## 1. Roman WYŻGOLIK, 2. Dariusz BISMOR, 3 Paweł KASPROWSKI, 4. Andrzej KLIMPEL

ORCID: 1. 0000-0003-3855-9988; 2. 0000-0003-4758-3592; 3. 0000-0002-2090-335X; 4. 0000-0001-5765-5663

DOI: 10.15199/48.2025.04.55

# 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 acquisiion.

#### 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].



Laser lub plazma MAG

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 tworzony 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, we 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 fotodiodę rejestrującą natężenie promieniowania w zakresie długości fali około 1064 nm.

Wykorzystano następujące czujniki:

- fotodioda 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 zapewnia synchronizację rejestracji danych pomiarowych na wszystkich kanałach. Dodatkowo, sygnał z czujnika emisji akustycznej rejestrowany jest z wykorzystaniem karty firmy NI, DAQ USB-6251. Pasmo 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 fotodioda, ze względu na duże natężenie promieniowania UV generowane w czasie procesu wymagała MAG/PAW/PHW spawania 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.

Filtr optyczny Fotodiody Mikrofon IEPE (GRAS)



Mikrofony: MEMS i elektretowy

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

Konstrukcja zastosowanego filtru optycznego bazuje na wykorzystaniu szybki spawalniczej, która częściowo przysłania fotodiodę, blokując tym samym dużą część promieniowania UV. Szybkę można przesuwać 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 szkiełka 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 zwizualizowanie, 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.

Pa all M B vi ve	46 1		100				
Open. Sector. Instant Caudes. Core Manual	time thermore theme Partie	stand For Aquel Pay					Ours Tonic Inspiral Data
24				1			1) 10 T 11 21- 51 C
5				4.4			* Ing Public Kit x
		1 1					Period, PCR, Y B Period, PCR, J
1							V 408,2 V V 40,5eren V
1.0	(ident)	1. 6 1					Pur Carmet LEM A Pur Office Pe
58-			Lun b			41	PUNCIESSIN V
No. A.	and the second second		1	and the second			PUMU/ERI V
							P Lott, Srv
				6 A.S.			
9 <u>1</u> 8.10		5.3		18×10	16.7		-
Augustines and an an							104
0 III Al Oussels							
Nera Acol PCE 3 Acol PCE 3 Serve taxes Log Log	Aust/CLI 43	4,2 ACSeven	Canad (204	(RA) Also Damat	MCHENCESHIN UN	OW, NOR	Evends for 1 Vest filter
Inspit TRED TRED	1 10	1 (10) (10) (10) (10) (10) (10) (10) (10	4	Pe Y	V V	V	
Charwell Contents							Terrora
I LOCAL AND A LOCA	a Lancerrecturer 2.4	000/1018 1.42%000100 00000100120000042000	INCE OF GRADUITS	CONSISTENT I ANOSIACI	Lehennesen     Lehennesen     Lehennesen     Lehennesen     Lehennesen	NATER CONSUMINATION	PUTUTE Stratue   Ud
4 6.001/14880731111 8.00110058048 5 6.0004488.0051111 8.001404880111	1 8300475502527 2.4 2 83015339475656 2.4	030190732 3.427603758 0296027 3.20602975	PROCE-US -4. THIS SUBMIT	4.00%218016011 1.06408105 4.00468054008 1.06464900	4 1.051204/2142 0.001094 4 1.02120-0009 0.001100	218188 0.00046308764 (63102 0.000444625.0	Party Unit
LOCATIONCIACIÓN LOCATION/ LOCATION/LOCATION LOCATION/LOCATI	1 0.019000914440001 2.4 8 0.010111457547549 2.4	UNITARY STREET	254844 -0.75487401 1547 (-15 -0.75004402	CONTRACTORY INTER CONTRACTORY	1 Lade Beiniger District 6 Lade Beiniger District	6.00000-0038	PLATIN Des a
<ul> <li>Local Construction Construction</li> <li>Local Construction</li> <li>Local Construction</li> </ul>	2 EXECTIONARIOSTVE 2.46 1 EXECUTION 2.46	01942002 44096260	510634-05-0756794807	-Companyation 1.66000000	LIANSALTING CORTS	State Coordination (N	EVELOD Maariam Lateration
10 Elizabilitzariative Elizabilitzaria 11 Elizabilitzariative Elizabilitzaria	4 EDDACASSING 2.4	California (1967)	121 X de 0 101154840	ACCINENTIAL TARGET	<ul> <li>CALIFORNIA CONTINUE</li> <li>CALIFORNIA CONTINUE</li> </ul>	INGUE CODERVIEW	A Extended Properties
3 K.0002552780-429 K.00044597 water	7 8.301354215351274 2.40	CONTRACTOR CONTRACTOR	04(NO) 4.75585425	ALLENGER ALLEN I MARKETE	L Lister 325-er Tel Lister 140	64144 6.0005077771%	A Manfan
A DODATCIENTINEE & DOTTITIALETINE	·	meterns assessment	011334 01942/2029	CONTRACTOR I MODIFICIE	T LAN MORE COTOR	sava coorrigen	street as the labor
<ul> <li>Carnet Biological Index Caller F Carnets 1/19-54</li> </ul>							10 4 4 4 4
							0
Autozapis 🕘 📙 🍫	• (- · =	Zeszyt1 - E	xcel				9 Wyszuki
office a terms where a before a state	(	Ulde al atoma a	Farmer	D	- 1454-1- 4		Desirable Desirate
Plik Narzędzia główne v	vstawianie	Ukrad strony	Formuly	Dane Recenz	a widok Au	tomatyzacja	Dodatki Pomoc
~ V							
Wytnij	A	1	A	= 20	ab		(Talatana
Wytnij	Aptos Narrow	~ [11 ~	A A	≡ ≡ ∌	✓ ab Zawijaj	tekst	Tekstowe
Wytnij	Aptos Narrow	- 11 -	A A	= = = *	<ul> <li>Zawijaj</li> <li>Zawijaj</li> </ul>	tekst	Tekstowe
Wytnij Wklej Wklej Wklej	Aptos Narrow B I U	-)[11 - , -   ⊞ -   <u>⊅</u>	A A A A	= = <b>=</b> *	<ul> <li>→ Zawijaj</li> <li>→ E Scaliw</li> </ul>	tekst yśrodkuj ~	Tekstowe ☞ ~ % ∞   % 4
Wytnij Wklej ™ Kopiuj ~ ✓ ✓ Malarz formatów Schowek 5	Aptos Narrow B I U	-> 11 - 、 ->   ⊞ ->   <u>♪</u> Czcionka	A A <u>A</u> ,	= = = *	✓ 2b Zawijaj → Scal i w Wyrównanie	tekst yśrodkuj ~	Tekstowe
Wklej Wytnij Wklej Malarz formatów Schowek 55	Aptos Narrow B I U	•   ⊞ •   <u>⊅</u> Czcionka	A A A A Fs	= = = *	✓ 2awijaj E Scal i w Wyrównanie	tekst yśrodkuj ~ Fs	Tekstowe ﷺ ∽ % 000 5% 4 Liczba
Wklej ↓ Wytnij Wklej ↓ Malarz formatów Schowek 5 K21 ↓ X √ fx	Aptos Narrow B I U	-> 11 - 、   Ⅲ   <u>0</u> Czcionka	A A A	= = = >	<ul> <li>✓ (2b) Zawijaj</li> <li>→ Ξ</li> <li>→ Ξ</li> <li>✓ ΞΞ</li> <li>✓ ΞΞ<th>tekst yśrodkuj ~ F3</th><th>Tekstowe</th></li></ul>	tekst yśrodkuj ~ F3	Tekstowe
↓ Wytnij         ↓ Kopiuj         ↓ Malarz formatów         Schowek         5         K21         ↓	Aptos Narrow B I U V B	-> 11 - 、 ->   ⊞ ->   ₫ Czcionka	A A A		<ul> <li>✓ (2) Zawijaj</li> <li>2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2</li></ul>	tekst yśrodkuj ~ Fs	Tekstowe
X     Wytnij       Wklej     Kopiuj       Schowek     rs       K21     Image: Schowek       A     X       A     A	Aptos Narrow B I U > B Title	v 11 v v 1 ↔ d Czcionka C Author	A A A		<ul> <li>✓ Description</li> <li>✓ Descr</li></ul>	tekst yśrodkuj ~ F Description	Tekstowe
Widej Widej Malarz formatów Schowek 55 K21 ↓ I × √ fx A Root Name LooFile 2025-01-28-10-26-08	Aptos Narrow B I U B Title	v 11 v v 1 ₩ v 1 4 Czcionka C Author	A A <u>A</u> <u></u> <u>5</u> <u>5</u> <u>5</u> <u>5</u>	E = :	V E Groups	tekst yśrodkuj ~ F Description	Tekstowe
Muley Withing Muley Malarz formatów Schowek fs K21 - I X X fx A Root Name LogFile_2025-01-28-10-26-08	Aptos Narrow B I U ~ B Title	v)[11 v v   III v   🖄 Czcionka C Author	A A A A A Date/Time 28.01.2025	E = E ≫ E = E = E	<ul> <li>✓</li> <li>✓</li></ul>	vsrodkuj v rs Description	Tekstowe
Witej Widej Wi	Aptos Narrow B I U B Title	v)(11 v v   III v   de Czcionka C Author	A A A I I I I I I I I I I I I I I I I I	E = = ** E = = = = D 10:26:08,692 AM	Comparison     C	F Description	Tekstowe 200 → % 000 *28 = Liczba Date_Created 28.01.2025 10:26:08.4 Test properties=D/IT
Widej → Wytnij Widej → Kopiuj → Schowek 5 Ko21 → 1 × √ fx A Root Name LogFile_2025-01-28-10-26-08 Group Teach Jacomention	Aptos Narrow B I U B Title Channels	v 11 v Czcionka C Author Description	A A A A A Date/Time 28.01.2025 ProductNar	E = E = D D 10:26:08,692 AM me	E     Groups     ProductVersion	rekst yśrodkuj ~ 5 Description RunNumber	Tekstowe           Image: Constraint of the second
Withing       Koping ~         Withing       Koping ~         Withing       Stronge         Schowek       Far         A       A         Root Name       LogFile_2025-01-28-10-26-08         Group       Test Information	Aptos Narrow B I U B Title Channels	v 11 v Czcionka C Author Description	A A A Fair Fair Fair Fair Fair Fair Fair Fair	E = E *	E     Groups     ProductVersion     2024 Q1	F Description RunNumber 16	Tekstowe E ~ % 000 % :: Liczba G Date_Created 28.01.2025 10:26:08,1 Test_properties-DUT
Witing Kopiuj ~ Miting Control of Control o	Aptos Narrow B I U B Title Channels 2 11	v III v Czcionka C Author Description	A A F A F B Date/Time 28.01.2025 ProductNar FlexLogger FlexLogger	E = E *	✓ E Zawijaj     E Scali w Wyrównanie      E Groups 2024 Q1 2024 Q1	kekst yśrodkuj ~ F Description RunNumber 16 16	Tekstowe           Image: Second state of the second stat
Maiar Cormatów Schowekk 5 K21 → I Kormatów Reot Name LogFile_2025-01-28-10-26-08 Group Test Information Log	Aptos Narrow B I U B Title Channels 2 11	v 11 v v 1 → 1 do Czcionka       Czcionka       C       Author       Description	A^ A' <u>A</u> - <u>Fs</u> Date/Time 28.01.2025 ProductNar FlexLogger	E = E *	E     Groups     Zawijaj     E     Groups     Z     ProductVersion     2024 Q1	F Description RunNumber 16	Tekstowe Elizaba G Date_Created 28.01.2025 10:26:08,1 Test_properties-DUT
Wing Bropin → Showetk or Showetk or Root Name LogFile 2025-01-28-10-26-08 Group Test Information Test Information	Aptos Narrow B I U B Title Channels 2 11	→)(11 、 →   ⊞ →   Δ Czcionka C Author Description	A A A - A A 	E = E = D D D D D D D D D D D D D	→ E     Croups     Zawijaj     Scal i w Wyrównanie     E     Croups     2 ProductVersion     2024 Q1     2024 Q1	kekst ysrodkuj ~ F Description RunNumber 16 16	Tekstowe Eller ~ % 000 * d - 4 Uczba G Date Created 28.01.2025 10:26:08/ Test_properties-DUT
Welly Welly Welly Malarz formatów Schowetk 5 Root Name LogFile_2025-01-28-10-26-08 Group Test Information Log	Aptos Narrow B I U B Title Channels 2 11 Datatype	<pre>&gt; 11 </pre> Czcionka C data data data data data data data dat	A A A - A A 	E = E € €	<ul> <li>E Zawijaj</li> <li>Scali w</li> <li>Myrównanie</li> </ul> ProductVersion 2024 Q1 2024 Q1 Minimum	rs F Description RunNumber 16 16 Maximum	Telatowe  Telatowe  Telatowe  G  G  Date_Created  28.01.2025 10.26.08,1  Test_properties-DUT  Description
Waig Byoni → Schowek 55 Schowek 55 Sch	Aptos Narrow B I U B Title Channels 2 11 Datatype DT DATE	v 11 v v 2 2 2 Czcionka Description Unit	A A A A - A -  	= = =	Comparison     C	tekst yśrodkuj ~ F Description RunNumber 16 16	Tekstowe  Tekstowe  G  G  Date Croated 28.01.2025 10:26:08,1  Test_properties-DUT  Description
Weig Wytruj Weig Chapia	Aptos Narrow B I U B Title Channels 2 11 Datatype DT_DATE DT STRING	v  11 v v   ⊞ v   & Czcionka Description Unit	A A A - - A - 	E = : : : : : : : : : : : : : : : : : :	Comparison     C	rekst yśrodkuj ~ F Description RunNumber 16 16 Maximum	Telatowe  Telatowe  Telatowe  G  G  Date, Created 28.01.2025 to 26:08, Test, properties-DUT  Description
Watig Devolution of the second	Aptos Narrow B I U B Title Channels 2 11 Datatype DT_DATE DT_STRING	v  11 v v   ⊞ v   ∆ Czcionka C Description Unit	A A A A - A -                        	= = =	Croups	tekst ystrodkuj v F Description RunNumber 16 16 Maximum	Tekstowe  Tekstowe  G  G  Date Created 28.01.2025 10:26:08,1  Test properties-DUT  Description
Weig Wytruj Weig Chapij ~ Malarz formatów Schowek 5 221 ~ I ~ J ~ J ~ J ~ J Root Name LogFile_2025-01-28-10-26-08 Group Test Information Log Log Schamet Events Sime Events	Aptos Narrow B I U B Title Channels 2 11 Datatype DT_DATE DT_STRING	v 11 v v 2 0 0 v Czcionka	Date/Time 28.01.2025 ProductNar FlexLogger Length	E = = = ≫ E = = = = D D 10:26:08,692 AM me 1 1	V ProductVersion 2024 Q1 Minimum	tekst ykrodkuj ~ F Description RunNumber 16 16	Telestowe Telestowe Itabs G Date_Created 28.01.2025 10:26:08,1 Test_properties-DUT Description
Weig Wytnij Di Kopij - Sthovek rs Schovek rs Root Name Log File, 2025.01.28-10-26-08 Group Test Information Channel Events_time Events Log	Aptos Narrow B I U 8 Title Channels 2 11 Datatype DT_DATE DT_STRING	v   11 v v   12 v   22 czcionka C Author Description	A A A A A A A A A A A A A A A	= = = =	<ul> <li> <sup>1</sup>/<sub>2</sub> Zavija     </li> <li> <sup>1</sup>/<sub>2</sub> Zavija     </li> <li> <sup>1</sup>/<sub>2</sub> Zavija     </li> <li> <sup>1</sup>/<sub>2</sub> Scali w     </li> <li> <sup>1</sup>/<sub>2</sub></li></ul>	tekst ysrodkuj ~ F Description RunNumber 16 16 16 Maximum	Tekstowe  Tekstowe  G  G  Date Created 28.01.2025 10:26:08,1  Test properties-DUT  Description
Within Wything Withing Committee Schowerk Si Rear Name LogFile_2025-01-28-10-26-08 Group Test Information Log Test Information Log Channel Events time Events Log Channel	Aptos Narrow B I U B Title Channels 2 111 Datatype DT_DATE DT_STRING Datatype	v 11 v Cacdonka C Author Description Unit	Date/Time 28:01:2025 ProductNar FlexLogger Length	E = = ⇒ ⇒ = = = = = D D 210:26:08,692 AM mme 1 1	E Zavijiji Scali iv     E     Groups     Zovi Virtuanie     Product/Version     2024 Q1     Minimum     Minimum	tekst ps/strodkuj * rs P Description RunNumber 16 16 Maximum Maximum	Tekstowe Tekstowe Itabs G Date_Created 28.01.2025 10:26:08,1 Test_properties-DUT Description Description
Weig Wytnij □ Kopij → Sthowek rs Sthowek rs Root Name LogFile_2025.01.28-10-26-08 Group Test Information Log Test Information Channel Keetl PCB X	Aptos Narrow B I U B Title Channels 2 111 Datatype DT_DATE DT_STRING Datatype DT_DOUBLE	v   11 v v   22 v ccccionka C Author Description Unit Unit g	A A Date/Time 28.01.2025 ProductNat FlexLogger Length	= = = ≫ = = = = = D 10:26:08,692 AM me 1 1141750	E Zavijaj     Scali uv Wyrównanie     E     Groups     Zovijaj     Zovijaj     Zavijaj     Zavijaj     Zizijaj     Zizij	tekst ydrodkuj - F Description RunNumber 16 16 Maximum 0,47485922	Tekstowe  Tekstowe  G  G  Date Created 28.01.2025 10:26:08,1  Test_properties-DUT  Description
Weig Wytruj Weig Chapij ~ Malarz formatów Schowek 5 221 ~ I ~ I ~ Gr A Root Name LogFile_2025-01-28-10-26-08 Group Test Information Log Test Information Log Channel Events Log Channel Accel PCB X Accel PCB X	Aptos Narrow B I U B Title Channels 2 111 Datatype DT_DATE DT_DOUBLE DT_DOUBLE	v 11 v Caccionka C Author Description Unit g	Date/Time 28.01.2025 ProductNar FlexLogger FlexLogger Length	= = = ⇒ ⇒ = = = = = = = = = = = = = = = = = =	E Zavijaj     E Scali w Wytównanie      E Groups     Z     Zovy     Zovy     Z     Z     Zovy     Z     Zovy     Z	tekst ydradkuj - ps ps ps ps ps ps ps ps ps ps	Tekstowe  G G Date_Created 28.01.2025 10:26:08,1  Description  Description
Musique Mystraj Musique Malarz formatów Softwerk rs Root Name Log File 2025 01:28-10-26-08 Group Test Information Channel Events Log Chanel Accel PCB X Accel PCB X	Aptos Narrow B I U B Title Channels Channels DT_DATE DT_DATE DT_STRING Datatype DT_DOUBLE DT_DOUBLE DT_DOUBLE DT_DOUBLE	v 11 v Czcionka Czcionka Description Unit S S	A A Date/Time 28.01.2025 ProductNar FlexLogger Length	E = :	E Zavijaj     Scali u     Wyrównanie     E     Groups     Zovi u     Zviła u     Zvił	tekst ydrodkuj - rs P Description RunNumber 16 16 Maximum 0,437485922 0,438694627	Telstowe  Egg - % 000 % 2 Juccba  G Date Created 28.01.2025 10:26:08,1  Test_properties-DUT  Description
Wytny     Wytny     Wieg     Kotowet     G     Stowet	Aptos Narrow B I U B I U B Title Channels 2 111 Datatype DT_DATE DT_STRING Datatype DT_DOUBLE	v 11 v Ccccionka C Author Description Unit S S S V	Date/Time 28:01:2025 ProductNar FlexLogger Length	E = : : : : : : : : : : : : : : : : : :	Careging	tekst ydradkuj - ps pscription RunNumber 16 16 Maximum 0.3474859222 0.42542542 2.3330415592	Tekstowe  G G G Date_Created 28.01.2025 10:26:08,J Test_properties=DUT  Description
Weig Cheopia → Schowetk to Schowetk to A Root Name LogFile_2025-01-28-00-26-08 Group Test Information Log Channel Events Log Channel Events Log Channel Events Log Channel Events Log Channel Events A Root Name Log Channel Events Log Channel Events Log Channel Events Log Channel Events A Root Name Log Channel Events Log Channel Events Chanel Cha	Aptos Narrow B I U B Fitte Channels Channels Channels DT_DATE DT_DATE DT_DOUBLE DT_DOU	v  11 C Czcionka C Cuthor Description Unit S S S V V V	Date/Time 28.01.2025 ProductNar FlexLogger Length	= =		tekst         -           ysradbaj         -           rs         -           Description         -           RunNumber         -           16         -           0,437485922         0,43894627           0,43248594627         0,43894427           0,43248594627         0,43894627           0,045394184         2,63394156	Telstowe  Telstowe  Telstowe  Telstowe  G  Date Created 28.01.9025 10:26:08,1  Test_properties-DUT  Description  Description
Wytny     W	Aptos Narrow B I U B I U B Title Channels Channels DT_DATE DT_STRING DT_DOUBLE DT_DOUB	v)[11      v)      v      v      v      v      v      v      v      v      v      v      v     v     v     v     v     v     v     v     v	Date/Time 28.01.2025 ProductNar FlexLogger Length	Ξ Ξ Ξ →	() () () () () () () () () () () ()	tekst         -           y/rodkaj         -           rs         -           Description         -           RunNumber         -           16         -           9         -           10         -	Tekstowe  G G G Date_Created 28.01.2025 10:26:08,J Test_properties=DUT  Description
Weig Wytruj Di Kopij ~ Sthowetk to Sthowetk to Root Name Log File 2025 01:28-10-28-08 Group Test Information Coannel Events Log Channel Accel PCB X Accel PCB X	Aptos Narrow B I U B Fite Channets Channets DT_DATE DT_DATE DT_DATE DT_DOUBLE DT_DOUBL	v  11 v   ⊞ v   ▲ Czcionka Czcionka Description Unit g g g v V v V P=	Date/Time 28.01.2025 ProductNar FlexLogger Length	= =		tekst         -           ydrodkuj         -           rs         -           Description         -           RunNumber         -           16         -           0,437485922         0,438946592           0,437485924         0,438946592           0,04539413         0,053394135           0,05339413         0,053394135	Telstove Telstove
Wing Wyting Chronig	Aptos Narrow B I U B I U B I I B I Channels Channels Channels DT_DATE DT_STRING DT_DOUBLE DT_DOU	v) 11 v v 11 v v v v v v v v v v v v v v v	Date/Time 28.01.2025 ProductNar FlexLogger Length	E = : : : : : : : : : : : : : : : : : :	() () () () () () () () () () () ()	telst         -           y/rodkaj         -           rs         -           Description         -           RunNumber         -           16         -           Maximum         -           0.347455522         -           0.436563427         -           0.436563427         -           0.436563427         -           0.436563427         -           0.43653427         -           0.43653427         -           0.43653427         -           0.43653427         -           0.43653427         -           0.43653427         -           0.43653427         -           0.43653427         -           0.43653427         -           0.43653427         -           0.43653427         -           0.43653427         -           0.43653427         -           0.43653427         -           0.43653427         -           0.43653427         -           1.11         -           1.11         -           1.11         -           0.436534287	Tekstowe  Ele + % 00 + d =  Liczba  G  Date_Created 28.01.2025 10:26:08.J  Test_properties=DUT  Description  Description
Weig Wytnij Chopij ~ Schowetk ts Root Name LogFile 2025-01-28-00-26-09 Group Test Information Log Channel Log Channel Accel PCB X Accel	Aptos Narrow B I U B Title Channets 2 2 1 11 Datatype DT_DATE DT_DOUBLE DT_DOUBLE DT_DOUBLE DT_DOUBLE DT_DOUBLE DT_DOUBLE DT_DOUBLE DT_DOUBLE	v 111 v 111 v 2 v 111 v 2 Cccionka Cccionka Description Unit g g g v V V V Pa V	Date/Time 28.01.2025 ProductNar FlexLogger Length	= =		tekst yfrodkaj - 5 F Description RunNumber 16 16 Maximum 0.34748525 0.438694627 0.4254265 0.4254565 0.42556565 0.42556565 0.42556565 0.42556565 0.42556565 0.4255656565 0.4255656565656565656565656565656565656565	Telstowe  Telstowe  Second Sec
Weig Wytnij Chopij ~ Schweit 65 K21 ~ I × Fr Root Name Logfile 2025-01-28-10-26-08 Group Test Information Channel Events Log Channel Events Log Channel Accel POB X Accel POB X Accel POB X Accel POB X Accel POB X Maccil Edit X Channel Maccil POB X Maccil POB X Maccil POB X Maccil POB X Maccil POB X Maccil POB X Mic Letterst Distantial	Aptos Narrow B I U B Title Channels 2 111 Datatype DT_DATE DT_DATE DT_DATE DT_DATE DT_DATE DT_DATE DT_DATE DT_DOUBLE DT_DOUBLE DT_DOUBLE DT_DOUBLE DT_DOUBLE DT_DOUBLE DT_DOUBLE DT_DOUBLE DT_DOUBLE	v  11 v   ⊥ v   ▲ Cccionka Cathor Description Unit g g v V V A Pa V V	Date/Time 28.01.2025 ProductNar FlexLogger Length	E = : : : : : : : : : : : : : : : : : :	() 22/20/06/20     () 22/20     () 22/20     () 22	Lekst ydradkaj - F Description RunNumber 16 Maximum 0.347485922 0.43869427 0.94346562 0.0438534413 0.043854413 0.045854413 0.04585454545454545454545454545455545555455555	Tekstowe  Ele + % 00 + d = Liczba  G  Date_Created 28.01.2025 10:26:08.J  Test_properties=DUT  Description  Description
Wong Wong Wong Wong Wong Wong Wong Wong	Aptos Narrow B I U B Trite Channels 2 111 Datatype DT_DATE DT_STRING DT_STRING DT_DOUBLE DT_DOUBLE DT_DOUBLE DT_DOUBLE DT_DOUBLE DT_DOUBLE DT_DOUBLE DT_DOUBLE DT_DOUBLE DT_DOUBLE DT_DOUBLE DT_DOUBLE DT_DOUBLE DT_DOUBLE	v)[11	Date/Time 28.01.2025 ProductNar FlexLogger Length	= =		tekst yfrodkaj ~ 5 F Description RunNumber 16 16 Maximum 0.34746525 0.438654627 0.3424133 0.025322413 0.035212522413 0.035212525 0.035212525 0.03521252 0.0352125 0.0352125 0.0352125 0.0352125 0.0352125 0.0352125 0.0352125 0.0352125 0.0352125 0.035215 0.03515 0.035215 0.035215 0.03515	Telstowe  Telstowe  Second Sec

Rys7. 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 Matlaba. 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. sygnały dla optymalnych parametrów Rejestrowano generowano zakłócenia postaci procesu jak i w 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 zarejestrownego 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 svstemu 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-RPJ. 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, F-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-Minchero M., Cobo A., Lopez-Higuera J.M., Mirapeix J., On-line monitoring and defect detection of arcwelding 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