W artykule przedstawiono zastosowanie techniki ściegu odpuszczającego do poprawy właściwości złączy ze stali konstrukcyjnych wykonywanych w warunkach mokrego spawania pod wodą. Scharakteryzowano istotę spawania mokrego elektrodami otulonymi oraz ideę zmiany struktury i własności złączy spawanych poprzez nakładanie ściągów odpuszczających. Przedstawiono metodykę oraz wyniki badań metalograficznych i twardości próbek ze stali konstrukcyjnej o podwyższonej wytrzymałości z napoinami próbnymi wykonanymi pod wodą. Ustalono, że zastosowana technika może stanowić sposób zmniejszenia twardości napoin w warunkach praktycznych. Wyznaczono również optymalny zakres odległości między napoinami (podziałki).

Krzysztof Pańcikiewicz, Edmund Tasak

### **Charakter pęknięcia połączeń spawanych stali 7CrMoVTiB10-10 (T24)**

W artykule omówiono pęknięcie połączeń spawanych stali 7CrMoVTiB10-10 (T24), stosowanej na ściany szczelne w kotłach energetycznych, pracujących przy parametrach nadkrytycznych. Jednym z powodów pęknięcia, ze względu na mikrostrukturę materiału spawanego, może być negatywne oddziaływanie wodoru, zarówno podczas spawania, jak i eksploatacji. Stosowanie obróbki cieplnej po spawaniu poprawia właściwości plastyczne złączy, ale może wywoływać również pęknięcie relaksacyjne.