

# Inteligentne monitorowanie procesów spawania przy użyciu sygnałów wibroakustycznych



Politechnika Śląska

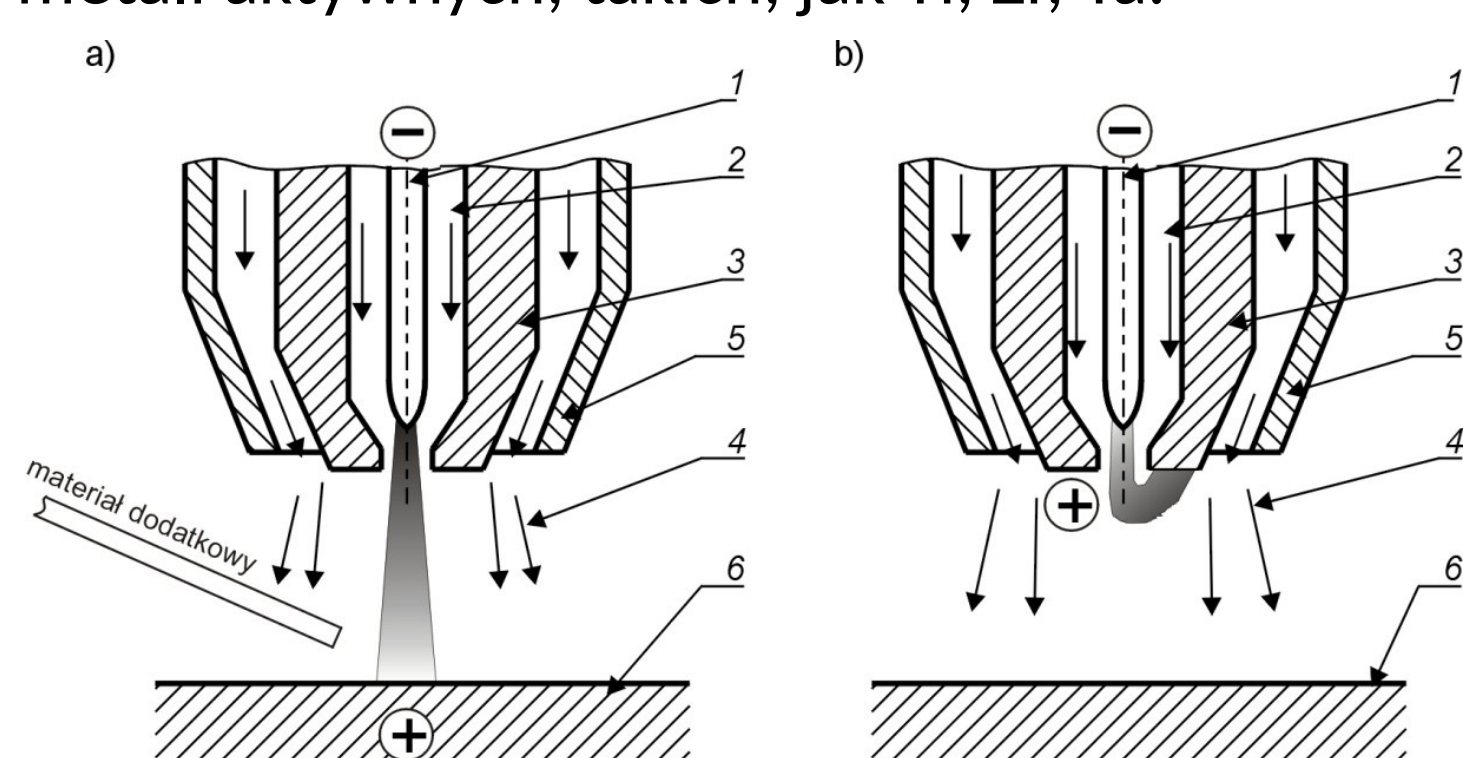
Dariusz Bismor, Roman Wyżgolik, Andrzej Klimpel

Silesian University of Technology, Poland

Przemysł stalowy jest jedną z najważniejszych gałęzi przemysłu, które wpływają bezpośrednio na nasze życie, w tym na aspekty tak ważne, jak budownictwo, produkcję samochodów, statków, rurociągów, turbin wiatrowych, itd. Jako że przemysł stalowy jest odpowiedzialny za około 8% globalnego zapotrzebowania na energię i około 7% globalnej produkcji CO<sub>2</sub>, innowacje wpływające na efektywność produkcji artykułów stalowych mają duży wpływ na emisję gazów cieplarnianych. Jednym z najistotniejszych procesów wykorzystywanych w przemyśle stalowym jest proces spawania. W ostatnim półwieczu widoczny jest ogromny postęp technologiczny dotyczący tego procesu, polegający na zastosowaniu źródeł ciepła o wysokiej gęstości (takich jak plazma i lasery), robotyzacji samego procesu oraz zastosowaniu zaawansowanych technik monitorowania i sterowania procesem spawania. Celem pracy jest przedstawienie koncepcji systemu monitorowania jednego z najbardziej zaawansowanych procesów spawania, jakim jest spawanie hybrydowe, które wykorzystuje dwa źródła ciepła: palnik plazmowy oraz palnik MAG (ang. metal active gas). Zadaniem systemu monitorowania jest zapewnienie odpowiedniej jakości procesu spawania i sygnalizowanie sytuacji, w których mogą pojawić się niedoskonałości spawanego złącza. Budowany system, będący w obecnej chwili w fazie rozwojowej, jest systemem wieloczułkowym, opartym w większości o pomiary wibroakustyczne.

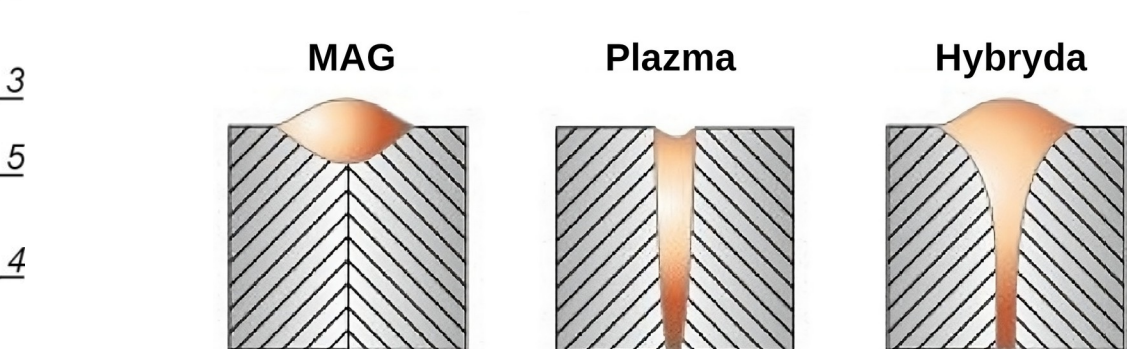
## Proces spawania plazmowego i hybrydowego

Zapewnienie wysokiej jakości połączeń spawanych, zwłaszcza w przypadku łączenia nowoczesnych metali i stopów konstrukcyjnych wymaga zastosowania zaawansowanych procesów spawania, jak spawanie plazmowe PTA i hybrydowe. Te typy spawania stosuje się do łączenia stali nisko- i wysokostopowych, stali o wysokiej wytrzymałości (UJHSS), a także stopów aluminium, magnezu, tytanu, niklu, berylu czy metali aktywnych, takich, jak Ti, Zr, Ta.

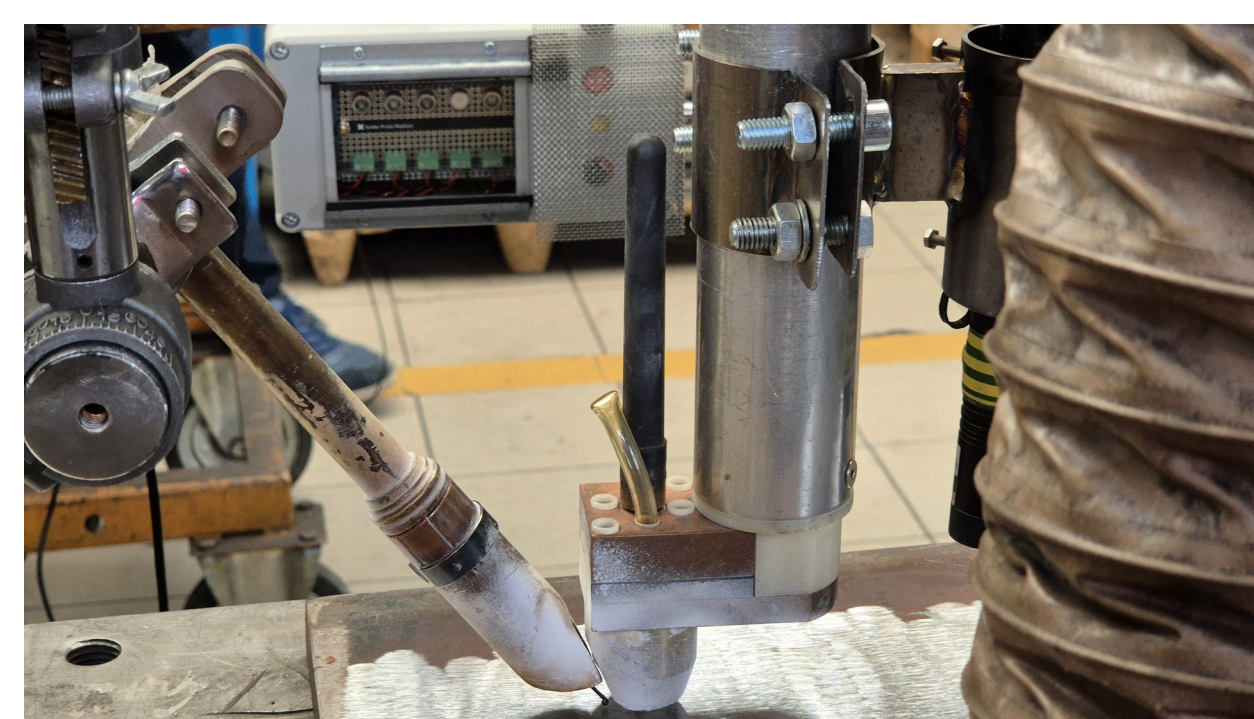


Rys. 1. Schemat procesów spawania plazmowego [1]: a) - łukiem zależnym - PTA, b) - łukiem niezależnym - PNA; 1 - elektroda wolframowa, 2 - gaz plazmowy, 3 - dysza zawężająca gaz plazmowy, 4 - gaz ochronny (osłonowy), 5 - dysza gazu ochronnego, 6 - materiał spawany.

Technologia spawania hybrydowego umożliwia uzyskanie większych głębokości przetopu oraz zwiększenie szybkości spawania dzięki synergii efektów płomienia plazmowego i łuku MAG. Dzięki temu możliwe jest spawanie stali o dużej wytrzymałości i grubości, np. stali X80 o grubości przekraczającej 20 mm.



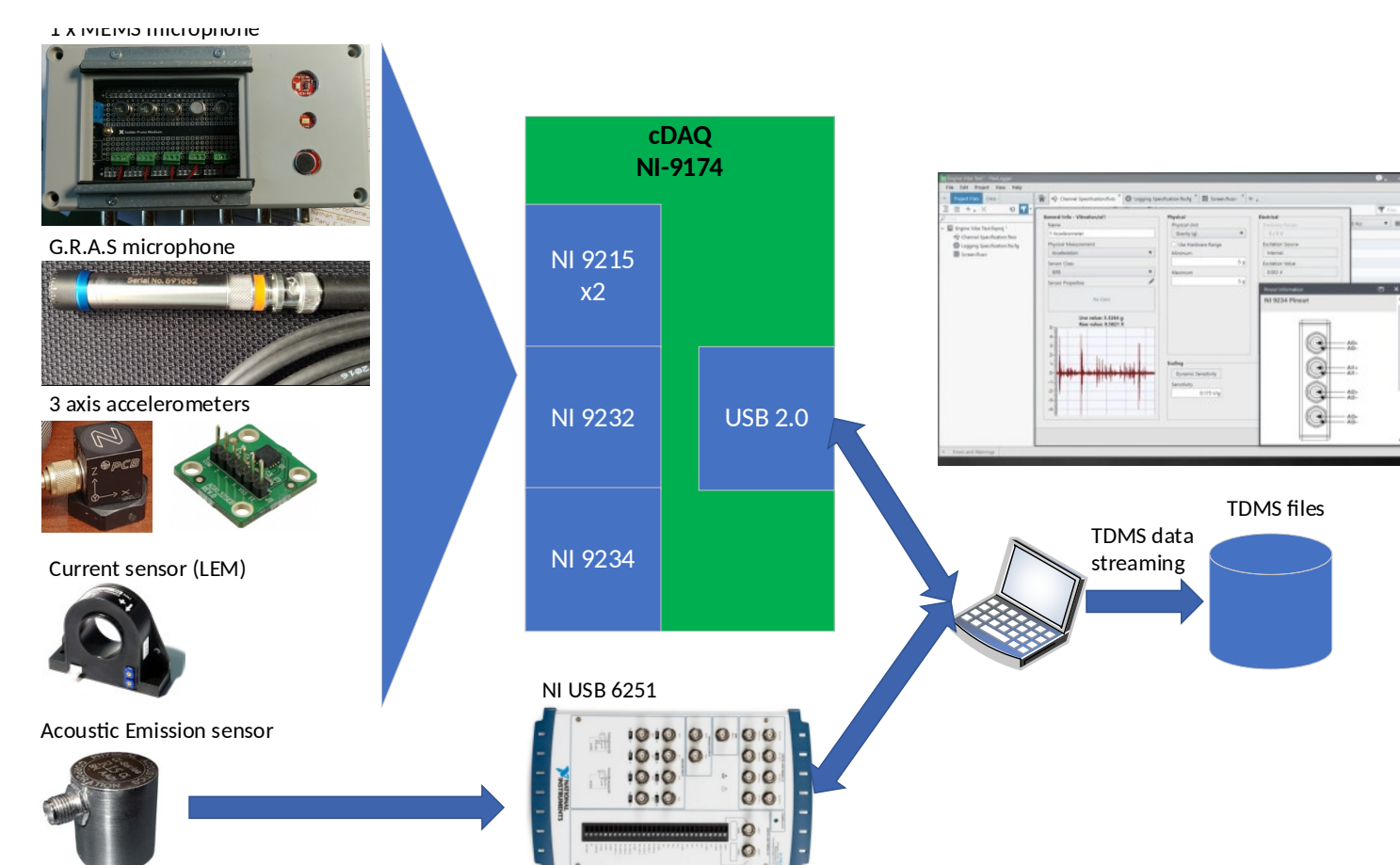
Rys. 2. Synergia spawania hybrydowego [2].



Rys. 3. Głowica do spawania hybrydowego: palnik MAG (po lewej) i plazmowy (po prawej).

## System pomiarowy do monitorowania jakości spawania

Na potrzeby badań zaprojektowany został system pomiarowy składający się z następujących czujników: mikrofony (mikrofon pomiarowy Gras, mikrofon elektretowy, mikrofon MEMS), akcelerometry (trójosiowy akcelerometr piezoelektryczny oraz akcelerometr MEMS ADXL386) fotodiody (UVA i UVV) oraz czujnik emisji akustycznej. Czujniki (z wyjątkiem czujnika EA) zostały podłączone do systemu cyfrowej akwizycji sygnałów NI-9174.

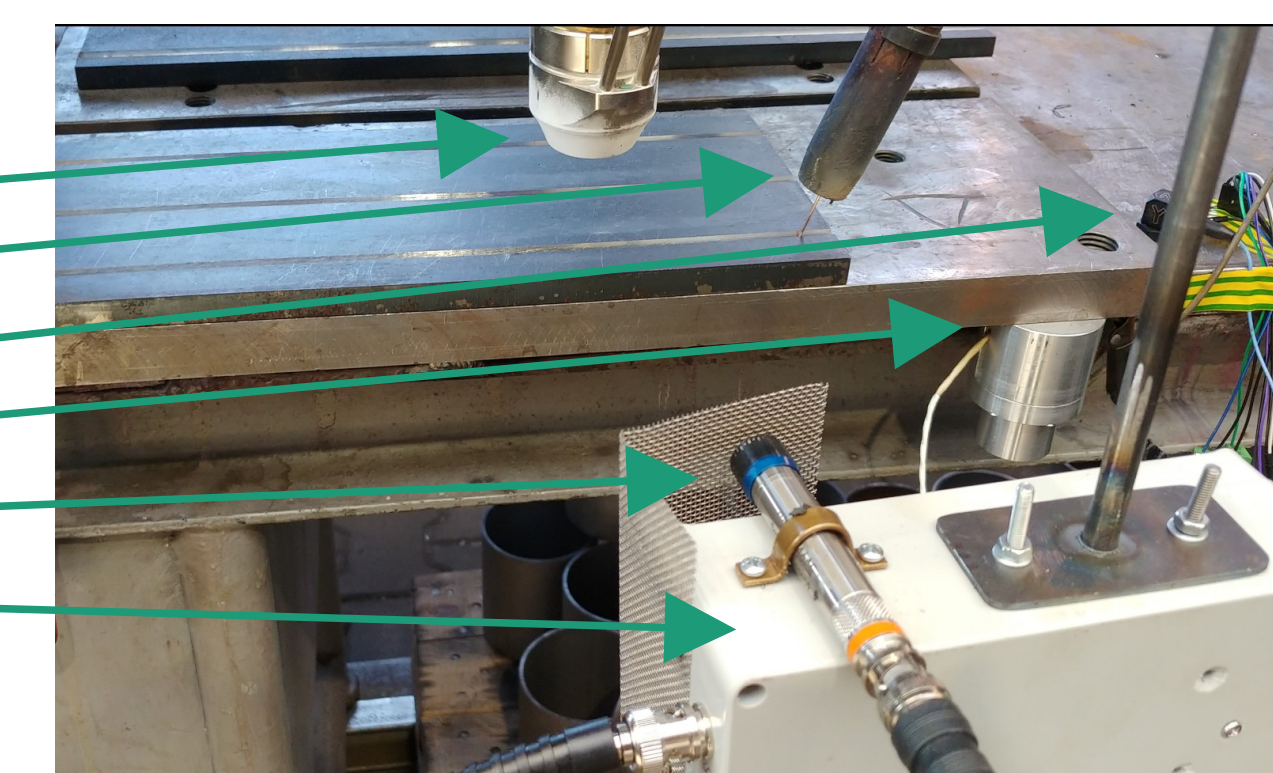


Rys. 4. Schemat układu akwizycji sygnałów.

- Dysza plazmowa
- Dysza MAG
- Akcelerometry
- Czujnik EA
- Mikrofon Gras
- Skrzynka z czujnikami



Rys. 5. Skrzynka z czujnikami.

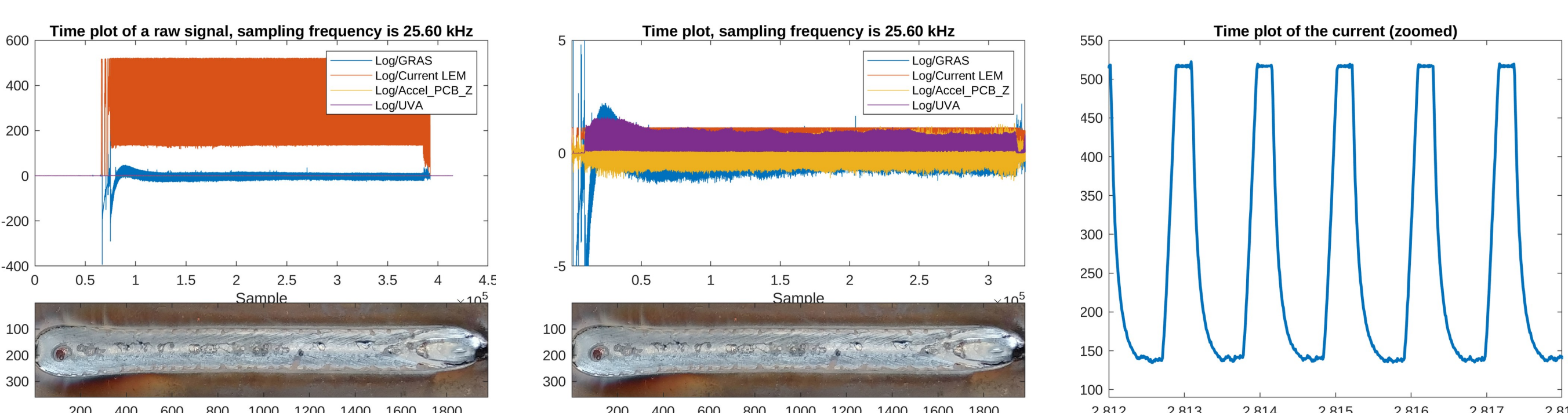


Rys. 6. Widok stanowiska pomiarowego

## Wstępne przetwarzanie sygnałów

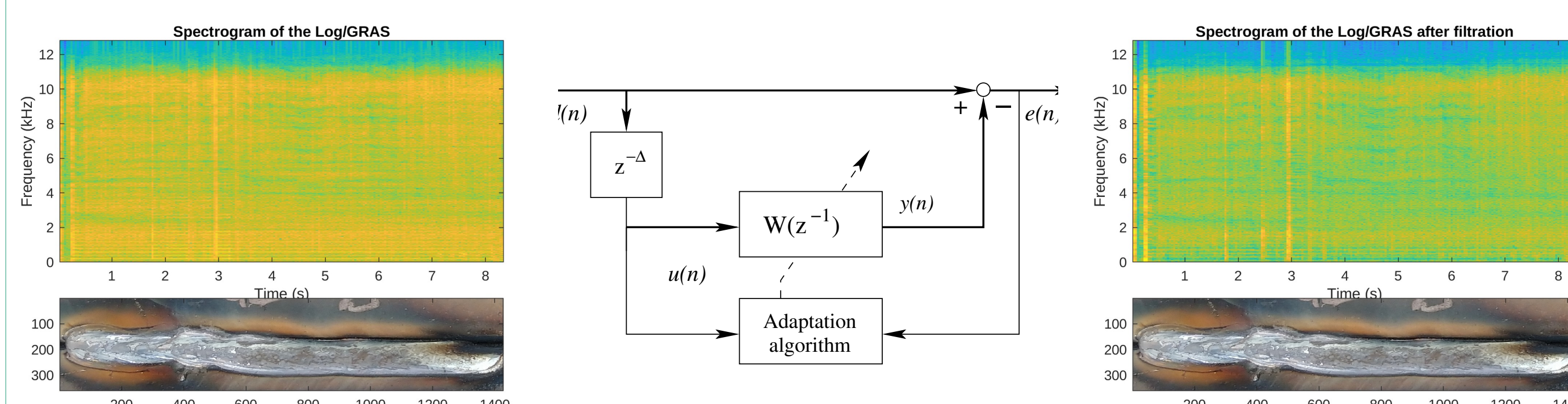
Wstępne przetwarzanie obejmuje:

- wyrównywanie amplitud sygnałów,
- progowanie celem wykrycia rozpoczęcia spawania,
- usuwanie składowych sinusoidalnych związanych z pulsującym prądem spawania.



Rys. 7. Kolejne etapy przetwarzania wstępnego: sygnały nieprzetworzone, po wyrównaniu amplitud i prąd w powiększeniu.

## Adaptive Line Enhancer

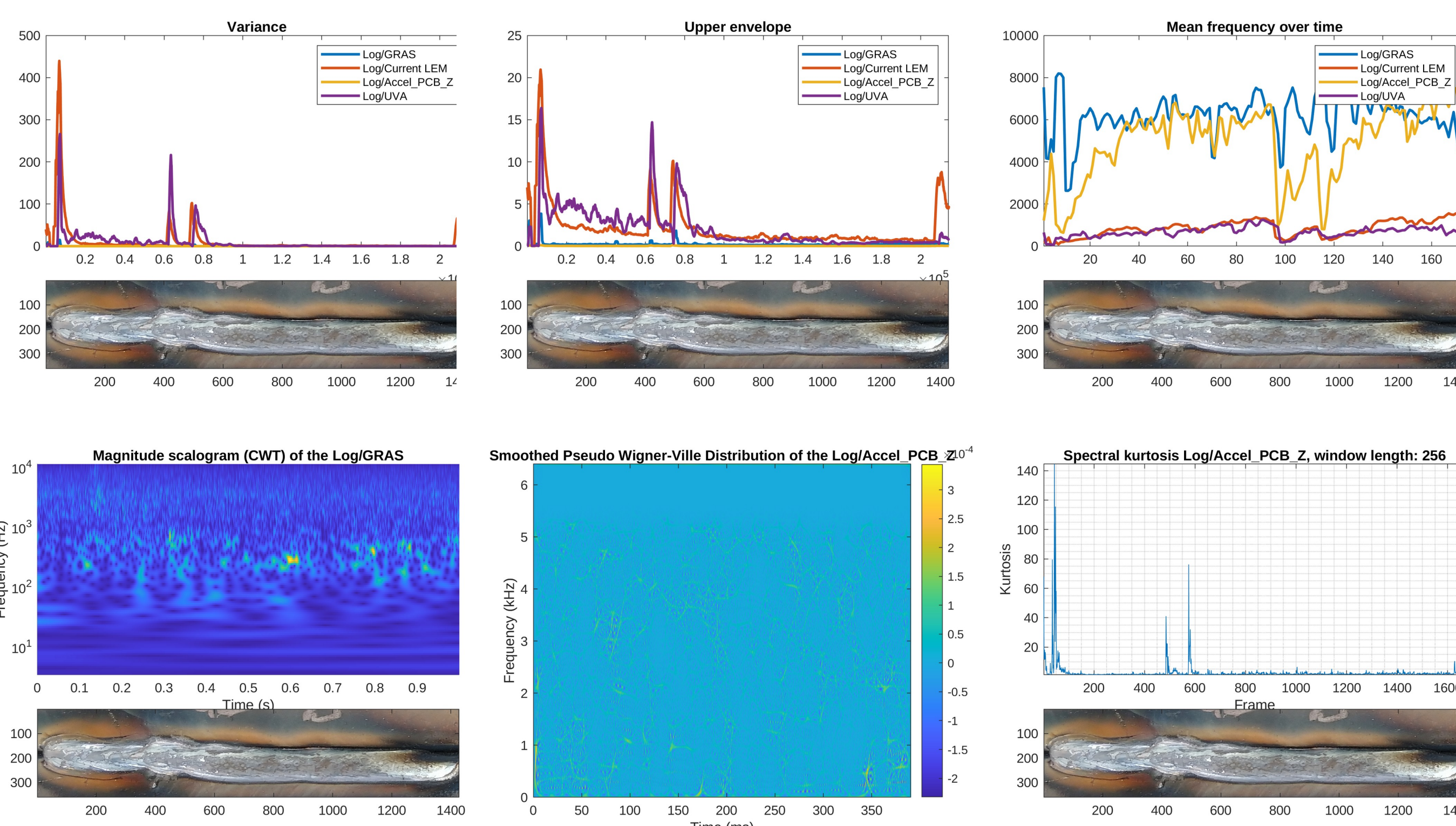


Rys. 8. Usuwanie składowych harmonicznych pochodzących od pulsacji prądu za pomocą układu ALE.

## Wybór cech sygnałów

Na potrzeby kontroli jakości procesu spawania wstępnie wybrano następujące cechy:

- amplituda lub RMS,
- wartość średnia,
- wariancja,
- wartość maksymalna,
- wartość minimalna,
- prążki krótkookresowej transformaty Fouriera,
- częstotliwość dominująca,
- centroid spektralny,
- obwiednia i spektrum obwiedni sygnału,
- Cepstrum,
- kurtoza, skośność,
- kurtoza spektralna,
- transformata Wignera-Ville'a,
- transformata falkowa,
- transformaty EMD, EEMD, VMD
- korelacje wzajemne pomiędzy sygnałami.



Rys. 9. Wybrane cechy przetwarzanych sygnałów.

[1] A. Klimpel: *Analiza procesu spawania plazmowego*. Stal Metale & Nowe Technologie, marzec-kwiecień 2024. [2] B. Acherjee: *Hybrid laser arc welding: State-of-art review*. Optics and Laser Technology 99 (2018), 60-71. DOI: 10.1016/j.optlastec.2017.09.038.

INFORMACJA PRAWNA



Projekt otrzymał dofinansowanie z Funduszu Badawczego Węgla i Stali Unii Europejskiej w ramach umowy grantowej nr 101112414. Zastrzeżenie: Wyłączną odpowiedzialność za wszelkie błędy lub pominięcia ponosi redaktor. Treść niekoniecznie odzwierciedla stanowisko Komisji Europejskiej. Komisja Europejska nie ponosi również odpowiedzialności za jakiegokolwiek wykorzystanie informacji zawartych w niniejszym dokumencie.



Konsorcjum projektowe SMARTWELD



Research Fund for Coal & Steel