

Stanisław Agaciak, Jerzy Nowacki, Adam Sajek*
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

Możliwości realizacji numerycznej symulacji spawania łukowego

Possibilities of performing numerical simulation of arc welding

ABSTRACT

The article presents the individual stages of numerical simulation of the welding process.

The work uses commonly available tools that allow for efficient implementation of 3D modeling, creation of finite element meshes and calculations in the convention of finite elements method in thermodynamically transient conditions.

It has been shown that despite the complex process of modeling and calculations, the software used at many times simplifies the welding engineer's virtual diagnosis of the welding process.

Keywords: modelling, numerical calculations, welding

STRESZCZENIE

W artykule przedstawiono poszczególne etapy powstawania numerycznej symulacji procesu spawania.

W pracy wykorzystano ogólnodostępne narzędzia pozwalające na sprawną realizację modelowania przestrzennego, tworzenia siatek elementów skończonych oraz wykonania obliczeń w konwencji elementów skończonych w warunkach termodynamicznie nieustalonych.

Wykazano, że mimo złożonego procesu modelowania i obliczeń, zastosowane oprogramowanie w wielu momentach ułatwia inżynierowi spawalnikowi wirtualną diagnostykę procesu spawania.

Słowa kluczowe: modelowanie, obliczenia numeryczne, spawanie

1. Wstęp

Od współczesnych stalowych konstrukcji nośnych wymaga się coraz większych parametrów wytrzymałościowych przy coraz niższej masie własnej [1]–[4]. Indukuje to zastosowanie nowych materiałów inżynierskich, które wymagają użycia zaawansowanych, wysokowydajnych procesów spawalniczych [5]–[9]. Wprowadza to technologię spawania na wysoki poziom złożoności charakteryzującą zastosowaniem automatyzacji przy wąskich reżimach parametrów. Każda nowa konstrukcja wymaga wielu długotrwałych prób, które nie zawsze prowadzą do uzyskania minimalnych odkształceń przy maksymalnej użyteczności złącza.

W takich przypadkach ekonomicznie uzasadnione jest zastosowanie komputerowych symulacji numerycznych w celu predykcji naprężeń i odkształceń finalnego produktu oraz właściwości złączy spawanych, które muszą spełniać wymagania normatywne. Ogólnodostępne aplikacje symulacyjne pozwalają na pełen wachlarz zastosowań od zgrzewania wybuchowego [10] po symulację ruchu cieczy w jeziorce spawalniczym [11]. Niestety w większości przypadków zastosowane oprogramowanie bazuje na uniwersalnych środowiskach typu ANSYS czy ABAQUS [12], [13]. Charakteryzują się one wysokim stopniem komplikacji modelowania numerycznego dla zastosowaniach spawalniczych. Symulacje spawalnicze prowadzi się dla złożonych geometrycznie obiektów w stanie nieustalonym uwzględniając nieliniowe charakterystyki wielofazowych materiałów [14]–[16].

Odpowiedzią na zapotrzebowanie konstruktorów nie będących zaawansowanymi użytkownikami rozbudowanych środowisk obliczeniowych MES są spawalnicze programy

specjalistyczne typu SYSWELD czy Simufact Welding [14], [15], [17], [18]. Nie wymagają dogłębnej znajomości metody elementów skończonych oraz zawierają szereg udogodnień związanych z modelowaniem procesu spawania. W dalszej części tekstu przedstawiono proces modelowania procesu spawania dla przykładowej konstrukcji łącznika budowlanego.

2. Modelowanie łącznika budowlanego

Przedmiotem analizy jest łącznik budowlany przeznaczony do mocowania elementów konstrukcji nośnej budynków przemysłowych. Konstrukcja składa się z dwóch blach mocujących o grubości 16 mm, w których wykonano cztery otwory na śruby oraz profilu zamkniętego o przekroju prostokątnym, o wymiarach 180 x 350 mm i grubości 5 mm. Dla uproszczenia obliczeń zdecydowano się na zamodelowanie jednej połowy łącznika, której wymiary przedstawiono na rysunku 1. Profil do blachy spawany jest czterema spoinami pachwinowymi o grubości 3 mm.

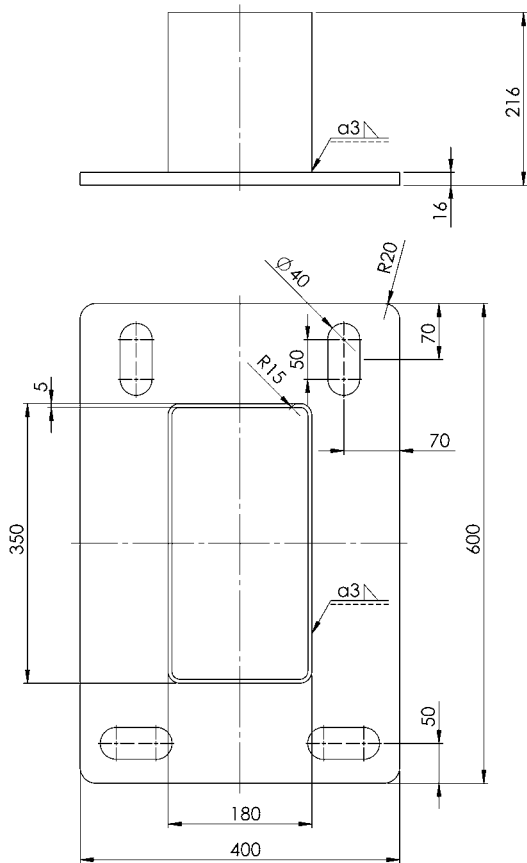
Model wykonano w programie SOLIDWORKS w oparciu o podstawowe funkcje. Całość została zamodelowana w złożeniu dzięki czemu możliwe było właściwe zorientowanie elementów względem siebie. Dwubryłowy model wymagał dodatkowo podzielenia powierzchni styku w celu ułatwienia zagęszczania siatki w kolejnym kroku. Gotowy model przedstawiono na rysunku 2 wyeksportowano w postaci pliku modelowania brył typu Parasolid.

3. Podział geometrii na elementy skończone

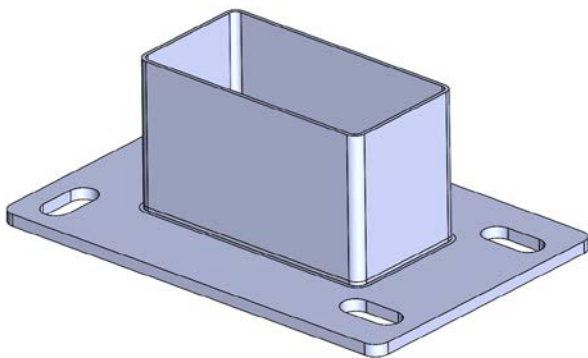
Geometrię złącza importowano do programu MSC Apex. Aplikacja ta jest samodzielnym środowiskiem MES, w którym możliwe jest tworzenie wielu rodzajów symulacji od podstaw. Jednakże jej modeler nie jest tak przyjazny

*Autor korespondencyjny. E-mail: adam.sajek@zut.edu.pl

i intuicyjny dla użytkownika jak Solidworks. Posiada również ograniczone możliwości modyfikacji utworzonych geometrii. Oprogramowanie Apex zostało wykorzystane do wykonania siatki elementów skończonych z uwagi na rozbudowane możliwości w tym zakresie.

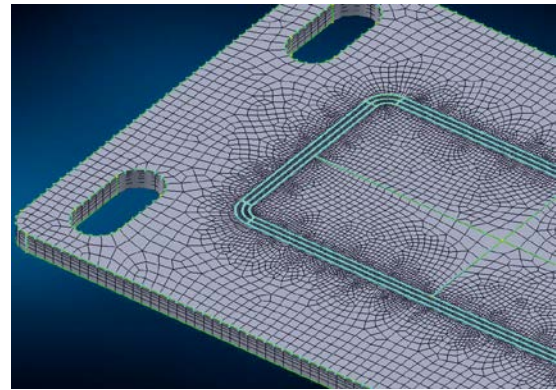


Rys. 1. Wymiary analizowanego łącznika budowlanego
Fig. 1. Dimensions of the analysed building connector

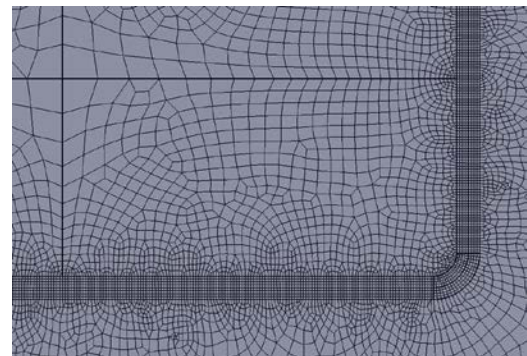


Rys. 2. Model przestrzenny w programie SOLIDWORKS z widocznymi liniami podziałowymi w miejscu kontaktu profilu z blachą
Fig. 2. 3D model in the SOLIDWORKS program with visible dividing lines where the profile contacts the plate

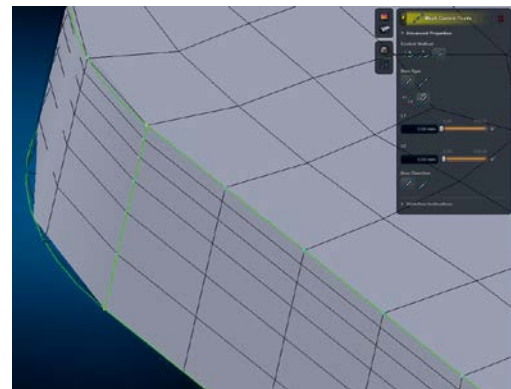
Budowanie siatki zaczęto od rozmieszczenia węzłów na powierzchni dolnej części złącza (Rys. 3.). Na powierzchniach wyznaczonych przez linie podziałowe utworzono najdrobniejszą siatkę, aby później uzyskać największą dokładność obliczeń w tych miejscach. Powierzchnie te podzielono na prostokąty.



Rys. 3. Rozmieszczenie węzłów w dolnej części złącza
Fig. 3. Arrangement of nodes at the bottom of the joint



Rys. 4. Widok normalny do powierzchni dolnej części złącza
Fig. 4. Normal view to the surface of the bottom of the joint

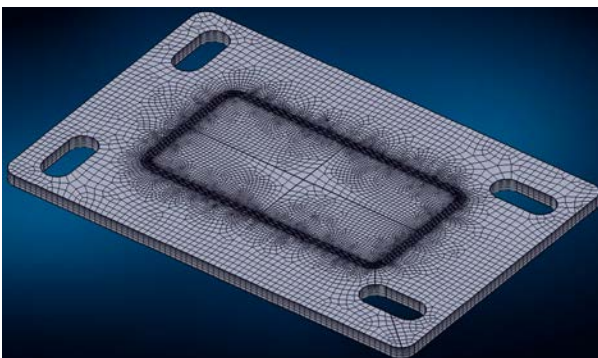


Rys. 5. Rozgęszczenie siatki na grubości dolnej części złącza, widok panelu do wyznaczania węzłów metodą rozgęszczania
Fig. 5. Expanding the mesh at the thickness of the lower part of the joint, view of the panel for determining nodes by densification

Następnym krokiem było utworzenie pomocniczej geometrii – 2 linii dzielących środkowy obszar na 4 cztery części. Umożliwiły one rozgęszczenie siatki na powierzchni do środka, gdzie nie jest konieczna wysoka dokładność (Rys. 4). W tym celu użyto metody rozmieszczenia węzłów z powiększaniem się odległości między węzłami. Podobnie wykonano węzły na grubości blachy (Rys. 5). Aby zapewnić rozgęszczenie siatki na zewnątrz dodano węzły na zewnętrznej krawędzi części w odległościach 8 mm. W kolejnym kroku utworzono na tak zdefiniowanej powierzchni siatkę elementów 2D, które finalnie przy użyciu funkcji „2.5D meshing” (Rys. 6), która utworzyła przestrzenną siatkę dolnej części złącza (Rys. 7).



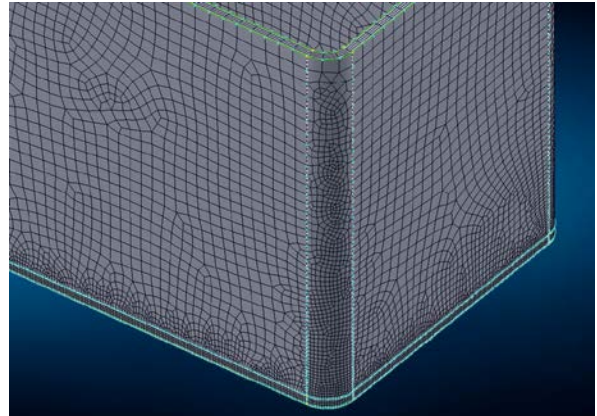
Rys. 6. Widok panelu „2.5D meshing”
 Fig. 6. „2.5D meshing” panel view



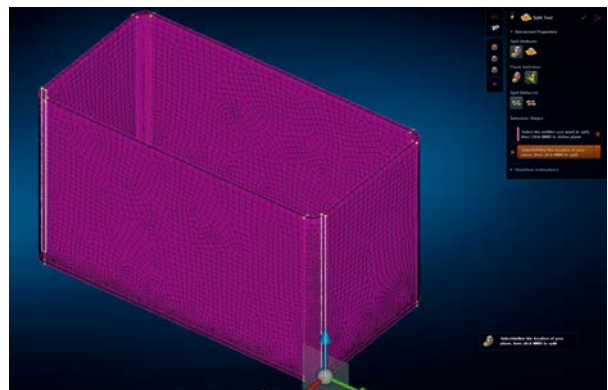
Rys. 7. Widok izometryczny kompletnej siatki elementów skończonych dolnej części złącza
 Fig. 7. Isometric view of the complete finite element mesh of the bottom of the joint

Węzły drugiej części (profilu) rozmieszczono na powierzchni styku tak, aby leżały w tym samym miejscu co węzły blachy (Rys. 8). Użyto podobnych funkcji jak w przypadku pierwszej opisywanej części złącza. Dodatkowo

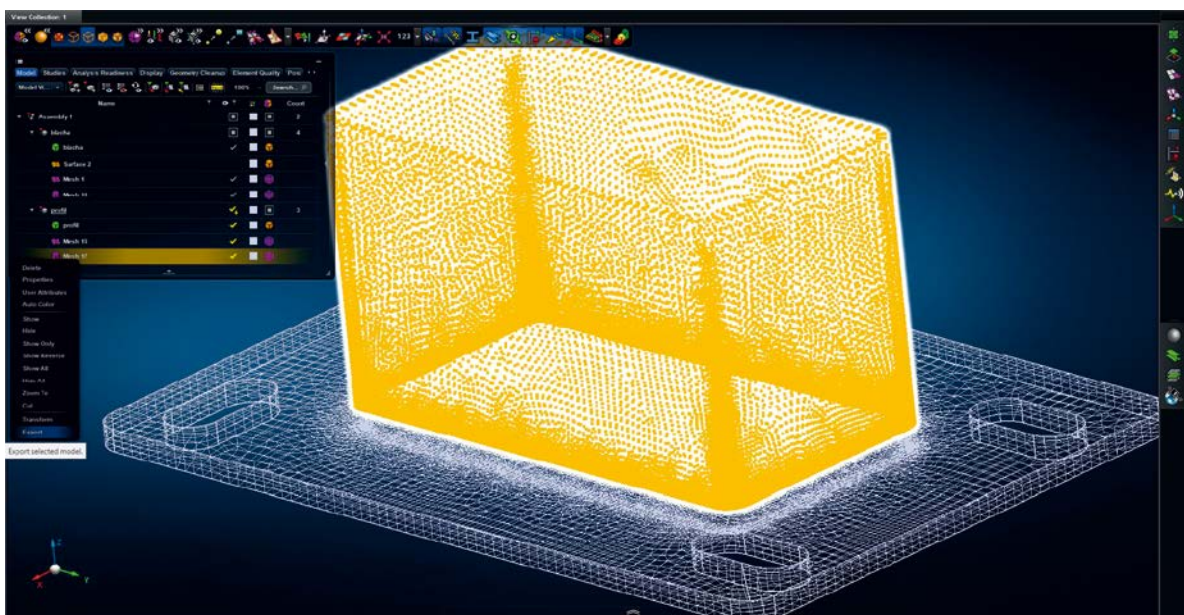
wykonano operację „split tool”, która podzieliła bryłę na 16 brył (Rys. 9). Płaszczyzny podziału wyznaczono poprzez wybranie 3 punktów należących do każdej płaszczyzny. Podzielenie na bryły pozwoliło na uzyskanie równomiernej siatki na przekroju.



Rys. 8. Rozmieszczenie węzłów w górnej części złącza
 Fig. 8. Arrangement of nodes at the top of the joint



Rys. 9. Wykorzystanie funkcji „split tool” do podziału bryły
 Fig. 9. Using the „split tool” function to split a block

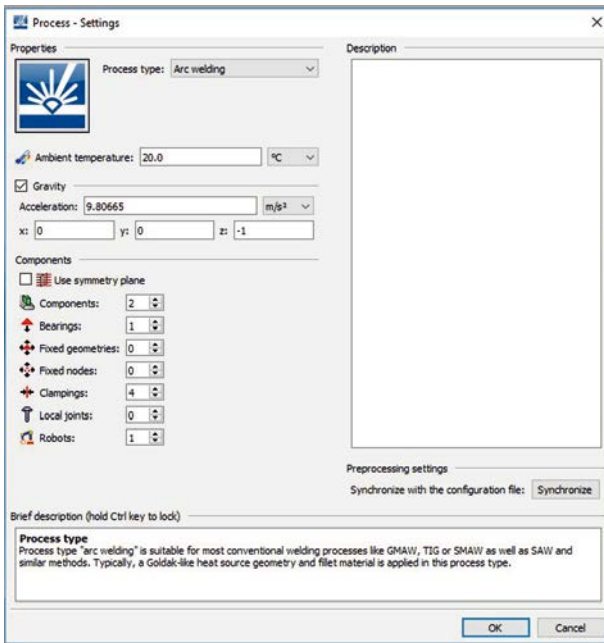


Rys. 10. Eksport elementów brylowych MESH
 Fig. 10. Export of MESH solid elements

Gotowe bryły eksportowano z rozszerzeniem „*.bdf”, aby móc z nich skorzystać w programie Simufact Welding (Rys. 10).

4. Symulacja procesu spawania

Program Simufact Welding jest środowiskiem MES zorientowanym na procesy spawania i zgrzewania. Poniżej opisano proces budowania symulacji w oparciu o wcześniej stworzoną geometrię. Użyto wybranych funkcji programu, które stanowią niewielki wycinek jego możliwości.

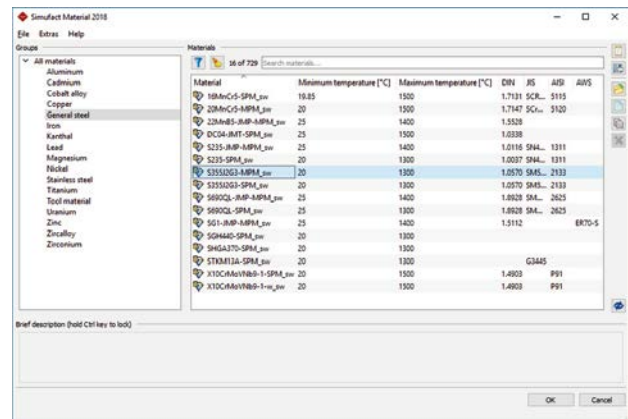


Rys. 11. Początkowe ustawienia procesu spawania w programie Simufact Welding

Fig. 11. Initial welding process settings in Simufact Welding

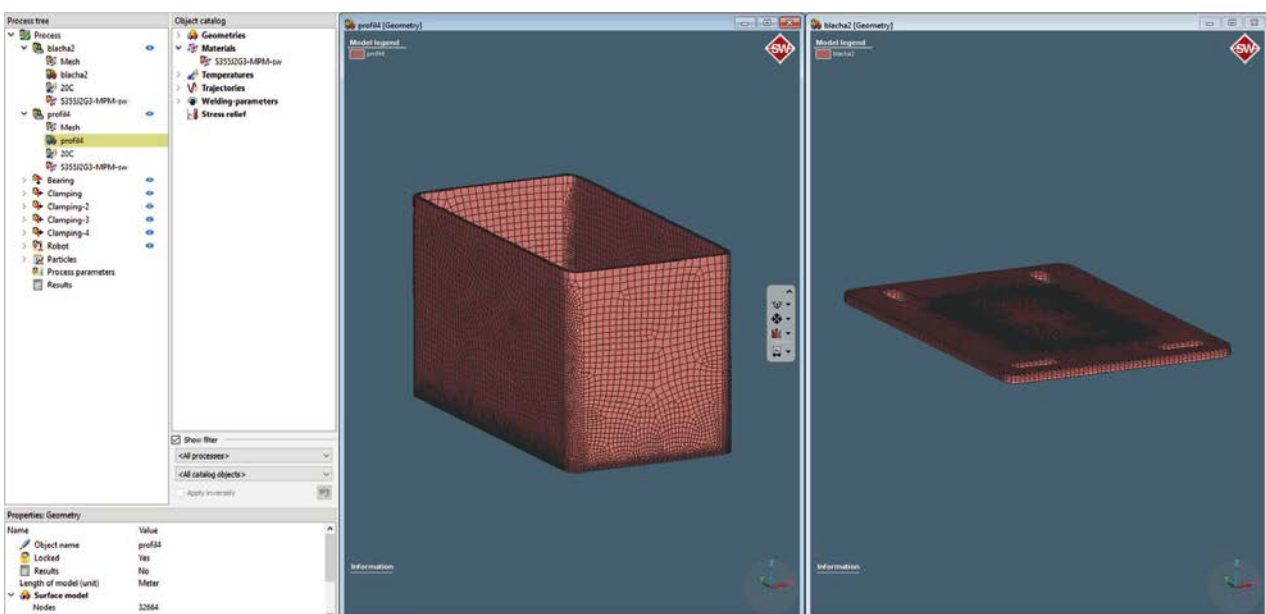
Tworzenie symulacji rozpoczyna okno startowe, w którym należy określić główne elementy procesu (Rys. 11). Wybrano proces spawania łukowego oraz temperaturę powietrza na poziomie 20°C. Uwzględniono siłę grawitacji działającą na model. Określono liczbę części składających się na złącze. Do modelu przypisano 1 stół spawalniczy, na którym ustawione zostaną spawane elementy; 4 dociski usztywniające i ograniczające przesuwanie i 1 robota realizującego proces spawania.

Z biblioteki materiałów wybrano stal S355J2G3-MPM (Rys. 12). Materiał został przypisany do dwóch części modelu oraz do robota (jako materiał dodatkowy).



Rys. 12. Wybór materiału z katalogu Simufact Material
Fig. 12. Selection of material from the Simufact Material database

W lewym oknie symulacji (Rys. 13) znajdują się jej zadeklarowane elementy, które należy w pełni zdefiniować za pomocą elementów dodawanych z biblioteki projektu (kolejne okno po prawej). Elementy te to geometrie, temperatury, modele materiałowe, modele źródeł ciepła, trajektorie robotów itp.

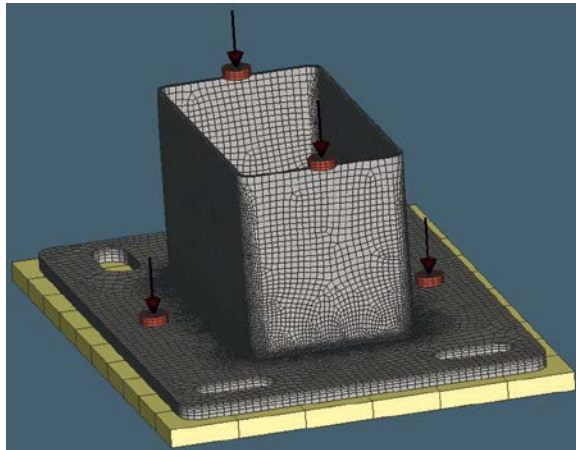


Rys. 13. Widok importowanej geometrii

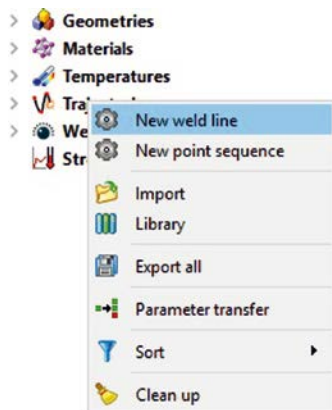
Fig. 13. Imported geometry view

Mimo, że Simufact Welding nie posiada modułu modelowania i meshowania, umożliwia wygenerowanie prostej powierzchniowej siatki elementów skończonych dla stołu spawalniczego (prostokądnian) i docisków (Rys. 14).

Trajektorię procesu spawania dodano poprzez utworzenie linii spawania (Rys. 15). Dokonano tego poprzez wybranie węzłów modelu leżących w skrajnych punktach 4 spoin pachwinowych. Utworzone w ten sposób cztery trajektorie zostały dodane do robota.



Rys. 14. Model po dodaniu stołu i docisków
Fig. 14. Model after adding the table and clamps

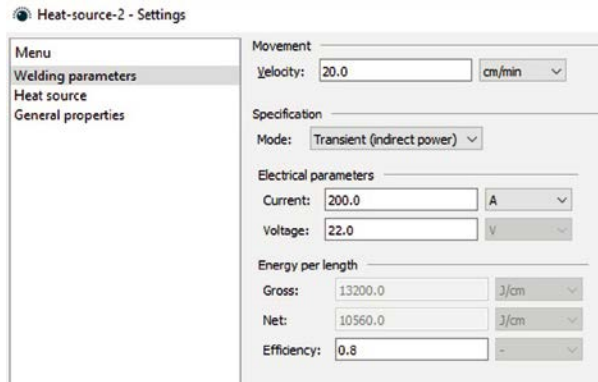


Rys. 15. Opcja tworzenia nowej linii spawania
Fig. 15. Option to create a new welding line

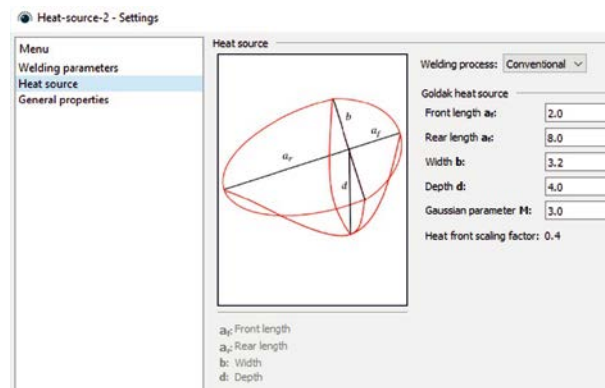
Źródło ciepła definiuje się w zakładce parametrów spawania (Rysunek 16). Dobrano następujące parametry:

- prędkość spawania $v = 20$ cm/min;
- wartość natężenia prądu $I = 200$ A;
- wartość napięcia łuku $U = 22$ V;
- współczynnik sprawności procesu został ustalony na poziomie 80%.

W drugiej zakładce źródła ciepła (Rys. 17) definiuje się jego parametry geometryczne (długość w obie strony, szerokość, głębokość) oraz parametr Gaussa, który wskazuje koncentrację ciepła w źródle. Parametr ten może przyjmować całkowite wartości od 0 do 3 (0 oznacza równomierne rozłożenie ciepła, 3 – dużą koncentrację ciepła wewnątrz źródła). Zdefiniowany w ten sposób model źródła ciepła został przypisany do każdej trajektorii spawania.

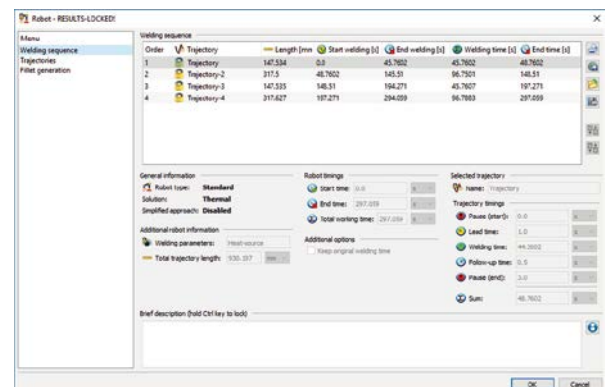


Rys. 16. Okno ustawień źródła ciepła – parametry spawania
Fig. 16. Heat source settings window - welding parameters



Rys. 17. Okno ustawień źródła ciepła – parametry źródła ciepła
Fig. 17. Heat source settings window - heat source parameters

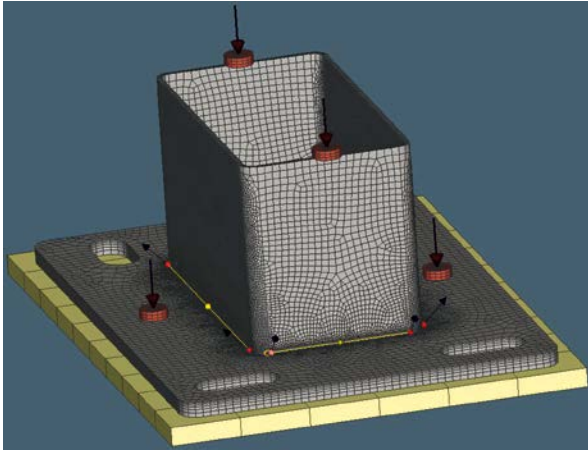
Kolejnym krokiem jest określenie ruchu robota. W zakładce sekwencji spawania (Rys. 18) ustawiono poszczególne czasy spawania dla każdej trajektorii: czas zajarzenia łuku przed rozpoczęciem ruchu (1 s), czas wypełnienia krateru po zakończeniu ruchu (0,5 s), czas przejścia pomiędzy kolejnymi spoinami (3 s). Czas spawania został obliczony automatycznie z parametrów ustawionych w źródle ciepła. Obliczony został również czas całkowity pełnego procesu.



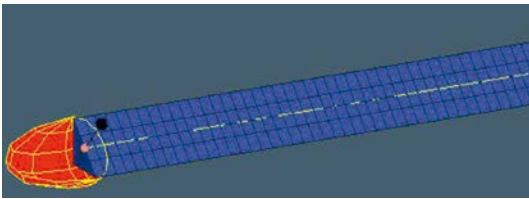
Rys. 18. Ustawienia robota – sekwencja spawania
Fig. 18. Robot settings - welding sequence

W kolejnej zakładce ustawiono orientację robota względem komponentu (pod kątem 45°). Następnie dobrano spoinę o parametrze $a = 3$ mm oraz ustawiono odpowiednią siatkę MESH spoiny. Dodatkowo w ustawieniach trajektorii

odsunięto źródło ciepła o wartość 3 mm zmieniając parametr „offset” aby powierzchnia górna źródła ciepła pokrywała się z licem spoiny. Na rysunku 19 przedstawiono model z pełną definicją źródeł ciepła, a na rysunku 20 widoczna jest prawidłowa pozycja źródła względem generowanej spoiny pachwinowej.

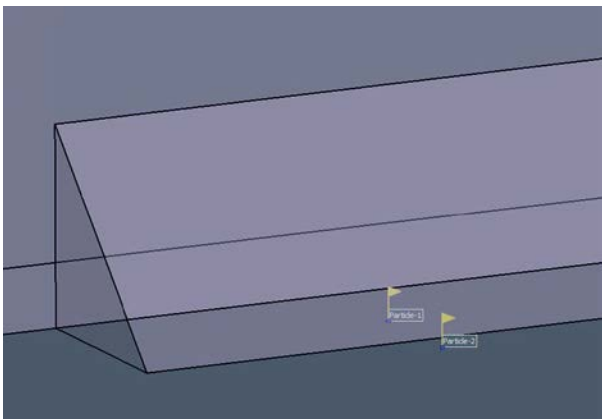


Rys. 19. Dodane linie spawania i źródło ciepła do modelu
Fig. 19. Welding lines and heat source added to the model



Rys. 20. Orientacja źródła ciepła względem spoiny
Fig. 20. Orientation of the heat source relative to the weld

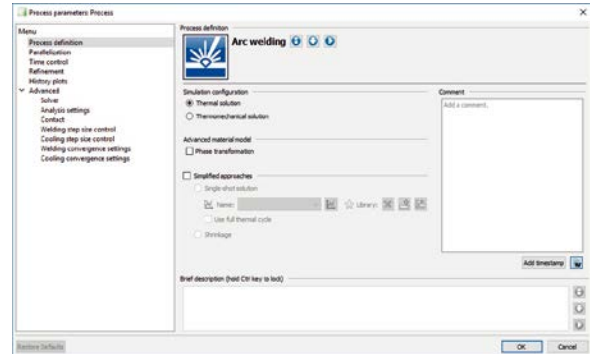
W celu obserwacji zmiany temperatur w miejscu przygotowanym na spoinę oraz w przewidywanej strefie wpływu ciepła dodano węzły pomiarowe, na których program będzie dokonywał rejestracji wyników symulacji (Rys. 21).



Rys. 21. Rozmieszczenie punktów pomiarowych przy pierwszej spoinie
Fig. 21. Arrangement of measuring points at the first weld

Ostatnim krokiem przed wykonaniem obliczeń jest ustalenie końcowych warunków symulacji (Rys 22). Należą do nich przykładowo takie parametry jak:

- rodzaj symulacji (tylko temperatury, temperatury i odkształcenia);
- analiza przemian fazowych (dla modeli materiałów wielofazowych);
- ilość rdzeni procesora biorąca udział w obliczeniach (przyspieszenie obliczeń);
- czas analizy, ilość kroków obliczeniowych dla nagrzewania i chłodzenia;
- zagęszczanie i rozgęszczanie siatki elementów skończonych wokół źródła (poprawa dokładności obliczeń).

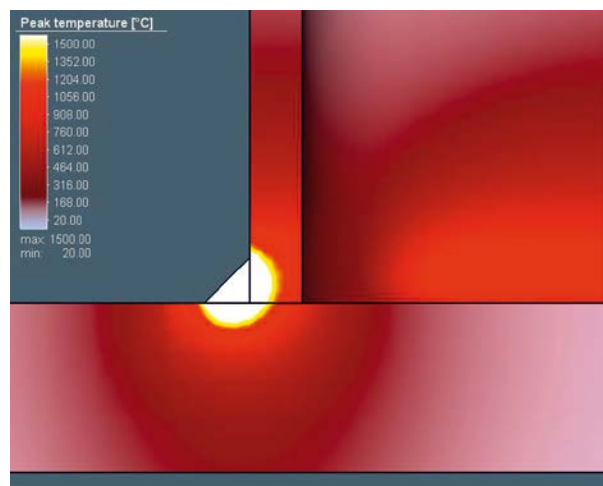


Rys. 22. Ustawienia parametrów procesu
Fig. 22. Process parameter settings

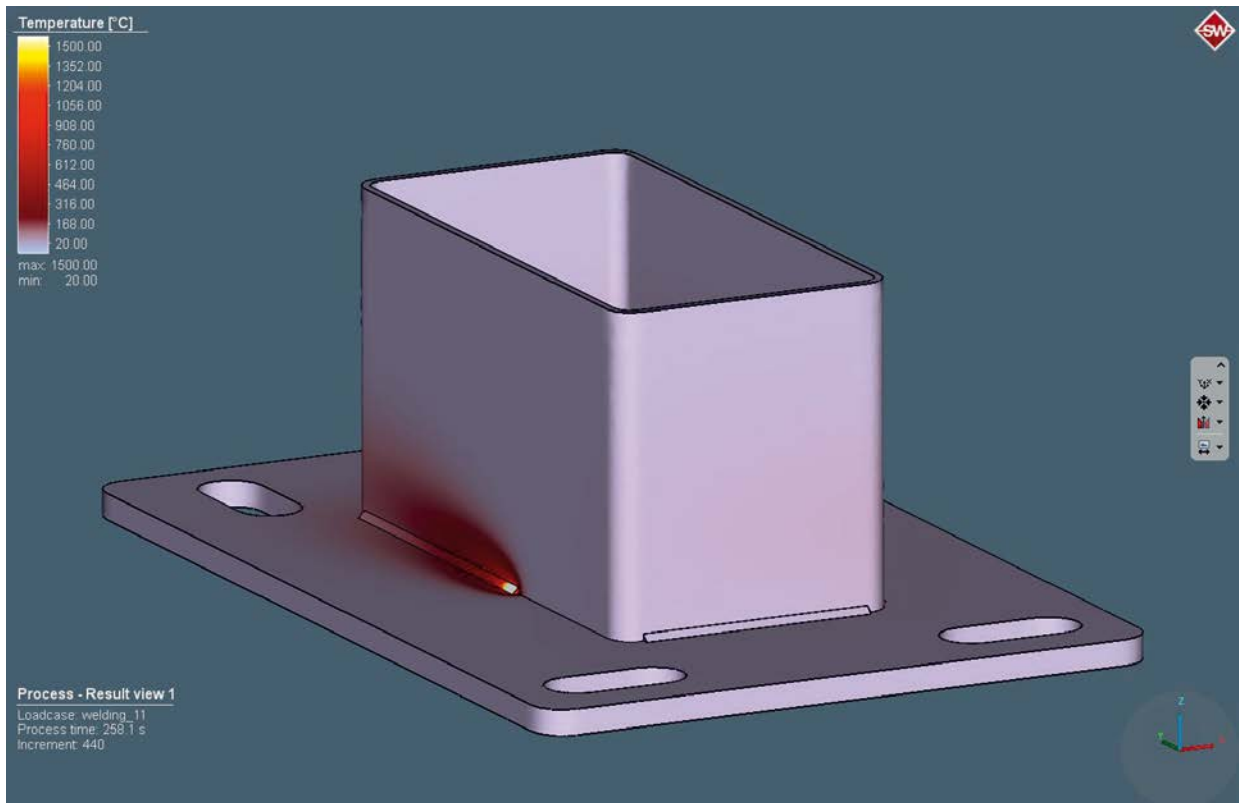
Czas trwania obliczeń temperaturowych wynosił około 20 godzin. Spowodowane było to dużym zagęszczeniem siatki. Dzięki temu uzyskano jednak dokładniejsze wyniki.

Poniżej przedstawiono kilka przykładowych możliwości przedstawienia wyników symulacji takich jak:

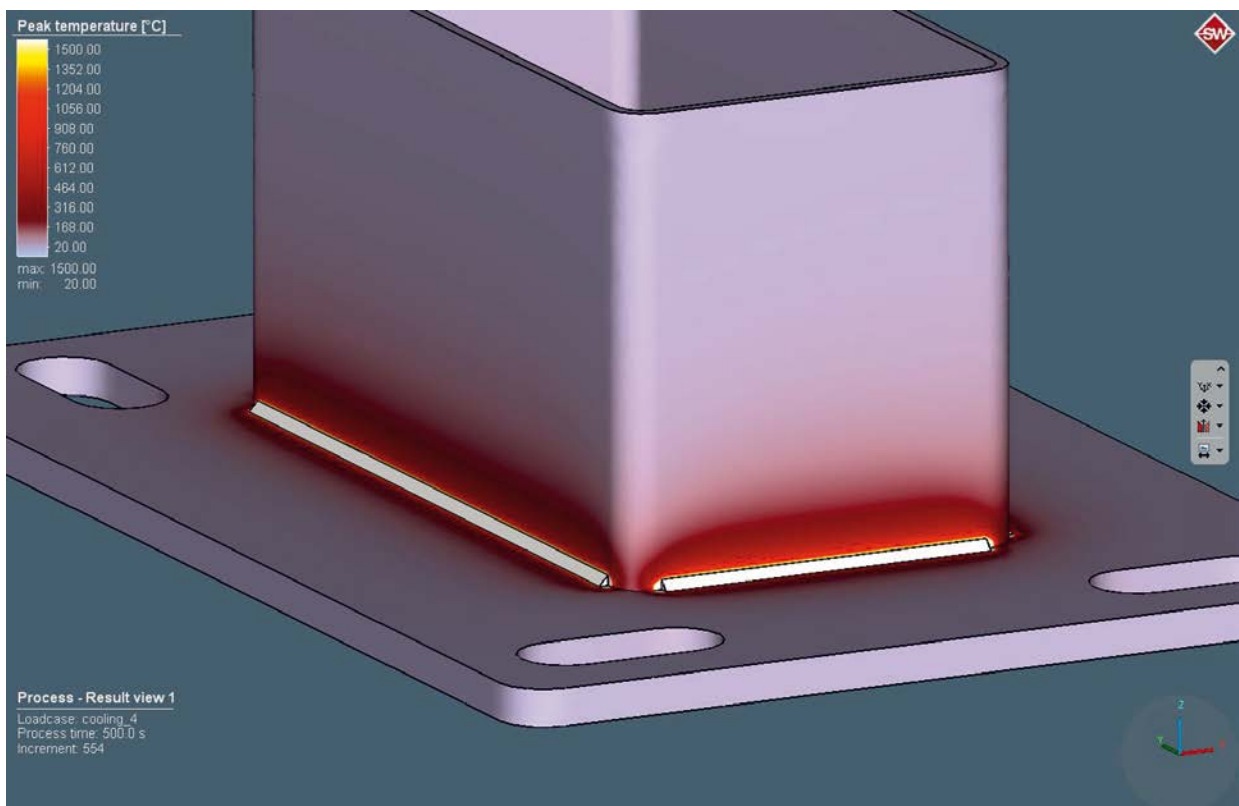
- przekrój złącza umożliwiający sprawdzenie głębokości przetopu (Rys. 23);
- rozkładu temperatur podczas spawania w danej chwili t (Rys. 24);
- maksymalne temperatury uzyskane w złączu podczas całego procesu (Rys. 25)..



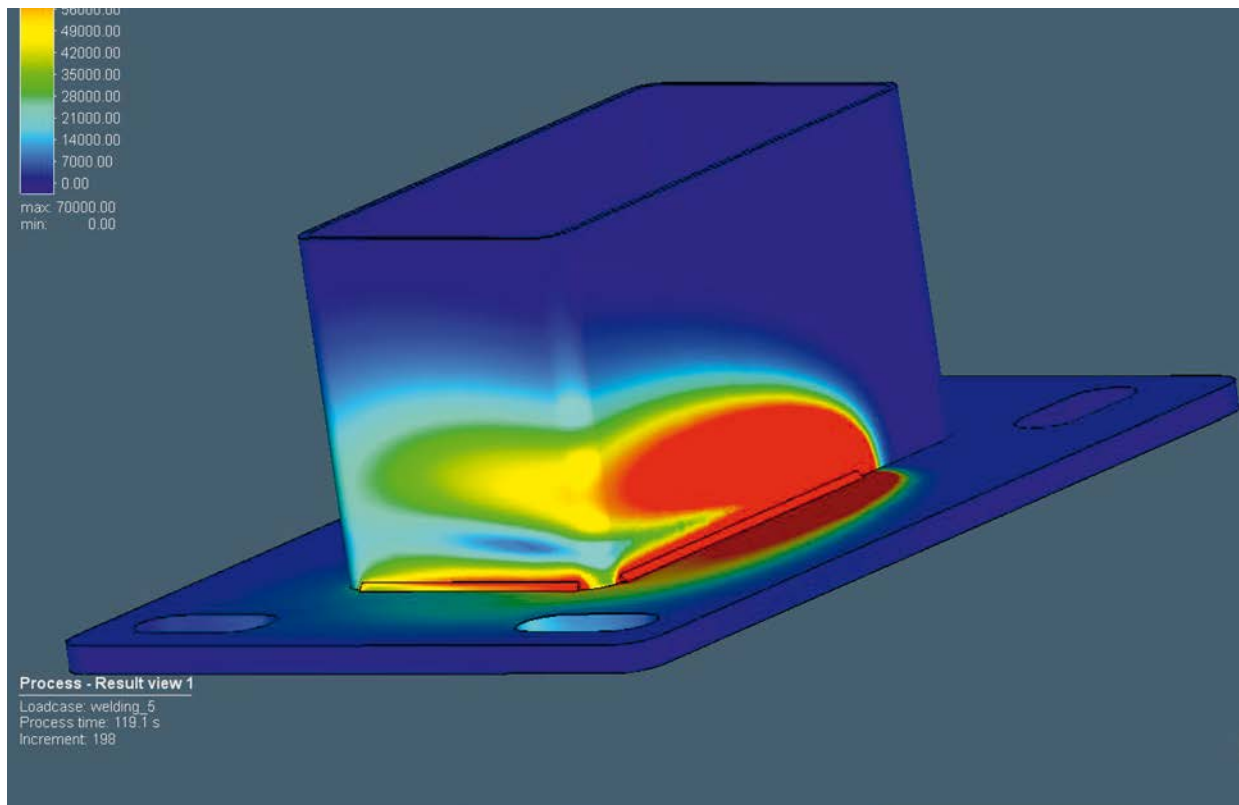
Rys. 23. Wyniki symulacji – rozkład najwyższych uzyskanych temperatur w złączu podczas procesu spawania – przybliżenie przekroju
Fig. 23. Simulation results - distribution of the highest temperatures obtained in the joint during the welding process - section zoom in



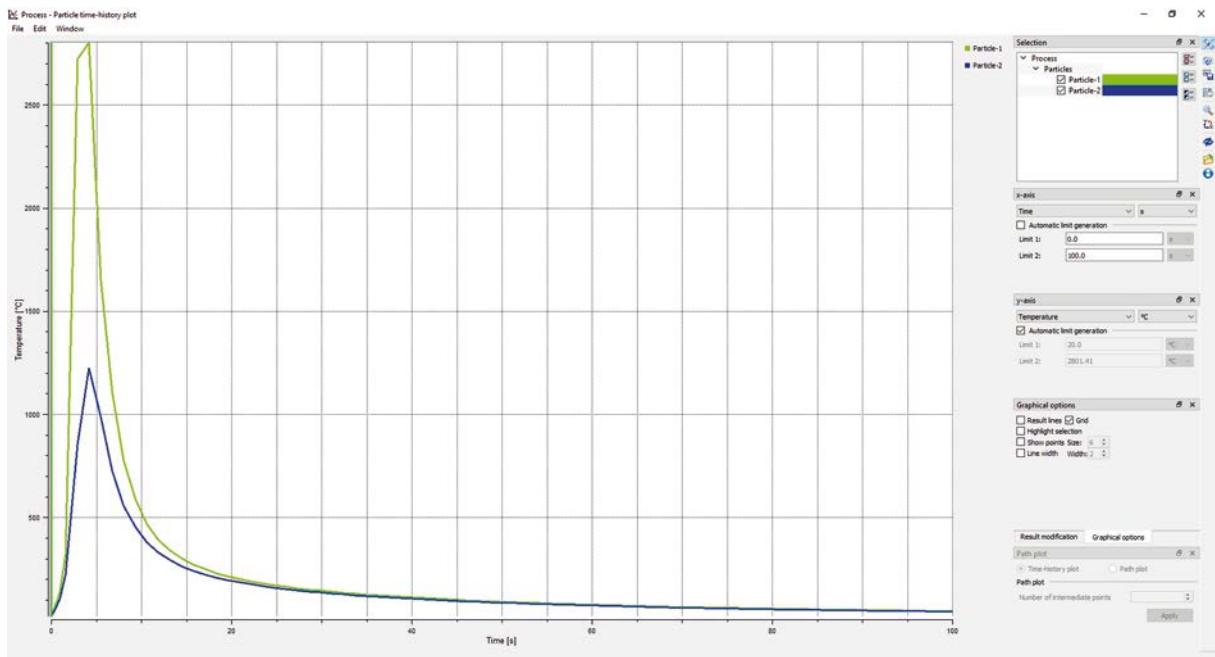
Rys. 24. Wyniki symulacji – rozkład temperatur w złączeniu dla $t = 258$ s
Fig. 24. Simulation results - temperature distribution in the joint for $t = 258$ s



Rys. 25. Wyniki symulacji – rozkład najwyższych uzyskanych temperatur w złączeniu podczas procesu spawania
Fig. 25. Simulation results - distribution of the maximum temperatures obtained in the joint during the welding process



Rys. 26. Wyniki symulacji – rozkład strumienia ciepła podczas procesu spawania dla $t = 119$ s
Fig. 26. Simulation results - heat flux distribution during the welding process for $t = 119$ s



Rys. 27. Wyniki symulacji – wykres temperatury w czasie uzyskanej na zdefiniowanych węzłach sieci elementów skończonych
Fig. 27. Simulation results - temperature graph over time obtained on defined nodes of the finite element mesh

Program umożliwia także obserwację przepływu ciepła w trakcie spawania. Na rysunku 26 widoczny jest sposób rozchodzenia się ciepła, jego gromadzenie oraz intensywność stygnięcia.

Na wykresie (Rys. 27) przedstawiono zależność temperatury od czasu symulacji w dwóch, wcześniej zdefiniowanych punktach pomiarowych. Punkt umieszczony w spoinie

osiąga temperaturę około 2300°C , a w strefie wpływu ciepła osiąga wartość lekko powyżej 1200°C .

Przedstawiony w artykule sposób modelowania, tworzenia siatki elementów skończonych oraz symulacji procesu spawania stanowi pierwszy etap analizy. W następnych etapach możliwa jest weryfikacja wyznaczonych temperatur w trakcie prób technologicznych spawania. Po pozytywnych

testach możliwe jest przeprowadzenie analiz naprężeń i odkształceń i takie ustalenie sekwencji spawania aby maksymalnie obniżyć deformacje konstrukcji.

5. Wnioski

Proces tworzenia symulacji numerycznej spawania jest złożony lecz nie wymaga specjalistycznej wiedzy w zakresie metody elementów skończonych. Świadomy stawianych wymagań inżynier spawalniki jest w stanie opanować go w krótkim czasie znając podstawowe zasady rządzące modelowaniem CAD, tworzeniem siatek elementów skończonych i konfigurowaniem środowiska symulacyjnego.

Najważniejszym czynnikiem wpływającym na efektywność symulacji jest czas, który należy poświęcić modelowaniu i obliczeniom. Wykonanie siatki elementów skończonych o optymalnym zagęszczeniu oraz poprawne skonfigurowanie systemu, pozwala znacznie skrócić etap obliczeń. Jest to kluczowe z uwagi na fakt iż przy poszukiwaniu najlepszych parametrów technologicznych dla jednej konstrukcji należy wykonać kilkanaście różnych wariantów analiz.

Poprawnie wykonana symulacja numeryczna procesu pozwala określić najkorzystniejszy wariant wykonania konstrukcji spawanej jeszcze na etapie projektowania. Otwiera to drogę do wytwarzania zaawansowanych konstrukcji o optymalnej jakości przy najniższych kosztach.

6. Literatura/References

- [1] M. S. Węglowski and M. Zeman, "Prevention of cold cracking in ultra-high strength steel Weldox 1300," *Arch. Civ. Mech. Eng.*, vol. 14, no. 3, 2014.
- [2] M. Fiedler, R. Rauch, R. Schnitzer, W. Ernst, G. Simader, and J. Wagner, "The alform® welding system The world's first system for high-strength welded structures," *IIW International Conference High-Strength Materials - Challenges and Applications*, Helsinki, Finland, pp. 1-5, 2015.
- [3] J. Górka, "Weldability of thermomechanically treated steels having a high yield point," *Arch. Metall. Mater.*, vol. 60, no. 1, pp. 469-475, 2015.
- [4] D. Fydrych, J. Łabanowski, and G. Rogalski, "Weldability of high strength steels in wet welding conditions," *Polish Marit. Res.*, vol. 20, no. 2, pp. 67-73, 2013.
- [5] S. Liu, Y. Li, F. Liu, H. Zhang, and H. Ding, "Effects of relative positioning of energy sources on weld integrity for hybrid laser arc welding," *Opt. Lasers Eng.*, vol. 81, pp. 87-96, 2016.
- [6] M. Chen, J. Xu, L. Xin, Z. Zhao, and F. Wu, "Comparative study on interactions between laser and arc plasma during laser-GTA welding and laser-GMA welding," *Opt. Lasers Eng.*, vol. 85, pp. 1-8, 2016.
- [7] Z. M. Liu, S. L. Cui, Z. Luo, C. Z. Zhang, Z. M. Wang, and Y. C. Zhang, "Plasma arc welding: Process variants and its recent developments of sensing, controlling and modeling," *J. Manuf. Process.*, vol. 23, pp. 315-327, 2016.
- [8] M. Banasik and M. Urbańczyk, "Spawanie metodą hybrydową laser + MAG złączy teowych," *Biul. Inst. Spaw.*, vol. 61, no. 2, pp. 25-30, 2017.
- [9] J. Nowacki and A. Sajek, "Verification of Properties of Joints Made of Advances High Strength Steels in the Conditions of the Complex Thermal Cycles of the HPAW Process," *Biul. Inst. Spaw.*, vol. 62, no. 5, pp. 167-173, 2018.
- [10] I. A. Bataev et al., "Towards better understanding of explosive welding by combination of numerical simulation and experimental study," *Mater. Des.*, vol. 169, no. March, pp. 1-16, 2019.
- [11] J. Cheon, D. V. Kiran, and S.-J. Na, "CFD based visualization of the finger shaped evolution in the gas metal arc welding process," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 97, pp. 1-14, 2016.
- [12] F. Kong, J. Ma, and R. Kovacevic, "Numerical and experimental study of thermally induced residual stress in the hybrid laser-GMA welding process," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 211, no. 6, pp. 1102-1111, 2011.
- [13] W. Maurer, W. Ernst, R. Rauch, S. Kapl, R. Vallant, and N. Enzinger, "Numerical simulation on the effect of HAZ softening on static strength of HSLA steel welds," in *Mathematic modelling of weld phenomena 10*, 2013, no. January, pp. 669-690.
- [14] S. Neubert, A. Pittner, and M. Rethmeier, "Influence of non-uniform martensitic transformation on residual stresses and distortion of GMA-welding," *J. Constr. Steel Res.*, vol. 128, pp. 193-200, 2017.
- [15] T. Kik and J. Górka, "Numerical Simulations of Laser and Hybrid S700MC T-Joint Welding," *Materials (Basel)*, vol. 12, no. 3, p. 516, 2019.
- [16] J. Goldak, M. Asadi, and R. G. Alena, "Why power per unit length of weld does not characterize a weld?," *Comput. Mater. Sci.*, vol. 48, no. 2, pp. 390-401, 2010.
- [17] G. Stix and B. Buchmayr, "Investigation of residual stresses and distortions produced in tubular," *IIW International Conference High-Strength Materials - Challenges and Applications*, Helsinki, Finland, pp. 1-5, 2015.
- [18] A. Sajek and J. Nowacki, "Comparative evaluation of various experimental and numerical simulation methods for determination of t/8/5 cooling times in HPAW process weldments," *Arch. Civ. Mech. Eng.*, vol. 18, no. 2, pp. 583-591, 2018.