

DOI: <https://doi.org/10.26628/simp.wtr.v96.1183.107-116>

Original Article

Modeling and measurements of temperature field in the arc welding and hybrid plasma-MAG welding heat source models

Modelowanie i pomiary temperatury w procesach spawania łukowego oraz hybrydowego plazma+MAG

Damian Rochalski¹, Dariusz Golański^{1,*}, Jacek Szulc², Przemysław Połaski¹

¹ Zakład Inżynierii Spajania, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Warszawska, Narbutta 85, 02-524 Warszawa, Polska; przemyslaw.polaski@pw.edu.pl

² Supra Elco Sp. z o.o.; jacek.szulc@supraelco.waw.pl

* Correspondence: dariusz.golanski@pw.edu.pl

Received: 01.11.2023; Accepted: 01.01.2024; Published: 01.01.2024

Abstract: The modelling of welding processes has recently become one of the most important tools to support the experimental research and the production implementation of welding processes. The literature is very rich in publications containing elements of single source modelling of welding processes, but the growing industrial interest in the use of hybrid welding sources creates a new field for the study of these processes using numerical simulations. In the present study, an attempt has been made to create a conventional and hybrid heat source in a software dedicated to performing numerical simulations using the FEA method - LUSAS FEA 14.7. As a result of the study, based on studies of the temperature field and thermal cycle of welding, it was possible to verify the classical Goldak model. Furthermore, the study showed that the proposed hybrid heat source model fairly well reflects the temperature distribution changes in hybrid welding.

Keywords: numerical modeling; FEA, hybrid, plasma, MAG; heat source

Streszczenie: Modelowanie procesów spawania stało się w ostatnim czasie jednym z głównym narzędzi wspomagających badania eksperymentalne oraz wdrożenia produkcyjne procesów spawania. Literatura jest bardzo bogata w publikacje zawierające elementy modelowania jedno-źródłowych procesów spawania, jednak rosnące zainteresowanie przemysłu stosowaniem spawalniczych źródeł hybrydowych stwarza nowe pole do badań tych procesów z zastosowaniem symulacji numerycznych. W niniejszej pracy podjęto próbę stworzenia konwencjonalnego i hybrydowego źródła ciepła w oprogramowaniu dedykowanym do wykonywania symulacji numerycznych metodą MES – LUSAS FEA 14.7. W wyniku przeprowadzonych badań udało się zweryfikować klasyczny model Goldaka na podstawie badań pola temperatury oraz cyklu cieplnego spawania. Ponadto, badania wykazały, że zaproponowany model hybrydowego źródła ciepła, w dość dobrym stopniu odzwierciedla zmiany rozkład temperatury przy spawaniu hybrydowym.

Słowa kluczowe: modelowanie numeryczne; MES; hybryda; plazma; MAG; źródło ciepła

Wstęp

Bardzo ważnym zagadnieniem podczas modelowania numerycznego procesów spawania jest dobór odpowiedniego modelu źródła ciepła. To ono w głównym stopniu decyduje o powstającym polu temperatury, które wpływa na szereg czynników decydujących o jakości otrzymanego złącza. W literaturze można spotkać wiele różnych modeli źródeł ciepła, których prawidłowy dobór jest niezbędny do poprawnej analizy. W artykule przedstawiono modelowanie numeryczne dwóch procesów spawania: spawanie konwencjonalne metodą MAG z użyciem modelu Goldaka oraz spawanie hybrydowe plazma + MAG z wykorzystaniem zaproponowanego modelu hybrydowego. Ich weryfikacja została przeprowadzona w oparciu o wykonane badania pola temperatury, które pozwoliły również pokazać problemy związane z pomiarem temperatury w trakcie procesu spawania.

Obecnie najczęściej wykorzystywanym modelem spawalniczego źródła ciepła jest model Goldaka, który jest stosowany zazwyczaj podczas modelowania konwencjonalnych procesów spawania takich jak spawanie elektrodą otuloną czy też MAG. Niemniej jednak rozwój innowacyjnych metod spawania wymusza poszukiwanie nowych

modeli źródeł ciepła. Jedną z takich metod jest spawanie hybrydowe, czyli takie w którym źródło ciepła tworzą dwa połączone ze sobą źródła np. wiązka lasera + klasyczny łuk elektryczny (metoda MAG), lub strumień plazmy + klasyczny łuk elektryczny (MAG). Modelowanie zagadnień związanych ze spawaniem hybrydowym (plazma+MAG) wciąż stanowi duże wyzwanie, ponieważ brak jest opisu spawalniczych źródeł ciepła możliwych do zastosowania w tego typu procesach hybrydowych. Z tego też względu podjęcie próby zbudowania i opisu modelu źródła ciepła przy spawaniu hybrydowym jest obecnie ważnym i aktualnym zagadnieniem badawczym.

Nieustanny rozwój przemysłu, który można zauważyć na przestrzeni ostatnich lat wymusza zastosowanie wysokowydajnych metod spawania opartych na technikach laserowych czy też plazmowych. Coraz częściej można zaobserwować wykorzystanie również procesów hybrydowych. Proces spawania hybrydowego Plazma + MAG wydaje się być dosyć mocną alternatywą do procesu hybrydowego opartego na laserze. Jego główną zaletą są znacznie niższe koszty zakupu oraz eksploatacji dedykowanych urządzeń przy zachowaniu podobnej wydajności. Występują w nim dwa łuki elektryczne. Pierwszy z nich to wysokoenergetyczna plazma, która ma za zadanie otworzyć kanał parowy. Energia plazmy jest na tyle duża, że część materiału zaczyna natychmiastowo odparowywać. Łuk plazmowy przekazuje ciepło do materiału głównie poprzez bombardowanie elektronami anody, a energię kinetyczną elektronów zmienia w energię cieplną na skutek zderzenia. Drugi zaś to klasyczny łuk MAG, który ma charakter przewodnościowy.

Materiały i metody

Założenia dla modelu numerycznego procesu spawania konwencjonalnego

Proces spawania metodą MAG jest obecnie najczęściej wykorzystywany w przemyśle. Wynika to przede wszystkim z możliwości jego bardzo łatwej automatyzacji, niskimi kosztami materiałów dodatkowych oraz mnogości dostępnych na rynku spawalniczych źródeł energii. Jest to proces, w którym łuk elektryczny jarzy się pomiędzy elektrodą topliwą a materiałem spawanym w osłonie gazów aktywnych. Modelowanie tego procesu jest szeroko stosowane i dość dobrze opisane w literaturze. Przeprowadzone badania z modelowania tego procesu oraz dokonane pomiary temperatury pozwoliły na zapoznanie się z tymi zagadnieniami oraz ocenę przydatności wykorzystanego oprogramowania i sposobu pomiaru temperatury do weryfikacji użytego modelu źródła ciepła.

W literaturze możemy znaleźć wiele różnych modeli źródeł ciepła. Ich mnogość wynika z dążenia badaczy do jak najlepszego odwzorowania rzeczywistości. Jednakże większość z nich jest zgodnych, że model zaproponowany przez Goldaka [1] jest najlepszym rozwiązaniem w przypadku modelowania procesów konwencjonalnych, ponieważ otrzymywane w ten sposób pole temperatury jest najbliższe rzeczywistości. Co więcej, jest on podstawowym modelem we wszystkich komercyjnych oprogramowaniach do analizy numerycznej procesów spawania.

Modelowanie spawalniczych źródeł ciepła zostało przeprowadzone w programie dedykowanym do wykonywania symulacji numerycznych metodą MES – LUSAS FEA 14.7. Jest to program ogólnego przeznaczenia, który w odróżnieniu do programów specjalistycznych np. SYSWELD czy też Simufact Welding ma pewne ograniczenia, jednak z drugiej strony umożliwia dowolne kształtowanie źródła ciepła, co jest bardzo ważne w przypadku modelowania nowych procesów spawania. Model Goldaka został zaimplementowany do oprogramowania na podstawie równań opisujących rozkład gęstości mocy w przedniej i tylnej ćwiartce elipsy [1]:

$$q_f(x, y, \xi) = \frac{6\sqrt{3}f_f Q}{abc_f \pi \sqrt{\pi}} \exp\left(\frac{-3x^2}{a^2}\right) \exp\left(\frac{-3y^2}{b^2}\right) \exp\left(\frac{-3\xi^2}{c_f^2}\right)$$

$$q_r(x, y, \xi) = \frac{6\sqrt{3}f_r Q}{abc_r \pi \sqrt{\pi}} \exp\left(\frac{-3x^2}{a^2}\right) \exp\left(\frac{-3y^2}{b^2}\right) \exp\left(\frac{-3\xi^2}{c_r^2}\right)$$

gdzie:

q_f – moc źródła ciepła na jednostkę objętości przed osią elektrody

q_r – moc źródła ciepła na jednostkę objętości za osią elektrody

$Q = \eta UI$ – całkowita moc źródła ciepła przy prądzie I , napięciu U

oraz współczynnika sprawności η

Do budowy modelu MES ze źródłem ciepła opisanym za pomocą modelu Goldaka przyjęto dwie płyty ze stali S235 spawane doczołowo o wymiarach 50x100x5 mm. Parametry spawania przedstawiono w Tab. 1.

Tabela 1 Parametry spawania metodą MAG

Table 1 MAG welding parameters

Prąd spawania [A]	Napięcie łuku [V]	Prędkość spawania [cm/min]	Szanowana sprawność η źródła
130	22	80	0,7

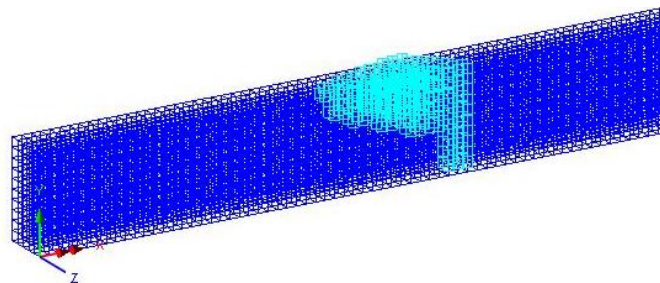
Obliczona całkowita wartość energii:

$$Q = \eta * I * U = 0,7 * 130 * 22 \approx 2000 \text{ [W]}.$$

Zastosowane parametry źródła ciepła opisujące model Goldaka zostały dobrane w oparciu o przeprowadzone badania doświadczalne procesu spawania MAG. W modelu wzięto również pod uwagę warunki brzegowe w postaci wymiany ciepła z otoczeniem na drodze konwekcji - w postaci studzenia nagrzanego płyty w powietrzu, a także przekazywanie ciepła od spodu do dolnej blachy, na której została zamocowana spawana płyta. Właściwości materiałowe takie jak współczynnik rozszerzalności cieplnej, przewodność cieplna, ciepło właściwe, modułu Younga, granica plastyczności przyjęto w funkcji temperatury na podstawie danych literaturowych [2].

Założenia dla modelu numerycznego procesu hybrydowego Plazma + MAG

Modele hybrydowe spawalniczego źródła ciepła pojawiły się w momencie powstania procesów spawania hybrydowego, do których należy zaliczyć przede wszystkim spawanie hybrydowe laser + MAG czy też plazma + MAG. W takiej kombinacji mamy do czynienia z równoczesnym oddziaływaniem klasycznego źródła ciepła (MAG) oraz skoncentrowanego źródła ciepła (laser, plazma), które nagrzewają materiał spawany [3][4]. W przedstawionej analizie zbudowano model hybrydowy źródła ciepła, który stanowi połączenie modelu Goldaka oraz modelu prostopadłościennego [5]. Istniejące dwa źródła ciepła w różny sposób przekazują energię, dlatego model również powinien to odzwierciedlać. W wyniku tego zaproponowano hybrydowy model wynikający z połączenia modelu Goldaka z modelem prostopadłościennym, który przybliży skoncentrowane źródło ciepła jakim jest wysokoenergetyczna plazma. (Rys. 1).



Rys. 1. Model hybrydowy źródła ciepła dla spawania plazma + MAG

Fig. 1. Hybrid heat source model for plasma + MAG welding

Model prostopadłościenny w odróżnieniu od modelu Goldaka jest modelem o jednorodnym rozkładzie. Parametry modelu hybrydowego oraz moc źródła ciepła zostały dobrane na podstawie przeprowadzonej próby doświadczalnej spawania hybrydowego stali S700MC. Dla lepszego zobrazowania efektu działania modelu hybrydowego zastosowano w nim blachy o grubości 10 mm.

Zastosowany model prostopadłościenny dla źródła opisującego strumień plazmy charakteryzuje się w odróżnieniu od modelu Goldaka jednorodnym rozkładem. Ma on kształt prostopadłościenu o wym. 2x2x10 mm, a więc oddziałuje na całej grubości spawanych płyt. Moc źródła plazmowego oraz źródła konwencjonalnego (opartego na modelu Goldaka) obliczona została na podstawie danych z Tab. 2.

Tabela 2 Parametry źródeł ciepła dla modelu hybrydowego Plazma + MAG

Table 2 Heat source parameters for the Plasma + MAG hybrid model

Rodzaj źródła ciepła	Prąd spawania [A]	Napięcie łuku [V]	Szanowana sprawność η źródła	Moc źródła ciepła [W]
Plazma	350	30	0,6	6300
MAG	369	29,3	0,8	8650

Konfiguracja stanowiska do prób spawania metodą MAG

Po przeprowadzonych analizach numerycznych przystąpiono do weryfikacji modelu i przyjętego modelu źródła ciepła Goldaka. Próby doświadczalne zostały przeprowadzone na stanowisku zrobotyzowanym, przystosowanym do spawania metodą MAG. Wykorzystano płyty próbne o wymiarach 100 mm x 100 mm i grubości 5 mm, wykonane ze stali S235.

Stanowisko zrobotyzowane do spawania metodą MAG przedstawiono na Rys. 2. Jest ono wyposażone w oprzyrządowanie pomiarowe służące do rejestracji temperatury podczas procesu spawania. Składa się ono z pirometru oraz odpowiedniego miernika, do którego są połączone termopary. Bardzo ważnym aspektem wpływającym na pomiar temperatury przy użyciu termopar jest sposób ich połączenia z materiałem badanym.

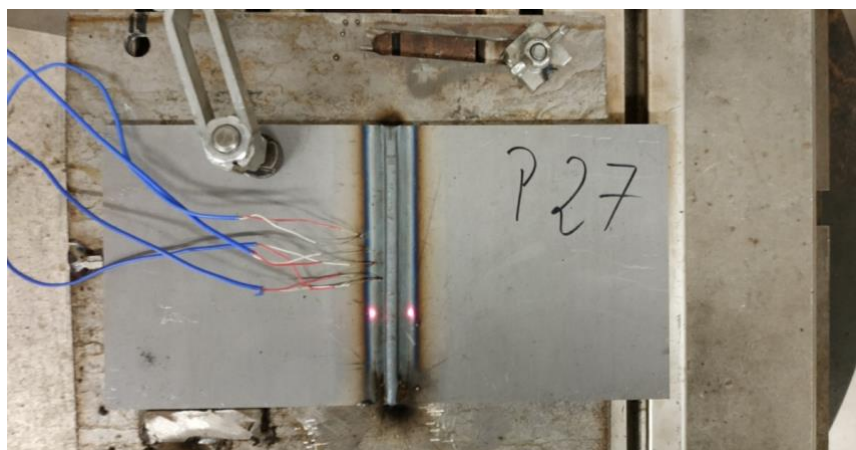
W pracy [6] autorzy wykazali, że wyższą zarejestrowaną temperaturę można otrzymać podczas zastosowania termopary powierzchniowej. Wynika to, że znacznie mniejszej objętości złącza termoparowego, co wpływa na mniejszą bezwładność pomiaru. W związku z tym w ramach badań wykorzystano również termopary powierzchniowe, które zostały przygrzane do spawanej płyty za pomocą mikrozgrzewarki.



Rys. 2. Stanowisko zrobotyzowane do spawanie metodą MAG

Fig. 2. Robotized station for MAG welding

Do badań temperatury wykorzystano termopary typu K o średnicy 0,4 mm oraz 1 mm. Zostały one połączone z miernikiem TM9017SD LUTRON. Na Rys. 3 widać przymocowane termopary oddalone od osi spoiny kolejno o 2 mm, 5 mm, 8 mm oraz 10 mm. Dodatkowo podczas badań rejestrowano temperaturę przy użyciu pirometru TP10, jednak uzyskane wyniki mają charakter jedynie poglądowy oraz są mniej miarodajne od pomiaru termoparowego, gdyż obszar, z którego zbierane są dane jest znacznie większy co powoduje ich uśrednienie. Dla zastosowanego pirometru obszar ten ma w przybliżeniu kształt koła o średnicy 18 mm. Dodatkowo konieczność wprowadzenia odpowiedniego współczynnika emisyjności oraz silne promieniowanie występujące podczas procesu spawania znacznie zwiększają niedokładność uzyskiwanych wyników w takim pomiarze.

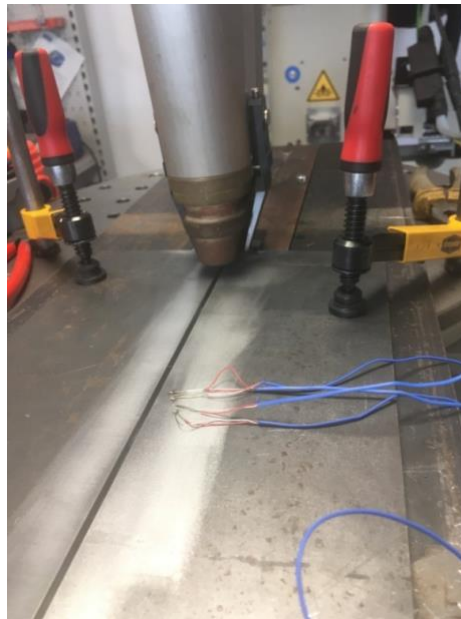


Rys. 3. Widok przymocowanych termopar do płyty próbnej po przeprowadzonej próbie spawania MAG

Fig. 3. View of the attached thermocouples to the test plate after the MAG welding test.

Konfiguracja stanowiska do prób spawania metodą MAG

Przeprowadzono próby doświadczalne dla procesu hybrydowego plazma+MAG również na stanowisku zrobotyzowanym z wykorzystaniem głowicy hybrydowej PLT Hybrid Super-MIG [7] oraz tych samych przyrządów pomiarowych jak w poprzednim doświadczeniu spawania konwencjonalnego MAG. Zamocowane blachy próbne w oprzyrządowaniu spawalniczym oraz termopary zostały przedstawione na Rys. 4.

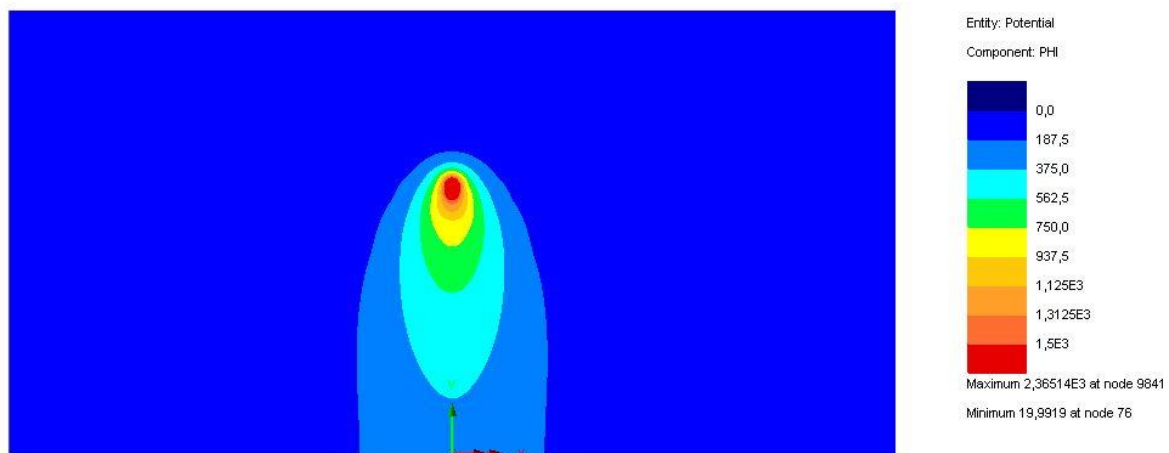


Rys. 4. Stanowisko do badań doświadczalnych procesu hybrydowego (Plazma + MAG)
 Fig. 4. Experimental test stand for hybrid process (Plasma + MAG)

Wyniki i dyskusja

Modelowanie numeryczne procesu konwencjonalnego MAG

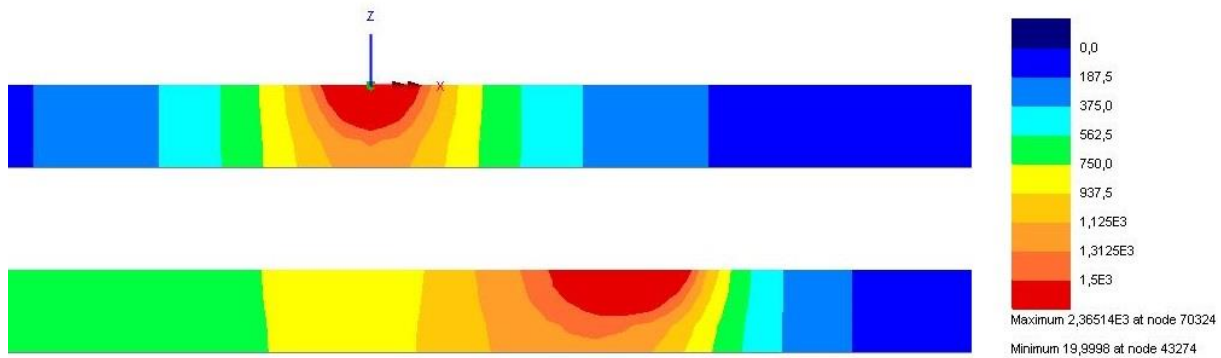
Parametry procesu podane w tabeli 1 oraz przyjęty model Goldaka opisujący spawalnicze źródło ciepła, były danymi wejściowymi do obliczenia rozkładu temperatury w określonym czasie w spawanym złączu doczołowym dwóch blach, który to rozkład przedstawiono na Rys. 5. Kolor czerwony obrazuje obszar występowania ciekłego jeziora. Różnice w zagęszczeniu izoterm wskazują na występowanie różnego gradientu temperatury, który jest większy przed źródłem ciepła niż za nim. Widoczny jest charakterystyczny „ogon”, za źródłem ciepła, którego położenie wynika z przyjętego kierunku spawania.



Rys. 5. Pole temperatury w wybranej chwili czasu dla modelu Goldaka
 Fig. 5. Temperature field at selected time instant for Goldak model)

Analizując pole temperatury w dwóch pokazanych przekrojach (Rys.6) można stwierdzić, że dla zamodelowanych parametrów spawania nie powinno być możliwe uzyskanie pełnego przetopu, ponieważ

energia liniowa jest na zbyt niskim poziomie, co również zostało stwierdzone w trakcie badań doświadczalnych. W przekroju wzdłużnym również można zaobserwować większy gradient temperatury przed ciekłym jeziorkiem niż za nim.

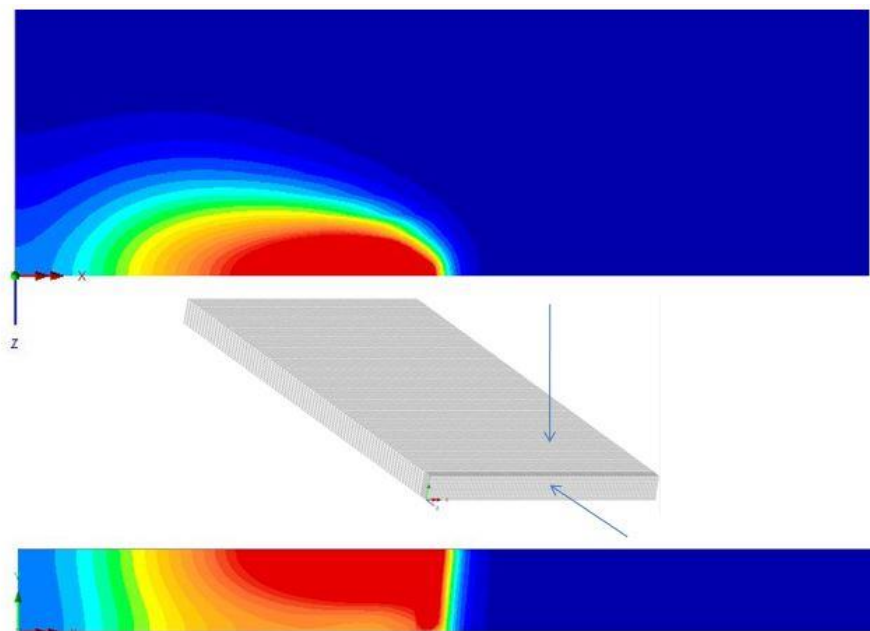


Rys. 6. Widok pola temperatury w przekroju poprzecznym (u góry) oraz przekroju wzdłużnym (na dole) dla modelu Goldaka

Fig. 6. View of temperature field in cross-section (top) and longitudinal section (bottom) for the Goldak model

Modelowanie numeryczne procesu hybrydowego Plazma + MAG

Wyniki przeprowadzonej analizy numerycznej w postaci pola temperatury podczas procesu spawania hybrydowego uzyskane w określonej chwili czasu przedstawiono na Rys. 7. Analizując przekrój wzdłużny przez spoinę (dolna części Rys. 7) wyraźnie widać, że w jej przedniej części obszar występowania ciekłego jeziorka występuje na całej grubości materiału, co może świadczyć o uzyskaniu pełnego przetopu i jest związane z działaniem silnie skoncentrowanego łuku plazmowego [8]. W miarę oddalania się od źródła plazmowego symulacja wskazuje znaczące zwężenie obszaru występowania najwyższej temperatury. Wynika to z tego, że na początku oddziałuje na materiał spawany łuk plazmowy, o dużej gęstości energii, a za nim podąża klasyczny łuk elektryczny [9] (o mniejszej koncentracji energii) jak przy spawaniu MAG. Oba łuki podążają równocześnie w pewnej niewielkiej odległości od siebie wynikającej z konstrukcji głowicy do spawania hybrydowego plazma + MAG [10], co zostało również uwzględnione w analizie numerycznej.



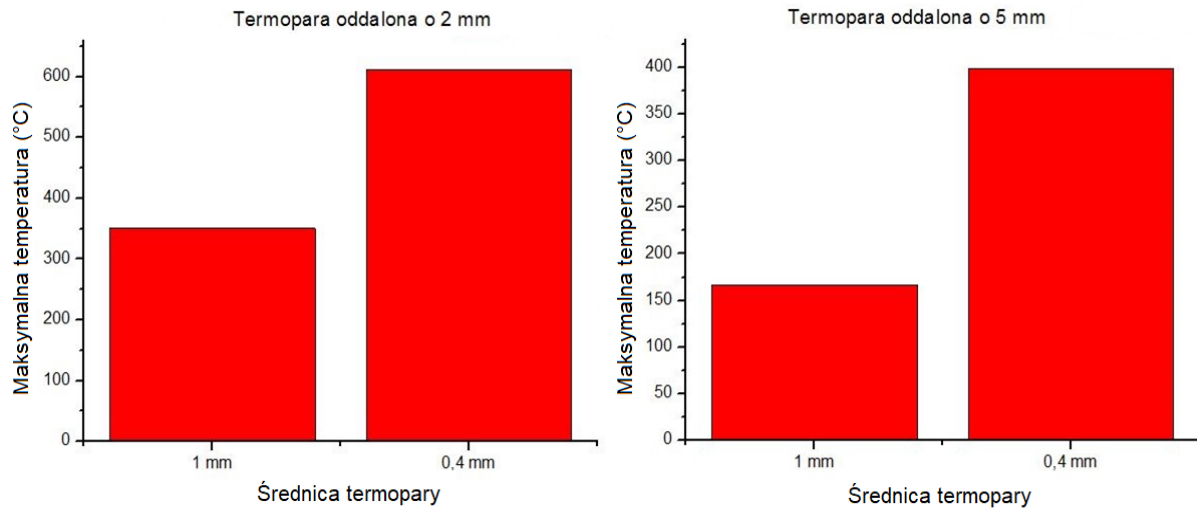
Rys. 7. Pole temperatury podczas procesu spawania hybrydowego

Fig. 7. Temperature field during hybrid welding process

Badania eksperymentalne

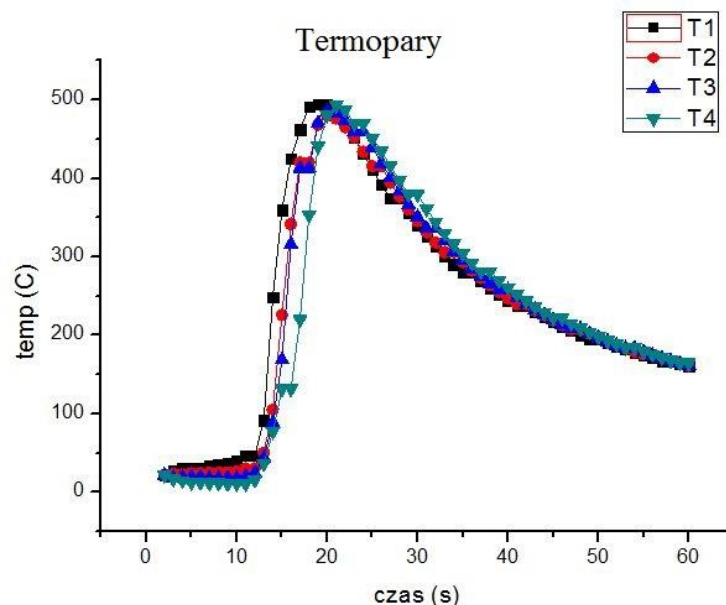
Pierwszym etapem badań polegało na scharakteryzowaniu oprzyrządowania do pomiarów temperatury. Badania przeprowadzono dla dwóch średnic termopar 0,4 mm oraz 1 mm. Wyniki umieszczone na rysunku 8 są zgodne z oczekiwaniami, większa średnica termoelementów powoduje powstanie złącza

termoparowego o większej objętości. W wyniku oddziaływania skoncentrowanego źródła ciepła, które przemieszcza się, złącze o większej objętości ma większą bezwładność cieplną i jego reakcja na szybkie zmiany temperatury jest znacznie opóźniona.



Rys. 8. Wykresy zależności pomiędzy średnicą termopary a maksymalną zarejestrowaną temperaturą
 Fig. 8. Graphs of the relationship between the diameter of the thermocouple and the maximum recorded temperature

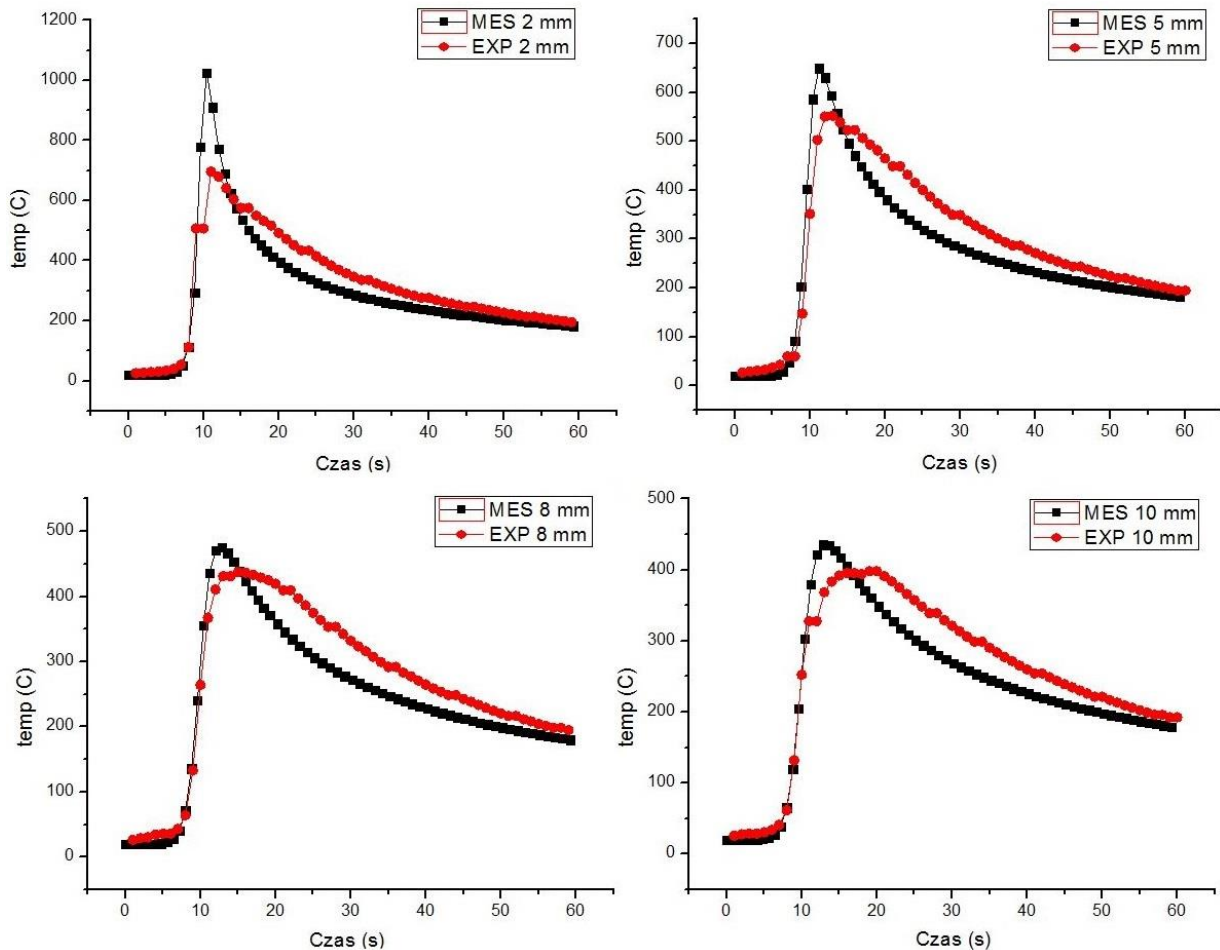
Na wiarygodność badań w dużym stopniu wpływa powtarzalność przeprowadzonych pomiarów. W związku z tym postanowiono wykonać doświadczenie mające na celu uzyskanie cykli cieplnych spawania dla 4 różnych punktów pomiarowych oddalonych od osi spoiny o tę samą odległość – 5 mm. Uzyskane wyniki zostały przedstawione na Rys. 9. Kształt wykresów oraz maksymalna zarejestrowana temperatura są niemal identyczne. Widać jedynie pewne ich przesunięcie w czasie, które wynika z pewnej odległości występującej pomiędzy położeniem punktów pomiarowych. Badania te dowodzą, że przyjęta metoda pomiaru temperatury z wykorzystaniem termoelementów odznacza się dużą powtarzalnością, co wpływa na miarodajność uzyskiwanych wyników.



Rys. 9. Cykl cieplny spawania dla 4 punktów pomiarowych
 Fig. 9. Welding thermal cycle for 4 measurement points

Weryfikacja modelu konwencjonalnego

Na podstawie przeprowadzonych badań doświadczalnych uzyskano cykle cieplne spawania dla wybranych punktów na powierzchni spawanych blach. Następnie dokonano ich porównania z wynikami uzyskanymi za pomocą modelowania MES na wspólnym wykresie (Rys. 10).



Rys. 10. Porównanie cykli cieplnych uzyskanych metodą MES oraz eksperymentalnie

Fig. 10. Comparison of thermal cycles obtained by FEM and experimentally

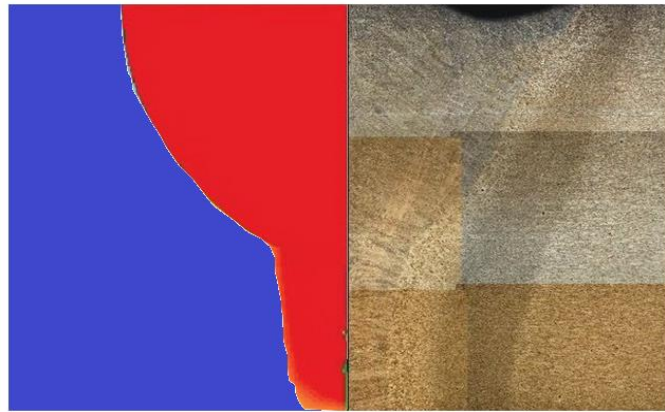
Na rys. 10 można zauważyć pewną korelację wskazującą, że profile zmian temperatury obrazujące szybkość nagrzewania oraz przebiegi studzenia są do siebie zbliżone. Co więcej dla punktów oddalonych od osi spoiny o 5, 8 i 10 mm także maksymalna uzyskana temperatura jest na podobnym poziomie. Jedynie dla punktu znajdującego się najbliżej osi spoin (2 mm) widoczna jest pewna rozbieżność w zakresie maksymalnej temperatury. Może to być spowodowane bezwładnością złącza termoparowego, gdyż wyższe temperatury wymagają dłuższego czasu potrzebnego do ich nagrzania. Nie mniej przeprowadzona weryfikacja modelu numerycznego potwierdza słuszność zastosowania modelu spawalniczego źródła ciepła Goldaka do analizy numerycznej procesu spawania łukowego MAG.

Weryfikacja modelu hybrydowego

Podczas modelowania procesów hybrydowych ważnym zagadnieniem jest porównanie uzyskanego kształtu spoiny. Wynika to z jej zazwyczaj nietypowego kształtu, który bardzo często przypomina kielich w związku z oddziaływaniem dwóch różnych źródeł ciepła: pierwszego łuku plazmowego generującego głębokie wtopienie oraz drugiego łuku klasycznego mającego za zadanie wypełnienie powstającego rowka i uformowanie lica [11]. Porównanie geometrii wykonanej spoiny hybrydowej z kształtem spoiny uzyskanym

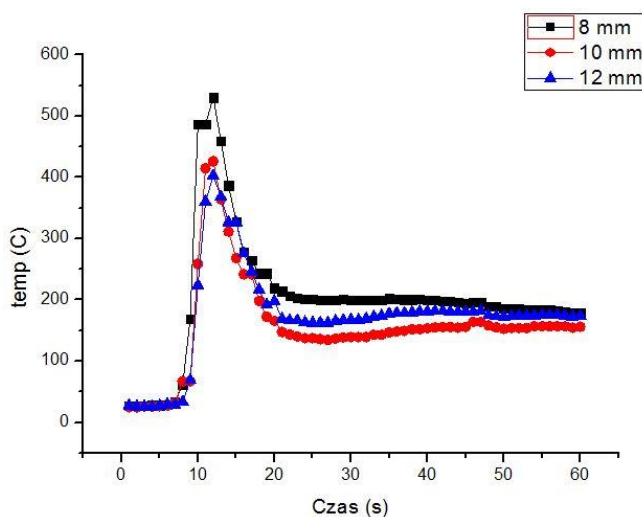
z modelowania numerycznego przedstawiono na Rys. 11. Kolor czerwony obrazuje obszar, w którym temperatura przekroczyła temperaturę topnienia materiału.

Należy zwrócić uwagę na bardzo duże podobieństwo uzyskanych spoin. Parametry takie jak szerokość spoiny w licu, grani i wysokość podstawy kielicha, które definiują jej kształt są niemal identyczne. Jest to jedna z pierwszych metod oceny dokładności zbudowanego modelu spawalniczego źródła ciepła, które ma decydujący wpływ na wielkość i rozkład pola temperatury w spawanych materiałach. Przedstawione bezpośrednie porównanie struktury przekroju złącza spawanego z tym, obliczonym numerycznie wskazuje, że zbudowany model hybrydowy plazma+MAG spawalniczego źródła ciepła w dość dobrym stopniu odwzorowuje kształt powstałej spoiny.

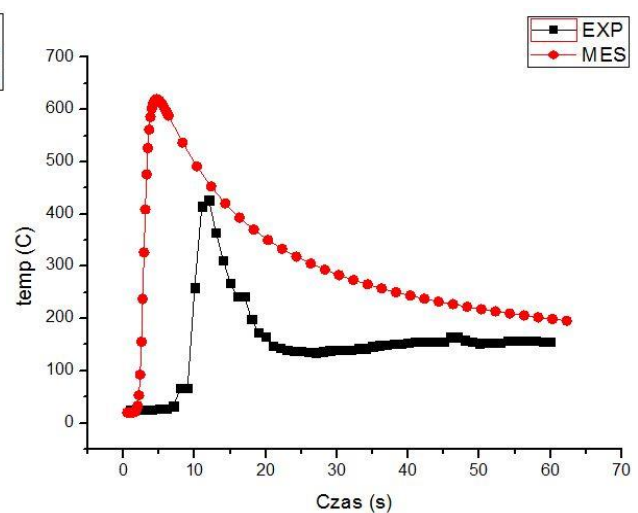


Rys. 11. Porównanie kształtu spoiny w przekroju poprzecznym dla badań numerycznych oraz doświadczalnych
 Fig. 11. Comparison of weld shape in cross-section for numerical and experimental tests

W wyniku przeprowadzonych pomiarów temperatury przy użyciu termopar uzyskano rozkłady cykli cieplnych spawania, które zauważalnie różnią się od cyklu cieplnego zaobserwowanego podczas procesu konwencjonalnego MAG [12](Rys. 12). Narastanie temperatury ma podobny przebieg, jednak chłodzenie jest już inne. Wynika to z zastosowanego źródła ciepła, grubości blach, ale również z warunków w jakich wykonano złącze próbne. Co więcej po szybkim schłodzeniu do temperatury poniżej 200 °C obserwuje się jej minimalny wzrost, co może wynikać również z zastosowanej podkładki miedzianej, na której odbywało się spawanie złącza próbnego. Pełna weryfikacja może nastąpić po porównaniu rozkładu temperatury w identycznych punktach dla analizy numerycznej oraz próby doświadczalnej. Zostało to przedstawione na Rys. 13 dla termopary oddalonej 10 mm od osi spoiny. Oba cykle wykazują pewne podobieństwo jedynie w szybkim narastaniu temperatury do temperatury maksymalnej, choć ich wartości maksymalne różnią się między sobą. Może to wynikać zarówno z przyjętych do analizy warunków brzegowych jak i niedoskonałości samego pomiaru w tym bezwładności zastosowanych termoelementów. Przebieg chłodzenia jest już zupełnie inny. Także krzywa chłodzenia wskazuje na bardziej łagodny przebieg temperatury w przypadku modelu numerycznego.



Rys. 12. Cykl cieplny uzyskany podczas prób doświadczalnych spawania hybrydowego dla wybranych punktów
 Fig. 12. Heat cycle obtained during experimental tests of hybrid welding for selected points



Rys. 13. Porównanie cykli cieplnych uzyskanych metodą MES oraz eksperymentalnie
 Fig. 13. Comparison of thermal cycles obtained by FEM and experimentally

Wnioski

W wyniku przeprowadzonych badań udało się zweryfikować klasyczny model Goldaka na podstawie badań pola temperatury oraz cyklu cieplnego spawania. Pomiary cykli cieplnych przy pomocy termopary są bardzo wymagające, gdyż istnieje bardzo dużo czynników, które mogą wpłynąć na uzyskanie poprawnego wyniku. Napotkane trudności podczas pomiarów wynikają przede wszystkim z bardzo dużej dynamiki procesu oraz szerokiego zakresu występujących temperatur począwszy od temperatury otoczenia do ponad 1500 °C w obszarze spoiny.

Wydaje się, że uzyskany w wyniku obliczeń numerycznych kształt spoiny wykorzystujący zaproponowany model hybrydowego źródła ciepła, w dość dobrym stopniu odzwierciedla zmiany rozkład temperatury przy spawaniu hybrydowym, pomimo, że same pomiary cyklu cieplnego nie do końca wykazują pełne podobieństwo. Nie oznacza to, że zaproponowany model źródła hybrydowego jest błędny. Jego ocena powinna uwzględniać wiele czynników, które wpływają na sposób prowadzenia pomiarów temperatury podczas procesu spawania czy też na nie do końca precyzyjne założenia dotyczące warunków brzegowych. Należy wziąć pod uwagę fakt, że są to dopiero wstępne badania doświadczalne pola temperatury dla procesu spawania hybrydowego plazma+MAG. Wyniki te powinny pozwolić na dokonanie modyfikacji zarówno części obliczeniowej jak i doświadczalnej, i przeprowadzenie dalszych badań, dzięki którym może udać się w pełni zweryfikować model hybrydowy na podstawie badań cykli cieplnych spawania.

Author Contributions: Conceptualization, D.R.; methodology, D.R., J.S.; software, D.G.; validation, D.R. and D.G.; formal analysis, D.G.; investigation, D.R. and J.S.; resources, D.R. and D.G.; data curation, D.R.; writing—original draft preparation, D.R.; writing—review and editing, D.G., P.P.; visualization, D.R. and D.G.; supervision, D.G.; project administration, D.R.; funding acquisition, D.G.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

Bibliografia

1. Goldak, J.; Chakravarti, A.; Bibby, M. A new finite element model for welding heat sources. *Metall. Trans. B* **1984**, *15*, 299–305, doi:10.1007/BF02667333.
2. Goldsmith, A.; Waterman, T.E.; Hirschorn, H.J. *Handbook of thermophysical properties of solid materials*; New York, 1961;
3. Komanduri, R.; Hou, Z.B. Thermal analysis of the arc welding process: Part I. General solutions. *Metall. Mater. Trans. B Process Metall. Mater. Process. Sci.* **2000**, *31*, 1353–1370, doi:10.1007/s11663-000-0022-2.
4. Rochalski, D.; Golański, D.; Chmielewski, T. Modele spawalniczych źródeł ciepła w analizie pola temperatury. *Przegląd Spaw. - Weld. Technol. Rev.* **2017**, *89*, 109–116, doi:10.26628/ps.v89i5.776.
5. Rochalski, D.; Golański, D.; Chmielewski, T. Modelowanie spawalniczego źródła ciepła w procesie spawania hybrydowego. *Przegląd Spaw. - Weld. Technol. Rev.* **2017**, *89*, 98–103, doi:10.26628/ps.v89i10.824.
6. Ślania, J.; Mikno, Z. Zagadnienia pomiaru temperatury w procesach spawania. *Biul. Inst. Spaw.* **2007**, *51*, 46–49.
7. Pilat, Z.; Szulc, J. Concept of the model robotized cell for Plasma-GMAW hybrid welding. *Appl. Mech. Mater.* **2014**, *613*, 43–52, doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.613.43.
8. Chmielewski, T.; Szulc, J.; Pilat, Z. Badania metalograficzne spoin wykonanych hybrydową metodą PTA-MAG; Metallographic examination of welded joints produced by PTA-MAG hybrid process. *Przegląd Spaw. - Weld. Technol. Rev.* **2014**, *86*, 46–50, doi:10.26628/ps.v86i7.64.
9. Sajek, A. Welding Thermal Cycles of Joints Made of S1100QL Steel by Saw and Hybrid Plasma-Mag Processes. *Adv. Mater. Sci.* **2020**, *20*, 75–86, doi:10.2478/adms-2020-0023.
10. Skowrońska, B.; Szulc, J.; Bober, M.; Baranowski, M.; Chmielewski, T. Selected Properties of RAMOR 500 Steel Welded Joints by Hybrid PTA-MAG. *J. Adv. Join. Process.* **2022**, *5*, 100111, doi:10.1016/j.jajp.2022.100111.
11. Skowrońska, B.; Chmielewski, T.; Golański, D.; Szulc, J. Weldability of S700MC steel welded with the hybrid plasma + MAG method. *Manuf. Rev.* **2020**, *7*, 4, doi:10.1051/mfreview/2020001.
12. Węglowski, M.; Chmielewski, T.; Kudła, K. Productivity assessment of the low-energy SpeedRoot welding process in PG position. *Weld. Int.* **2016**, *30*, doi:10.1080/09507116.2014.937621.



© 2024 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).