



Article citation info:

Majewski, W. The possibility of using laser and micro-jet technology in the welding of structural elements of vehicles. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*. 2015, **89**, 69-78. ISSN: 0209-3324. DOI: 10.20858/sjsutst.2015.89.8.

Wojciech MAJEWSKI¹

THE POSSIBILITY OF USING LASER AND MICRO-JET TECHNOLOGY IN THE WELDING OF STRUCTURAL ELEMENTS OF VEHICLES

Summary. A paper presents the possibility of laser welding using micro-jet cooling. The effect of micro-jet cooling on microstructure and mechanical properties of the weld metal deposit was carried out. New welding process was analyzed for use in the automotive industry. Studies have confirmed the positive effect of cooling micro-jet cooling both for the MIG welding and laser welding.

Keywords: welding, laser, micro-jet, acicular ferrite, impact toughness of WMD

MOŻLIWOŚĆ WYKORZYSTANIA TECHNIKI LASEROWEJ I MIKROJETOWEJ W SPAWANIU ELEMENTÓW KONSTRUKCJI POJAZDÓW

Streszczenie. W artykule zaprezentowano możliwość spawania laserowego z wykorzystaniem chłodzenia mikrostrumieniowego. Przedstawiono wpływ chłodzenia mikrostrumieniowego na strukturę i własności mechaniczne złącza. Analizowano nowy proces spawalniczy pod kątem zastosowania w przemyśle motoryzacyjnym. Badania potwierdziły pozytywny wpływ chłodzenia mikrostrumieniowego zarówno po spawaniu metodą MIG, jak i po spawaniu laserowym.

Słowa kluczowe: spawanie, laser, mikrostruga, ferryt AF, udarność stopiwa

¹ AM&HP Sp. z o.o., Lutostańskiego 6/3, 16-400 Suwałki, Poland. E-mail: amhp.suwalki@gmail.com

1. WPROWADZENIE

Promieniowanie laserowe jest szczególnym rodzajem promieniowania elektromagnetycznego, nazywanym również światłem laserowym o długości fali od 10 nm do 1 mm. Spawanie laserowe wykorzystuje wiązkę o dużej gęstości energii (około 1 MW/cm²). Efektem spawania laserowego jest mała szerokość strefy wpływu ciepła i niskie oddziaływanie temperatury na konstrukcję, szybkie odprowadzanie ciepła i stygnięcie spoiny. Możliwa do uzyskania szerokość otrzymywanych spoin to 0,2–13 mm, praktycznie wykorzystywane są głównie spoiny o małych szerokościach. Głębokość penetracji materiału przez wiązkę laserową jest proporcjonalna do mocy zasilania, ale zależy również od lokalizacji punktu skupienia wiązki i szybkości spawania.

Celem artykułu jest zaprezentowanie nowej technologii spajania z techniką mikrostrumieniową. Wiązkę promieniowania laserowego można skupić do rozmiarów rzędu ułamka mikrometra. Sprzyja to otrzymaniu ekstremalnie dużych gęstości mocy oraz selektywnemu oddziaływaniu wiązką na precyzyjnie wybranych obszarach materiału, np. w miejscach trudno dostępnych w pojazdach, zwłaszcza narażonych na duże obciążenia mechaniczne. Celem uniknięcia gwałtownych zmian strukturalnych należy spowolnić proces chłodzenia materiału. Ma to wpływ na przemiany fazowe w materiale i rozmiar ziarna. Technologia ta pozwala na zwiększenie intensywności chłodzenia, co przekłada się również na sterowanie strukturą. Przykładem może być zwiększanie zawartości ferrytu AF (acicular ferrite) podczas spawania stali niskowęglowej i niskostopowej stosowanej na nadwozia pojazdów osobowych i ramy pojazdów ciężarowych.

Praktycznym narzędziem do realizacji i kontroli nagrzewania i stygnięcia materiału jest układ instalacji mikrostrumieniowej, sprzężonej ze strumieniem cieplnym lasera. Możliwe jest przy tym nagrzewanie materiału mikrostrumieniami gazów poprzedzające działanie strumienia lub schładzanie po jego przejściu. Regulacja struktury może zapewnić wysoką jakość połączenia spawanego oraz poprawić spawalność materiałów. Regulację struktury może zapewnić szybkie schłodzenie lica spoiny albo jej grani za pomocą pęku mikrostrug (lub pojedynczej mikrostrugi) medium chłodzącego, którym mogą być dowolne gazy lub ich mieszanki. Chłodząca mikrostruga płynu ma przeważnie średnicę ok. 50 μm. Dobór gazu chłodzącego traktowany jest jako kolejny parametr procesu. Do ustaleń wstępnych procesu schładzania mikrojetowego stosowano głównie argon, azot, hel i mieszanki argonu z tlenem lub ditlenkiem węgla jako główne media chłodzące [1-15]. Argon stosowano głównie ze względu na brak potencjału utleniającego i azotującego spoiny. Hel w chłodzeniu mikrostrumieniowym sprawdzano jako najskuteczniejsze medium chłodzące. Azot testowano głównie jako gaz mikrojetowy w napawaniu elementów maszyn, w celu uzyskania wysokiej twardości i podwyższonej odporności na zużycie ścierne [3]. Mikrostrugi płynu wytworzone są w przystawce (inżektorze) z instalacją mikrojetową zespoloną z głowicą spawalniczą.

Współczesne stale na konstrukcje i zasady ich spajania są opisane precyzyjnie w literaturze [17-24]. Dla prawidłowej analizy procesów zachodzących w spawanej konstrukcji, bardzo istotna jest też analiza metalograficzna, uwzględniająca bardzo precyzyjne analizowanie struktury, a często nawet fazowych odmian morfologicznych (takich jak odmiany morfologiczne ferrytu). Zdecydowanie najkorzystniejszą fazą pod względem udarność jest ferryt drobnoziarnisty AF (acicular ferrite) [6-8]. Pozytywny wpływ dużych udziałów drobnoziarnistego ferrytu AF na udarność stopiwa elektrodowego przedstawiony jest w literaturze w sposób jednoznaczny. Jednak opinie dotyczące warunków sprzyjających formowaniu się tej korzystnej odmiany morfologicznej ferrytu nie są ujednocnione. Ponadto, przewiduje się, że wykorzystywane obecnie mechanizmy kontroli ilości tworzącego się ferrytu AF (np. wykorzystania procesów niskotlenowych oraz obecności wtrąceń

niemetalicznych jako inicjatorów zarodkowania ferrytu AF) osiągną kres swoich możliwości [5].

Nadwozie pojazdu samochodowego jest przeważnie wykonane z blachy niskostopowej o grubości do ok. 3 mm. Własności mechaniczne nadwozia pojazdu można odpowiednio różnicować przez specjalistyczny dobór połączeń jego elementów składowych. W zależności od łączonych elementów stalowego nadwozia pojazdu osobowego do połączeń jego elementów stosuje się zgrzewanie lub spawanie laserowe i spawanie w osłonie gazów ochronnych. Konstruktor ma możliwość wytrzymałością nadwozia pojazdu przez dobór odpowiedniej ilości spoin lub zgrzein. W przypadku spawania w osłonie gazów ochronnych możliwy jest wybór rodzaju spoiny, rodzaju materiału dodatkowego, mieszanek gazów ochronnych, co ma dodatkowy wpływ na właściwości połączenia. W produkcji nadwozia jako technologię łączenia poszczególnych jego elementów stosuje się coraz częściej spawanie laserowe, które ma wiele zalet [8]:

- wysoka jakość połączeń,
- powtarzalność właściwości połączeń,
- możliwość pełnej automatyzacji i robotyzacji procesu technologicznego,
- niski koszt procesu,
- zmniejsza masę pojazdu.

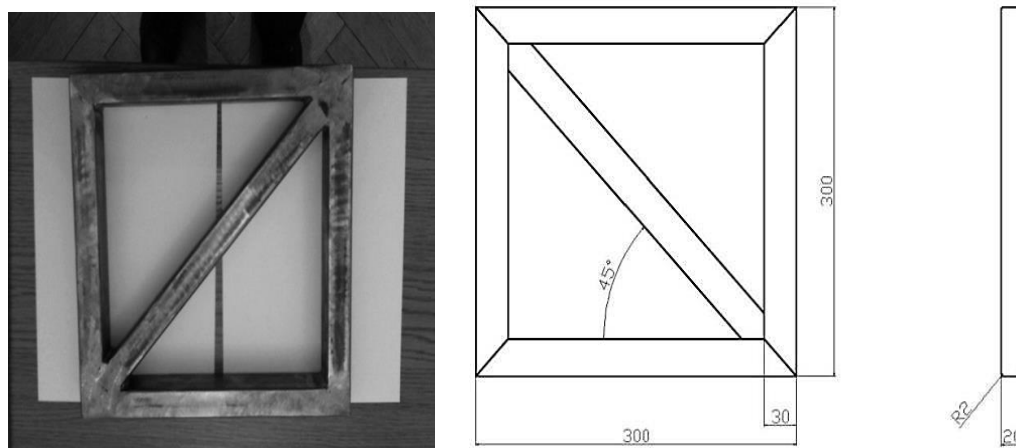
Spawanie laserowe nie było do tej pory technologią próbowaną łącznie z chłodzeniem mikrojetowym. Ważną technologią jest także spawanie w osłonie gazów ochronnych (głównie *MIG/MAG*). Tymi metodami spawane są powszechnie zawiasy drzwi pojazdu do nadwozia lub bagażnika. Technologia spawania laserowego jest coraz częściej wykorzystywana do łączenia poszczególnych elementów nadwozia. Spawanie laserowe służy także do łączenia arkuszy blach o różnych grubościach przed ich tłoczeniem, czyli do przygotowywania wsadów do tłoczenia (*tailored blanks*).

2. BADANIA

Badania związane z pojazdami obejmują wiele zagadnień – przykładowo [13, 16, 17, 22, 25-27]. Pośród nich można znaleźć badania dotyczące spawania elementów pojazdów.

Możliwości spawania elementów pojazdów z wykorzystaniem lasera i spawania z wykorzystaniem chłodzenia mikrostrumieniowego zostały dokładnie porównane. W tym celu wykonano ramy (stal 18G2A) symulujące elementy konstrukcji nośnej pojazdu, które zostały pospawane dla porównania metodą laserową i metodą MIG z różnymi parametrami chłodzenia mikrojetowego (rys 1). Gazem osłonowym w procesie MIG i gazem mikrostrugowym był argon. Ciśnienie gazu wynosiło 0,5 MPa, średnica mikrostrumienia wynosiła 50 μm .

Typowa spoina w obu metodach ma zbliżony skład chemiczny. Spawanie laserowe oraz spawanie metodą MIG z wykorzystaniem chłodzenia mikrojetowego wpływa na warunki chłodzenia, ale nie ma znacznego wpływu na skład chemiczny stopiwa, z wyjątkiem ilości tlenu w stopiwie (tablice 1, 2).



Rys. 1. Rama stosowana do badań oceny spawalności nowych procesów z wykorzystaniem chłodzenia mikrostrumieniowego

Tablica 1

Skład chemiczny stopiwa

Metoda spawalnicza	Pierwiastek stopowy
Spawanie metodą MIG bez wykorzystania chłodzenia mikrojetowego	0,07% C ; 0,42% Si, 1,12 %Mn, 0,027% (P+S)
Spawanie metodą MIG z wykorzystaniem chłodzenia mikrojetowego	0,07% C ; 0,41% Si, 1,14 %Mn, 0,026% (P+S)
Spawanie laserowe	0,07% C ; 0,40% Si, 1,12 %Mn, 0,025% (P+S)
Spawanie laserowe z wykorzystaniem chłodzenia mikrojetowego	0,07% C ; 0,42% Si, 1,15 %Mn, 0,027% (P+S)

Tablica 2

Zawartość tlenu w stopiwie

Metoda spawalnicza	Tlen w stopiwie [ppm]
Spawanie metodą MIG bez wykorzystania chłodzenia mikrojetowego	380
Spawanie metodą MIG z wykorzystaniem chłodzenia mikrojetowego	380
Spawanie laserowe	280
Spawanie laserowe z wykorzystaniem chłodzenia mikrojetowego	340

Po spawaniu laserowym odnotowuje się wyraźnie mniejszą ilość tlenu w stopiwie niż po spawaniu metodą MIG z chłodzącym mikrostrumieniem lub bez schładzania. Według danych literaturowych powinno się zapewnić ilość tlenu w stopiwie na poziomie ok. 350 ppm. Najbardziej zbliżoną zawartość tlenu do zawartości 350 ppm uzyskano po spawaniu laserowym z chłodzeniem mikrostrumieniowym. Zawartość tlenu poniżej i powyżej tej optymalnej zawartości niekorzystnie odbija się na ograniczeniu najkorzystniejszej fazy w spoinie: drobnoziarnistego ferrytu AF. Różne warunki chłodzenia w obu metodach przekładają się na zróżnicowaną zawartość niekorzystnej na własności plastyczne fazy MAC

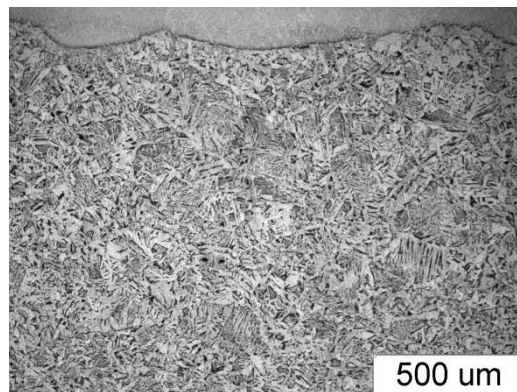
(self-tempered martensite, retained austenite, carbide). Przykład takich różnic strukturalnych pokazano w tablicy 3.

Tablica 3

Struktura metalograficzna spoin

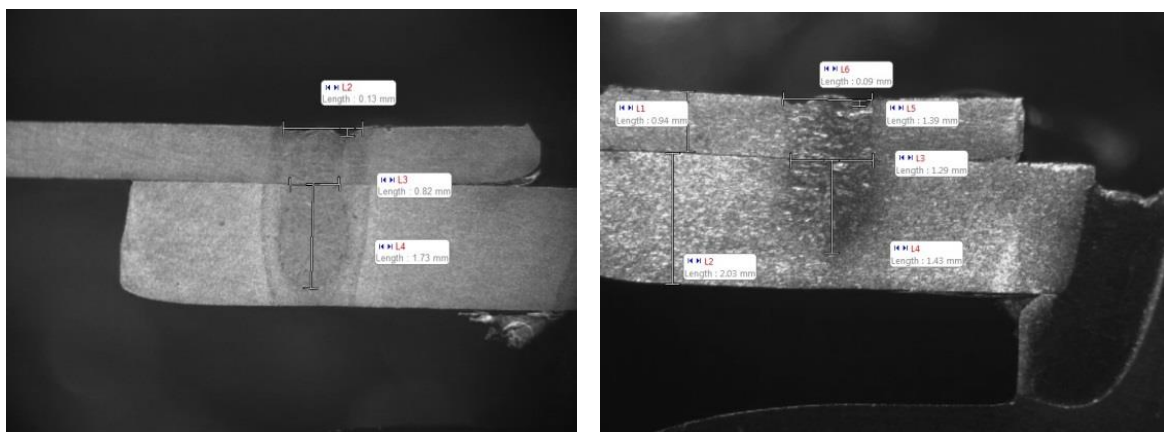
Proces	Feryt AF	Fazy MAC
Spawanie laserowe	65%	3%
Spawanie MIG bez chłodzenia mikrojetowego	57%	4%
Spawanie MIG z chłodzenia mikrojetowym	67%	3%
Spawanie laserowe z chłodzeniem mikrojetowym	73%	2%

Z tablicy 3 wynika, że chłodzenie mikrostrumieniowe ma istotny wpływ na polepszenie struktury. Na uwagę zasługuje fakt, że zawartość ferrytu AF powyżej 60% jest praktycznie nieosiągalna w innych procesach spawalniczych (rys. 2).

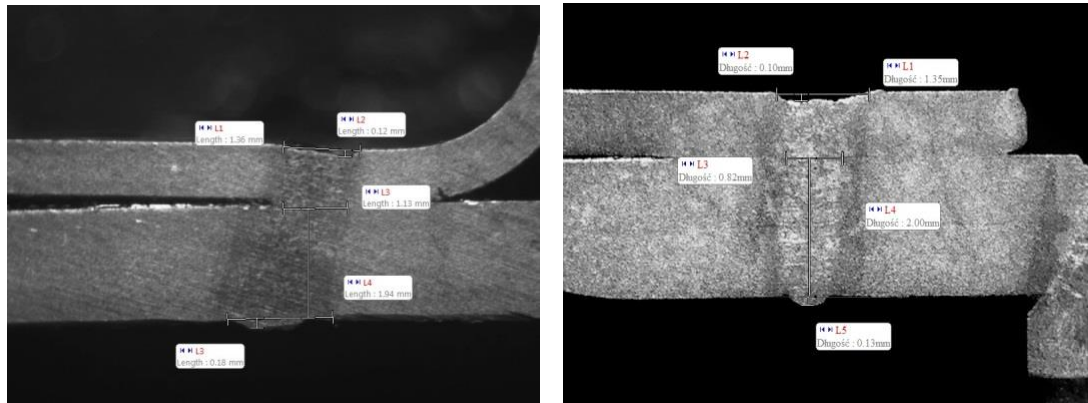


Rys. 2. Ferryt AF (71%) po spawaniu laserowym z chłodzeniem mikrostrumieniowym

W porównywanych procesach spawania laserowego bez i z chłodzeniem mikrostrugowym analizowano zapewnienie przetopu na odpowiednim wysokim poziomie. Przetopy w spawanym złączu w zależności od spawalniczej metody przedstawiono na rysunku 3-4.



Rys. 3. Dobra jakość złącza po spawaniu laserowym, 80% przetopu



Rys. 4. Dobra jakość złącza po spawaniu laserowym z chłodzeniem mikrojetowym, 100% przetopu

Na podstawie analizy rysunków 3 i 4 można zauważyć, że spawanie laserowe z chłodzeniem mikrojetowym pozwala na:

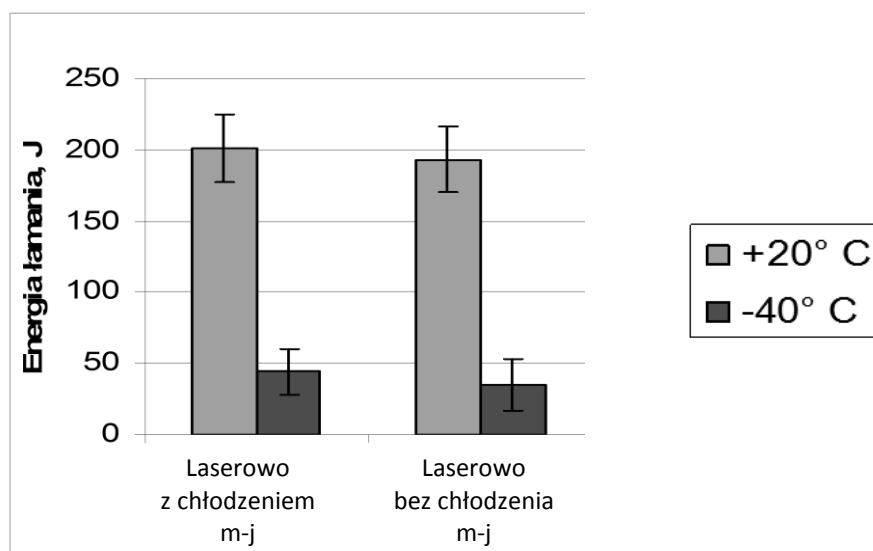
- wysoką jakość połączeń,
- powtarzalność właściwości połączeń,
- możliwość pełnej automatyzacji i robotyzacji procesu technologicznego,
- niski koszt procesu,
- uzyskanie większej ilości ferrytu AF w stopiwiu,
- zmniejszenie ilości faz MAC,
- lepszy przetop niż po spawaniu w osłonie gazów ochronnych.

W celu przeanalizowania nowego procesu spawalniczego wykonano próbki do badań udarności. Dobre właściwości plastyczne spawanego złącza w konstrukcjach są pochodnymi struktury. Podczas spawania konstrukcji powinno się dążyć do zapewnienia struktury, w której dominuje ferryt AF (acicular ferrite). Duża zawartość ferrytu AF gwarantuje wysoką udarność spawanego złącza, zwłaszcza w niskich temperaturach. Równocześnie powinno się ograniczać ilość niepożądanych faz MAC itp.

Stopiwo do badań udarności przygotowano zgodnie z wytycznymi normy PN-EN87/M-69772. W celu poznania wpływu chłodzenia mikrostrumieniowego na spawanie laserowe przebadano ponownie stal S355J2G3 (dawniej oznaczaną 18G2A wg PN), z której także była zbadana testowana wcześniej rama.

Na rys. 5 i w tabelicy 4 porównano udarność złącza konstrukcji spawanej laserowo (bez chłodzenia mikrostrumieniowego i z chłodzeniem mikrostrumieniowym) w temperaturze pokojowej i w temperaturze ujemnej dla sprawdzenia klasy udarności.

Zarówno w temperaturze dodatniej, jak i ujemnej wyższą energią łamania charakteryzują się stopiwa wykonane laserowo z użyciem chłodzenia mikrostrumieniowego.



Rys. 5. Energia łamania spawanego złącza różnymi metodami

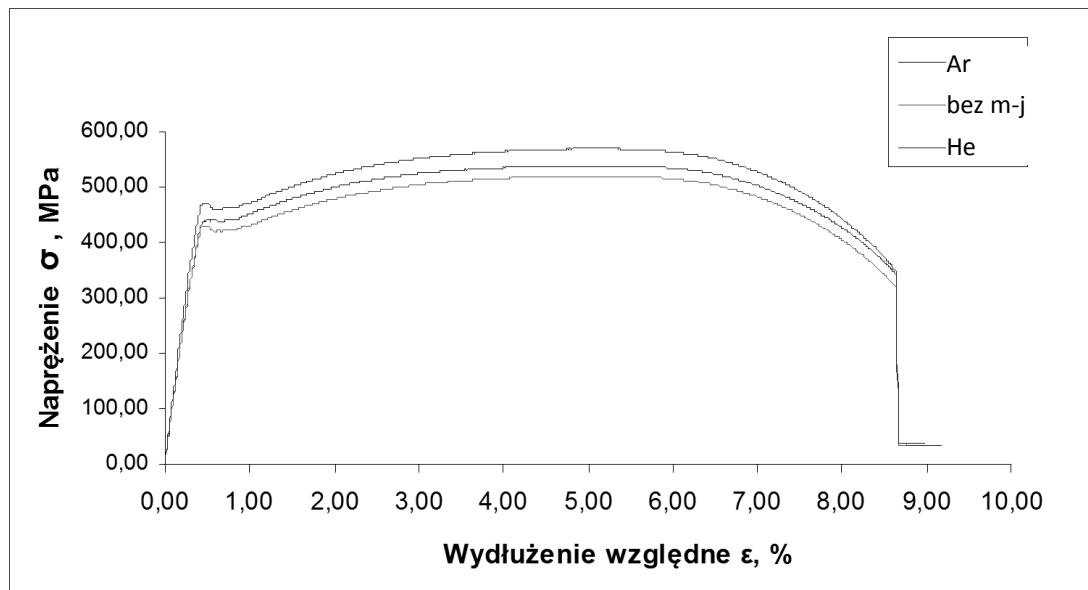
Tablica 4

Energia łamania niskostopowego stopiwa wykonanego najkorzystniejszymi procesami spawalniczymi

Metoda spawania	Temperatura [°C]	Udarność KCV [J]
MAG bez chłodzenia mikrostrumieniowego	- 40	42
MIG z chłodzeniem mikrostrumieniowym	- 40	47 (4 klasa udarnośći)
Laserowo	- 40	49 (4 klasa udarnośći)
Laserowo z chłodzeniem mikrojetowym	- 40	43

Stopiwa schładzane mikrostrumieniowo zestawione w tablicy 4 cechują się dobrą udarnością (nie mniejszą niż 47 J w temperaturze -40°C co spełnia wymagania 4 klasy udarnośći zalecanej przez Międzynarodowy Instytut Spawalnictwa. Stopiwo wykonane z chłodzeniem laserowym cechuje się najwyższą udarnością.

W przypadku próby statycznego rozciągania na próbkach o jednakowej szerokości na całej długości pomiarowej obejmującej spoinę istnieją odcinki o różnej plastyczności i różnym współczynniku wydłużenia. Stopiwo do badań doraźnej wytrzymałości przygotowano i porównano zgodnie z normą PN EN 87/M 69772. Próbkę do badań wykonuje się zgodnie z wytycznymi wynikającymi z normy EN 10002-1:1990. Na rysunku 6 przedstawiono porównanie wytrzymałości złączy wykonanych laserowo bez i ze schładzaniem mikrostrumieniowym. Dodatkowo przebadano hel jako gaz mikrostrumieniowy.



Rys. 6. Wykres rozciągania stopiwa wykonanego laserowo z chłodzeniem mikrojetowym (argon, hel) i bez chłodzenia

Z analizy rysunku wynika, że chłodzenie mikrostrumieniowe podwyższa wytrzymałość złącza. Na właściwości mechaniczne nieco korzystniejszy wpływ ma hel niż argon. Wyniki badań wytrzymałościowych i udarności wskazują na fakt, iż lepszymi właściwościami plastycznymi oraz wytrzymałościowymi charakteryzują się stopiwa wykonane laserowo ze schładzaniem mikrostrumieniowym.

3. WNIOSKI

Na podstawie przedstawionych propozycji innowacyjnych technologii spawania laserowego i tradycyjnego z chłodzeniem mikrostrumieniowym można sformułować następujące propozycje odnośnie do nowych elementów technologii obróbki cieplnej i spajania wiązką laserową:

- 1) Chłodzenie mikrostrumieniowe reguluje proces stygnięcia materiału, co pozwala sterować jego strukturą.
- 2) Przedstawione wyniki własności mechanicznych, w szczególności udarności, wynikające z korzystnych struktur po schładzaniu, wskazują na właściwy kierunek tej innowacyjnej technologii.
- 3) Pokazana technologia wykorzystania systemów mikrojetowych do sterowania strukturą materiału w procesach obróbki wiązką laserową jest najbardziej konkurencyjna spośród wszystkich znanych dotychczas technologii stosowanych do spawania elementów konstrukcji pojazdów.
- 4) Zaproponowane nowe sposoby kształtowania struktury i własności materiału spoin i warstw obrabianych cieplnie wiązką laserową mogą być wykorzystane w wielu nowoczesnych dziedzinach techniki, jak: motoryzacja, technologia elementów komputerowych, technika medyczna, lotnictwo, transport itp.

References

1. Mikielwicz D., J. Mikielwicz. 2005. *Chłodzenie powierzchni za pomocą osiowosymetrycznych strug cieczy*. Gdańsk: Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej. [In Polish: *Air-axisymmetric cooling surface with a fluid stream*].
2. Piwnik J., T. Węgrzyn, R. Wieszała, D. Hadryś. 2013. "Advantages of new micro-jet welding technology on weld microstructure control". *Transport Problems* 8(2): 47-54.
3. Węgrzyn T., J. Piwnik, B. Łazarz, D. Sieteski. 2013. "Innovative surface welding with micro-jet cooling". *Archives of Materials science and Engineering* 66(1): 34-39.
4. Węgrzyn T., J. Piwnik, R. Wieszała, D. Hadryś. 2012. "Control over the steel welding structure parameters by micro-jet cooling". *Archives of Metallurgy and Materials* 57(3).
5. Węgrzyn T., J. Piwnik, B. Łazarz, D. Hadryś, R. Wieszała. 2012. "Parameters of welding with micro-jet cooling". *Archives of Materials Science and Engineering* 54(2): 86-92. ISSN 1897-2764.
6. Węgrzyn T., J. Piwnik, B. Łazarz, M. Plata. 2012. "Micro-jet cooling gases for low alloy steel welding". *Archives of Materials Science and Engineering* 58(1): 40-44.
7. Węgrzyn T., J. Piwnik, B. Łazarz, D. Hadryś. 2013. "Main micro-jet cooling gases for steel welding". *Archives of Metallurgy and Materials* 58(2): 551-553.
8. Węgrzyn T., J. Piwnik, A. Silva, M. Plata, D. Hadryś. 2013. "Micro-jet technology in welding". In *The 23-rd (2013) International Ocean (Offshore) and Polar Engineering Conference, Proceedings of ISOPE-2013*: 178-180. Anchorage, Alaska, USA. 30 June-5 July 2013. Alaska, USA.
9. Węgrzyn T., J. Piwnik, B. Łazarz, D. Sieteski. 2013. "Innovate surface welding with micro-jet cooling". *Archives of Materials Science and Engineering* 61 (1): 38-44.
10. Piwnik J., T. Węgrzyn, R. Wieszała, D. Hadryś. 2013. "Advantages of new micro-jet, welding technology on weld microstructure control". *Transport Problems* 8(2): 47-54.
11. Klimpel A. 2011. *Technologie laserowe w spawalnictwie*. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej. [In Polish: *Laser technologies in welding*].
12. Kurc-Lisiecka A., W. Ozgowicz, W. Ratuszek, J. Kowalska. 2013 "Analysis of Deformation Texture in AISI 304 Steel Sheets". *Solid State Phenomena* 203-204: 105-110.
13. Burdzik R. 2012. Monitoring system of vibration propagation in vehicles and method of analyzing vibration modes. In *Communications in Computer and Information Science*, edited by J. Mikulski, 406-413. Springer, Heidelberg.
14. Ślązak B., J. Słania, T. Węgrzyn, A.P. Silva. 2013. "Process Stability Evaluation of Manual Metal Arc Welding Using Digital Signals". *Materials Science Forum* 730-732: 847-852.
15. Słania J. 2005 "Influence of phase transformations in the temperature ranges of 1250-1000°C and 650-350°C on the ferrite content in austenitic welds made with T 23 12 LRM3 tubular electrode". *Archives of Metallurgy and Materials* 3.
16. Burdzik R., Z. Stanik, J. Warczek. 2012. "Method of assessing the impact of material properties on the propagation of vibrations excited with a single force impulse". *Archives of Metallurgy and Materials* 57(2): 409-416.
17. Burdzik R., P. Folega, B. Łazarz, Z. Stanik, J. Warczek. 2012. "Analysis of the impact of surface layer parameters on wear intensity of friction pairs". *Archives of Metallurgy and Materials* 57(4), 987-993.
18. Golański G., J. Słania. 2012. "Effect of different heat treatments on microstructure and mechanical properties of the martensitic GX12CrMoVNbN91 cast steel". *Archives of Metallurgy and Materials* 4.

19. Lukaszewicz K., A. Kriz, J. Sondor. 2011. "Structure and adhesion of thin coatings deposited by PVD technology on the X6CrNiMoTi17-12-2 and X40 CrMoV5-1 steel substrates". *Archives of Materials Science and Engineering* 51: 40-47.
20. Lisiecki A. 2012. "Diode laser welding of high yield steel". In *Laser Technology 2012: Applications of Lasers*: 87030S. 24 September 2012. Szczecin - Świnoujście, Poland.
21. Lisiecki A. 2012. "Welding of titanium alloy by Disk laser". In *Laser Technology 2012: Applications of Lasers*: 87030T. 24 September 2012. Szczecin - Świnoujście, Poland.
22. Fołęga P. 2011. "FEM analysis of the options of using composite materials in flexsplines". *Archives of Materials Science and Engineering* 51(1): 55-60.
23. Górecki J., A. Kolasa. 2009. „Wpływ sposobu przechodzenia metalu w łuku przy spawaniu metodą MAG na właściwości złączy”. *Przegląd Spawalnictwa* 10: 68-72. [In Polish: *Effect of transition metal arc welding MAG on joint properties*].
24. Tarasiuk W., B. Szczucka-Lasota, J. Piwnik, W. Majewski. 2014. "Tribological Properties of Super Field Weld with Micro-Jet Process". *Advanced Materials Research* 1036: 452-457.
25. Czech Piotr, Grzegorz Wojnar, Rafał Burdzik, Łukasz Konieczny, Jan Warczek. 2014. „Application of the discrete wavelet transform and probabilistic neural networks in IC engine fault diagnostics”. *Journal of Vibroengineering* 16(4): 1619-1639.
26. Czech Piotr. 2012. „Diagnosis of industrial gearboxes condition by vibration and time-frequency, scale-frequency, frequency-frequency analysis”. *Metalurgija* 51(4): 521-524.
27. Czech Piotr, Henryk Madej. 2011. "Application of cepstrum and spectrum histograms of vibration engine body for setting up the clearance model of the piston-cylinder assembly for RBF neural classifier". *Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance And Reliability* 4: 15-20.

Received 05.06.2015; accepted in revised form 20.09.2015



Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License