

System pomiarowy do monitorowania procesu spawania hybrydowego

Measurement system for monitoring the hybrid welding process

Streszczenie. W artykule przedstawiono system pomiarowy do monitorowania procesu spawania hybrydowego, który aktualnie jest opracowywany w Katedrze Pomiarów i Sterowania na Wydziale Automatyki, Elektroniki i Informatyki Politechniki Śląskiej we współpracy z Katedrą Konstrukcji Maszyn na Wydziale Mechanicznym Technologicznym.

Abstract. The article presents a measurement system for monitoring the hybrid welding process, which is currently being developed at the Department of Measurement and Control at the Faculty of Automatic Control, Electronics and Computer Science of the Silesian University of Technology in cooperation with the Department of Machine Design at the Faculty of Mechanical Engineering.

Słowa kluczowe: spawanie hybrydowe, systemy pomiarowe, czujniki, rejestracja danych.

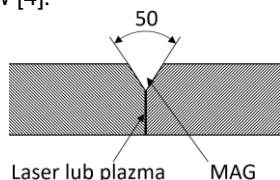
Keywords: hybrid welding, measuring systems, sensors, data acquisition.

Wstęp

Technologia spawania złączy doczołowych blach czy rurociągów obejmuje wiele metod, przy czym w spawaniu elementów o znacznej grubości, zwłaszcza z trudno spawalnych stali, stosuje się często spawanie hybrydowe, tj. połączenie spawania laserowego LW (ang. Laser Welding) i MAG (ang. Metal Active Gas) lub spawania plazmowego PAW (ang. Plasma Arc Welding) i MAG. Pierwszą z nich oznacza się często akronimem LHW (Laser Hybrid Welding), zaś drugą PHW (Plasma-Hybrid Welding). Przy dużych mocach źródeł spawalniczych, zwiększa się prędkość spawania, co wymaga m.in. kontroli i korekty parametrów spawania on-line, czemu służyć ma między innymi opracowywany system pomiarowy.

Obszar zastosowań spawania hybrydowego jest bardzo szeroki i ciągle trwają prace nad rozwojem tej metody spawania [1, 2, 3]. W szczególności ma ona zredukować liczbę ściegów koniecznych do wykonania złącza, w idealnym przypadku do jednego.

W artykule skupiono się na wykorzystaniu tego procesu do spawania blach. Podczas spawania hybrydowego elementów o znacznej grubości (do około 20 mm) wiązka laserowa lub strumień plazmy zapewnia przetopienie stykających się czołowo fragmentów blachy, zaś proces spawania MAG zapewnia wypełnienie szczeliny rowka spawalniczego. Przykład przygotowania blach do spawania hybrydowego pokazano na rysunku 1. Więcej przykładów znaleźć można w [4].



Rys. 1 Przykład przygotowania złącza do procesu spawania hybrydowego. Powierzchnie doczołowe przetapia się z wykorzystaniem wiązki laserowej lub strumienia plazmy, szczelinę wypełnia się w procesie spawania MAG

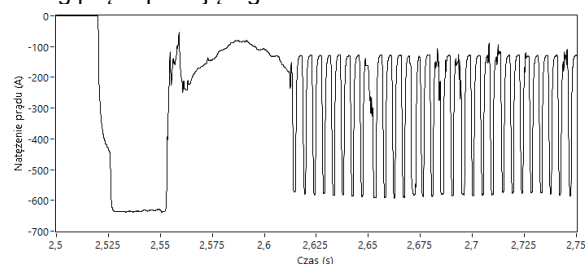
Kontrolę złączy spawanych przeprowadza się zwykle off-line, korzystając z badań nieniszczących lub niszczących. Do badań nieniszczących zaliczyć można w pierwszej kolejności ocenę wizualną złączy spawanych, następnie m.in. badania ultradźwiękowe, prądami wirowymi czy radiologiczne. Do badań niszczących zaś, zaliczamy

m.in. próby rozciągania, zginania, twardości oraz metalograficzne – makroskopowe i mikroskopowe. W szczególności te ostatnie wykorzystywane będą w dalszym etapie badań, celem identyfikacji wad w złączach spawanych i powiązania ich z sygnałami rejestrowanymi systemem pomiarowym opisywanym w tym artykule.

W literaturze obserwuje się dynamiczny rozwój metod i systemów monitorowania procesów spawania on-line [5, 6]. System opisywany w artykule ma docelowo współpracować z tworzonym bliźniakiem cyfrowym procesu spawania hybrydowego oraz wytrenowaną do celów monitorowania procesu spawania siecią neuronową.

Metodyka badań

W czasie pisania artykułu przeprowadzono pomiary dla spawania MAG prądem pulsującym oraz spawania plazmowego prądem stałym – z uwagi na ograniczenia sprzętowe. Przewiduje się, po zakupie nowego palnika plazmowego, przeprowadzenie prób spawania prądem pulsującym. Przykładowy przebieg rejestrowanego prądu spawania, dla procesu MAG, w fragmencie pokazano na rysunku 2. Widać moment inicjacji łuku a następnie typowy przebieg prądu pulsującego.



Rys. 2 Przebieg prądu pulsującego w procesie spawania MAG

W czasie spawania plazmowego jak i MAG generowane jest promieniowanie UV o znacznym natężeniu. Będzie ono rejestrowane z wykorzystaniem odpowiedniej fotodiody. W literaturze opisywane jest również wykorzystanie czujników przyspieszenia drgań, emisji akustycznej czy mikrofonów. One również zostaną zaimplementowane w opracowywanym systemie pomiarowym.

Każdy z tych czujników, z wyjątkiem fotodiody, o ile nie jest ona wystawiona na bezpośrednie działanie promieni słonecznych, poza sygnałem użytecznym, narażony jest na rejestrację sygnałów zakłócających (tła). Sygnały te

występują zwykle rzadko w sposób losowy, zazwyczaj w sposób stały, jak np. dźwięk aparatu spawalniczego (spawarki), czy wyciągu.

W zarejestrowanych sygnałach poszukiwane będą nietypowe zmiany, sugerujące pojawienie się wad w złączu spawanym. Klasyfikacja tych wad wymagała będzie dużego nakładu pracy, w związku z bardzo dużą ilością rejestrowanych danych pomiarowych i koniecznością przeprowadzenia badań nieniszczących i niszczących wykonanych złączy. W chwili obecnej, celem przetestowania systemu pomiarowego jak i opanowania kluczowych parametrów dla procesu spawania, skupiono się na testach tzw. Bead-on-plate (ścieg ułożony na blasze) [7]. Kluczowe będzie połączenie wyników analizy numerycznej zarejestrowanych sygnałów oraz wyników badań nieniszczących i metalograficznych. Odpowiednie sklasyfikowanie wad spawania i przypisanie ich do zmian wykrytych w sygnale niezbędne jest, w dalszej części badań, do uczenia sieci neuronowych, które mają zautomatyzować wykrywanie wad w czasie procesu spawania.

Kolejnym etapem badań będzie spawanie doczołowe blach z wygenerowanymi sztucznie defektami mechanicznymi, które wywołać mają pożądane w badaniach defekty w ściegach.

System pomiarowy

Z uwagi na to, że obecnie skupiono się na monitorowaniu osobno procesu spawania MAG, PAW oraz hybrydowego PHW, system pomiarowy wyposażono w fotodiody na zakres długości fali promieniowania UV. W dalszej części badań, gdy monitorowany będzie proces LHW, system doposażony zostanie o fotodiody rejestrującą natężenie promieniowania w zakresie długości fali około 1064 nm.

Wykorzystano następujące czujniki:

- fotodiody UV, firmy Roithner Lasertechnik, model GUVV-T21GH,
- mikrofony: MEMS oraz elektretowy,
- mikrofon IEPE firmy GRAS, model 146AE, wyposażony w pamięć TEDS (Transducer Electronic Data Sheet),
- akcelerometr MEMS firmy Analog Devices, modele odpowiednio: ADXL 325 oraz ADXL 1001,
- czujnik piezoelektryczny, trójosiowy, firmy PCB, model 356A17,
- czujnik emisji akustycznej wraz z układem kondycjonowania, opracowany m.in. w Katedrze Optoelektroniki Politechniki Śląskiej [8],
- przekładnik prądowy LEM HTA 200-S.

Ponadto monitorowane były, z wykorzystaniem urządzeń dostępnych na stanowisku spawania, następujące parametry:

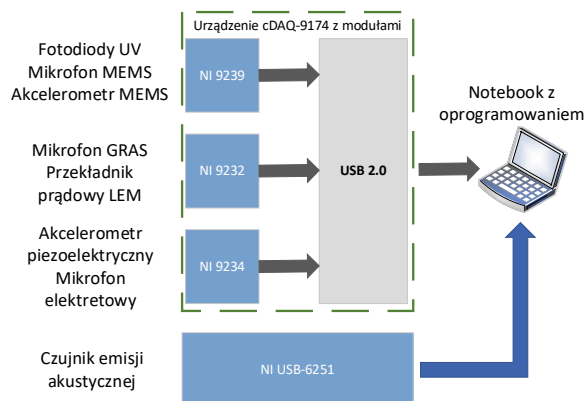
- objętościowy przepływ gazu osłonowego,
- napięcie łuku,
- prędkość podawania drutu (dla MAG),
- prędkość spawania.

System akwizycji sygnałów stanowi urządzenie cDAQ (CompactDAQ) firmy NI, cDAQ-7174 oraz umieszczone w nim następujące moduły pomiarowe:

- NI-9239 – 4 wejścia analogowe ± 10 V, o rozdzielczości 24 bity,
- NI-9234 – 4 wejścia dla akcelerometrów i mikrofonów IEPE, z możliwością konfigurowania jako wejścia analogowe o rozdzielczości 24 bity i zakresie napięć ± 5 V, kompatybilny z TEDS,
- NI-9232 – 3 wejścia dla akcelerometrów i mikrofonów IEPE, z możliwością konfigurowania

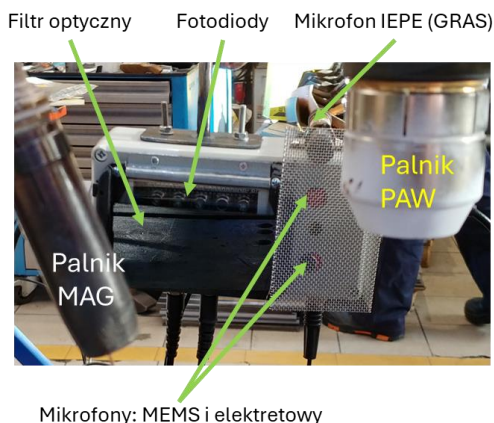
jako wejścia analogowe o rozdzielczości 24 bity i zakresie napięć ± 30 V, kompatybilny z TEDS.

Zdecydowano, że w obecnej fazie projektu sygnały rejestrowane będą z częstotliwością 51,2 kHz. Na potrzeby analizy sygnałów mogą one być odpowiednio decymowane. Urządzenie cDAQ zapewni synchronizację rejestracji danych pomiarowych na wszystkich kanałach. Dodatkowo, sygnał z czujnika emisji akustycznej rejestrowany jest z wykorzystaniem karty firmy NI, DAQ USB-6251. Pasma przenoszenia czujnika wynosi około 100 kHz a karta zapewnia rejestrację sygnału z częstotliwością próbkowania 1,25 MHz. Dane pomiarowe rejestrowane są z wykorzystaniem komputera przenośnego z zainstalowanym specjalistycznym oprogramowaniem. Schemat blokowy systemu pomiarowego pokazano na rysunku 3.



Rys.3. Schemat systemu rejestracji danych pomiarowych

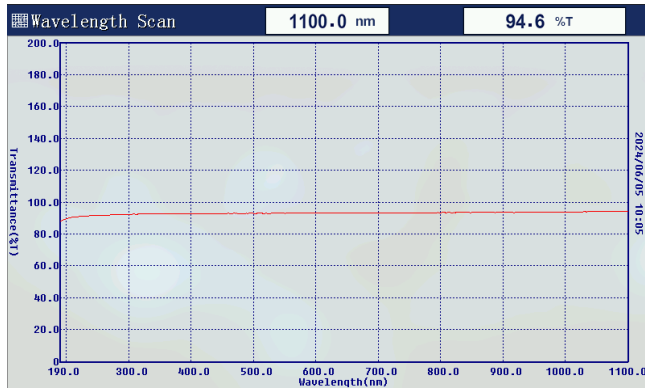
Wykorzystana fotodiody, ze względu na duże natężenie promieniowania UV generowane w czasie procesu spawania MAG/PAW/PHW wymagała zastosowania odpowiedniego filtra tłumiącego. Z uwagi na budżet przewidziany na budowę sytemu pomiarowego jak i ograniczenia konstrukcyjne na obecnym etapie prac, nie zdecydowano się na dedykowane tłumiki optyczne, montowane na światłowodach. W opracowanej głowicy pomiarowej, mieszczącej część czujników, byłoby to kłopotliwe rozwiązanie. Wygląd głowicy pokazano na rysunku 4.



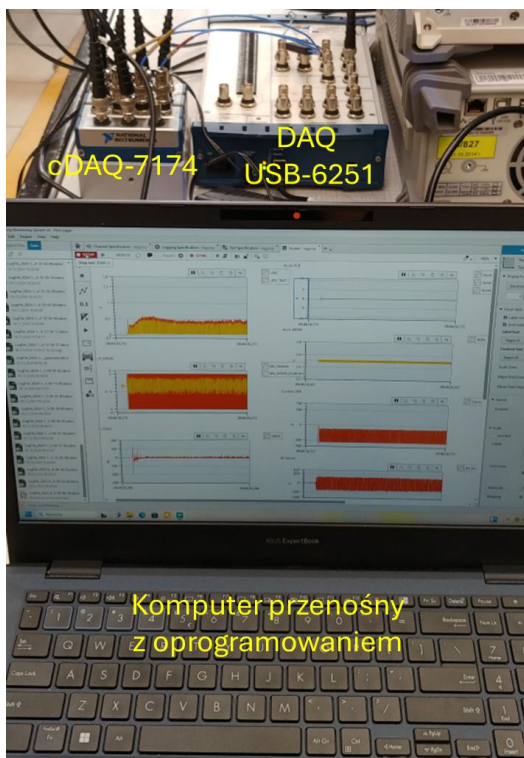
Rys.4. Widok głowicy pomiarowej, zamontowanej na stanowisku do testów spawania metodami MAG, PAW oraz PHW

Konstrukcja zastosowanego filtra optycznego bazuje na wykorzystaniu szybki spawalniczej, która częściowo przysłania fotodiody, blokując tym samym dużą część promieniowania UV. Szybkę można przesuwac w kierunku góra – dół, dobierając odpowiednio stopień tłumienia. Nie jest to rozwiązanie idealne, po zamontowaniu i ustawieniu głowicy pomiarowej wymaga przeprowadzenia wstępnego

procesu spawania celem ustawienia szybki. Zaletą jest odporność na odpryski powstałe przy spawaniu MAG. Dodatkowo, o czym należy wspomnieć, pomiędzy szybką spawalniczą a fotodiodą umieszczono dodatkową szybkę ze szkła kwarcowego JGS1, które jest transparentne w zakresie promieniowania UV, a stanowi tutaj osłonę fotodiody przed odpryskami. Aby mieć pewność, co do charakterystyki przepuszczalności szybki kwarcowej, korzystając z spektrofotometru wyznaczono odpowiednią charakterystykę, którą zamieszczono na rysunku 5. Na rysunku 6 pokazano system akwizycji danych w czasie rejestracji danych podczas procesu spawania.



Rys.5. Charakterystyka przepuszczalności promieniowania w zakresie długości fali od 190 nm do 1100 nm dla szkła kwarcowego JGS1. Na osi odciętych – długość fali w nm, na osi rzędnych przepuszczalność (transmittance) wyrażona w %



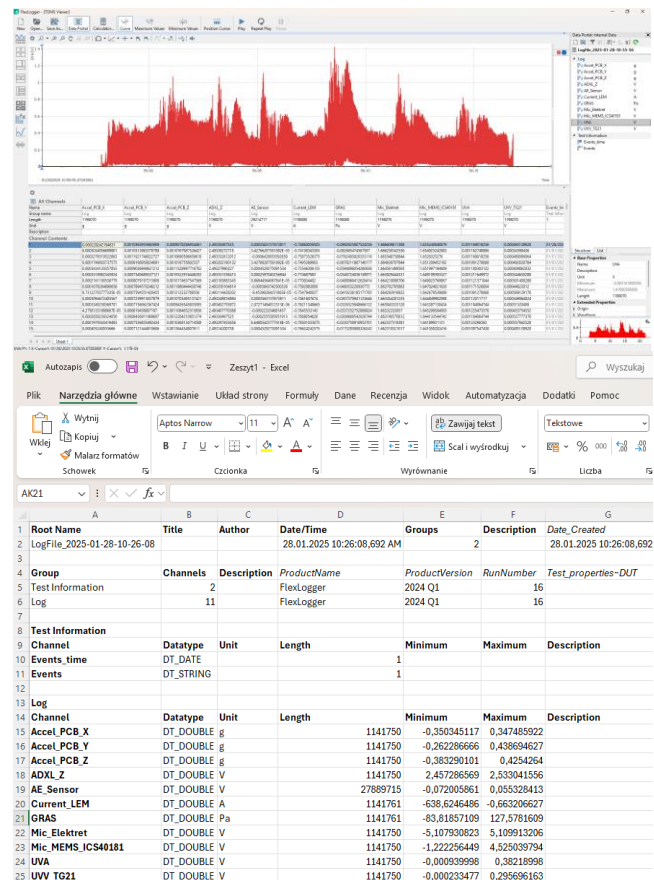
Rys.6. System akwizycji danych w trakcie rejestracji danych pomiarowych

Oprogramowanie

Docelowo przewiduje się stworzenie dedykowanej aplikacji w środowisku LabVIEW. Jednak na obecnym etapie badań, gdzie dość często zmieniano bądź dodawano czujniki, bardziej sensowne okazało się wykorzystanie aplikacji FlexLogger firmy NI. Umożliwia ona szybką konfigurację kanałów pomiarowych. Podłączony do

komputera sprzęt firmy NI jest automatycznie wykrywany i w łatwy sposób konfiguruje się potrzebne tory pomiarowe.

Dane pomiarowe strumieniowane są do plików TDMS (Technical Data Management Streaming) i przetwarzane off-line. Po przeprowadzeniu poszczególnych testów spawania, zarejestrowane dane można szybko zweryfikować poprzez ich wizualizowanie, również w programie FlexLogger, z wykorzystaniem wtyczki NI FlexLogger TDMS Viewer, która instalowana jest razem z programem FlexLogger. Możliwe jest również otwarcie pliku TDMS w programie Excel, po zainstalowaniu darmowego dodatku TDM Excel Add-In for Microsoft Excel. Należy mieć jednak na uwadze ograniczoną liczbę wierszy w programie Excel (około 1 miliona), co najczęściej uniemożliwia w tym wypadku wyświetlenie wszystkich danych – rejestrowane pliki TDMS mają objętość około 300 MB do 1 GB i z reguły w każdym z kanałów pomiarowych zawierają ponad 1 mln próbek. Na rysunku 7 zaprezentowano wygląd okna podglądu sygnału w programach FlexLogger oraz Excel.



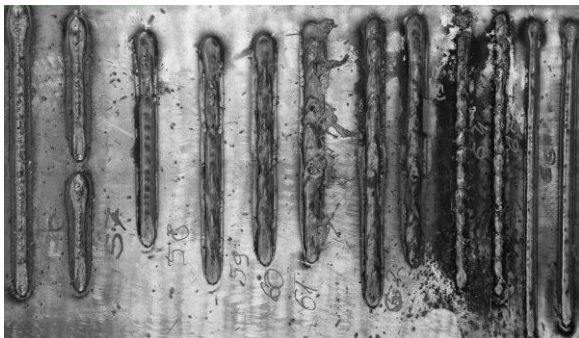
Rys.7. Wizualizacja zarejestrowanych danych w programie FlexLogger (górny rysunek) i odczyt danych w programie Excel (dolny rysunek – widoczna karta z informacjami o zapisanych grupach kanałów i kanałach; dane z poszczególnych grup kanałów dostępne są na oddzielnych arkuszach)

Wstępne wyniki przetwarzania sygnałów

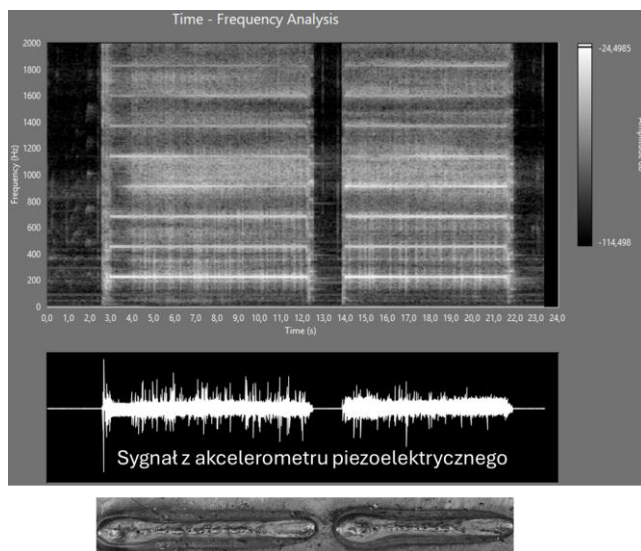
Ze względu na wykorzystanie zaawansowanych metod analizy sygnałów do ich przetwarzania wykorzystano oprogramowanie Matlab. Matlab umożliwia odczyt danych z plików TDMS, ale trzeba zwrócić uwagę na pewną niedogodność wynikającą z jednego z ograniczeń programu FlexLogger. Pliki TDMS zapisywane są tam w formacie 1.0, zaś Matlab umożliwia bezproblemowy odczyt plików TDMS zapisanych w formacie 2.0. Można temu zaradzić, konwertując pliki do formatu 2.0 z wykorzystaniem odpowiedniego skryptu Matlab. Od wersji R2024a

w Matlabie jest wbudowany do tego skrypt: *tdmsconvert*. Można też dokonać konwersji tworząc prostą aplikację w środowisku programowania LabVIEW.

Na chwilę obecną zarejestrowano około 65 GB danych pomiarowych, dla procesów spawania MAG oraz PAW. Rejestrowano sygnały dla optymalnych parametrów procesu jak i generowano zakłócenia w postaci ograniczenia przepływu gazu osłonowego oraz przedmuchów. Na rysunku 8 zaprezentowano ściegi wykonane zarówno dla poprawnego procesu spawania jak i z generowanymi zakłóceniami.



Rys.8. Widok ściegów wykonanych w ramach jednego z testów spawania metodą MAG



Rys. 9 Przykład analizy czasowo-częstotliwościowej zarejestrowanego sygnału dla ściegu widocznego u dołu rysunku

Dla przykładu, dla ściegu nr 58 w początkowej fazie (u góry) ograniczono dopływ gazu osłonowego, dla ściegów 61 do 62 wygenerowano przedmuchy a dla 63 i 64 podtopienia, których przyczyną była zbyt duża prędkość spawania.

W ramach badań przewiduje się wykorzystanie dość szerokiego wachlarza metod przetwarzania sygnałów, zarówno w dziedzinie czasu jak i częstotliwości [8, 9,10]. Przeprowadzono już pierwsze próby klasyfikacji sygnałów dla celów uczenia sieci neuronowych. Na rysunku 9 pokazano przykładowy wynik analizy sygnału, jaki uzyskano dla jednej z próbek. Wprowadzone zakłócenie to chwilowe zablokowanie przepływu gazu osłonowego.

Podsumowanie

W artykule przedstawiono prace nad stworzeniem systemu pomiarowego do monitorowania procesu spawania. Dobrano wstępnie komponenty systemu i przeprowadzono szereg testów polegających na rejestracji sygnałów dla spawania MAG oraz PAW dla różnych parametrów procesu spawania. System będzie uzupełniony o czujniki przydatne do monitorowania procesu spawania laserowego. Docelowo system przewidziany jest do monitorowania procesu spawania hybrydowego LHW oraz PHW. Aktualnie trwają też prace nad przetwarzaniem zarejestrowanych sygnałów, pod kątem wykrywania wad w procesie spawania oraz klasyfikacji wad i sygnałów dla celów uczenia sieci neuronowych.

Artykuł został opracowany w ramach rozpowszechniania wiedzy na temat projektu badawczego Research Programme of the Research Fund for Coal and Steel. „Development of a SMART system integrating automatic/robotic hybrid WELDing technologies, digital-twin assisted quality monitoring, and WPS predictive tool”. SMARTWELD. RFCS-02-2022-RP.J. ID 101112414.

Autorzy: dr inż. Roman Wyżgolik, Politechnika Śląska, Katedra Pomiarów i Systemów Sterowania, ul. Akademicka 16, 44-100 Gliwice, E-mail: roman.wyzgolik@polsl.pl; dr hab. inż. Dariusz Bismor, prof. Politechniki Śląskiej, Katedra Pomiarów i Systemów Sterowania, ul. Akademicka 16, 44-100 Gliwice, E-mail: dariusz.bismor@polsl.pl; dr hab. inż. Paweł Kasprowski, prof. Politechniki Śląskiej, Katedra Informatyki Stosowanej, ul. Akademicka 16, 44-100 Gliwice, E-mail: pawel.kasprowski@polsl.pl; prof. dr hab. inż. Andrzej Klimpel, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn, ul. Konarskiego 18A, 44-100 Gliwice, E-mail: andrzej.klimpel@polsl.pl

LITERATURA

- [1] Nielsen S. E., High Power Laser Hybrid Welding – Challenges and Perspectives, *Physics Procedia*, Vol. 78 (2015), 24-34
- [2] Dongsheng W., Kazuya I., Shinichi T., Kazufumi N., Xueming H., Ninshu M., Manabu T., Dynamic keyhole behaviors and element mixing in paraxial hybrid plasma-MIG welding with a gap, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 200 (2023), 123551
- [3] Toshifumi Y., Shinichi T., Hiroyuki K., i inni, An investigation on plasma-MIG hybrid welding process of thick plate aluminum, *Journal of Advanced Joining Processes*, Vol. 9 (2024), 1000188
- [4] Klimpel A., Analiza procesu spawania plazmowego – Cz. I, *Stal, Metale & Nowe Technologie*, nr 3/4 (2024), 70-76
- [5] Deyong Y., Seiji K., Review of laser welding monitoring, *Science and Technology of Welding & Joining*, Vol. 19 (2014)
- [6] Valdiande J.J., Martínez-Mincheró M., Cobo A., Lopez-Higuera J.M., Mirapeix J., On-line monitoring and defect detection of arc-welding via plasma optical spectroscopy and LIBS, *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, Vol. 194 (2022), 106474
- [7] Lisiecki A., Effect of heat input during disk laser bead-on-plate welding of thermomechanically rolled steel on penetration characteristics and porosity formation in the weld metal, *Arch. Metall. Mater.*, vol. 61 (2016), No. 1, 93-102
- [8] Tessem S.H., Bismor D., Quality monitoring of hybrid welding processes: A comprehensive review, *Archives of Control Sciences*, Vol. 34 (2024) No. 4, 833–861
- [9] Witos F., Opilski Z., Szerszeń G., Setkiewicz M., The 8AE-PD computer measurement system for registration and analysis of acoustic emission signals generated by partial discharges in oil power transformers, *Metrology and Measurement Systems*, Vol. 26 (2019), No. 2, 403-418
- [10] Yusof M. F. M., Mahadzir I., Mohd F.G., Acoustic methods in real-time welding process monitoring: Application and future potential advancement, *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 15, no. 4 (2021), 8490-8507