

Analizy numeryczne procesów spawania i obróbki cieplnej z wykorzystaniem oprogramowania *SYSWELD*

Piotr Swacha¹, Maciej Kotyk^{2*}, Radosław Stachowiak³, Wojciech Ziółkowski⁴

¹ Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Polska; e-mail: pioswa002@utp.edu.pl

² Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Polska; e-mail: maciej.kotyk@utp.edu.pl

³ Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Polska; e-mail: radsta005@utp.edu.pl

⁴ Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Polska; e-mail: wojzio002@utp.edu.pl

* Autor korespondencyjny; e-mail: maciej.kotyk@utp.edu.pl

Streszczenie: Publikacja powstała w celu przedstawienia możliwości analiz numerycznych procesu spawania, a także obróbki cieplnej z wykorzystaniem oprogramowania numerycznego *SYSWELD*. W pracy opisano wybrane narzędzia wchodzące w skład pakietu oprogramowania *SYSWELD*. Przedstawiono przykłady możliwych do wykonania symulacji procesów technologicznych oraz rezultaty, które za ich pomocą można uzyskać. Określono podstawowe etapy symulacji oraz dane wejściowe jakie należy znać, aby móc ją przeprowadzić. Przedstawiono również dwa przykłady obejmujące symulację procesu spawania złącza teowego oraz procesu hartowania szczęki maszyny wytrzymałościowej. Zaprezentowano wyniki w postaci map barwnych oraz wykresów. Dokonano ponadto ich analizy. Na podstawie przeprowadzonych analiz wykazano, iż prezentowane narzędzie numeryczne może być cennym źródłem informacji o symulowanym procesie. Uzyskane dane mogą stanowić podstawy do optymalizacji poszczególnych procesów.

Słowa kluczowe: analizy numeryczne, *MES*, *SYSWELD*, spawalnictwo, obróbka cieplna

Numerical analyses of welding and heat treatment processes using *SYSWELD* software

Piotr Swacha¹, Maciej Kotyk^{2*}, Radosław Stachowiak³, Wojciech Ziółkowski⁴

¹ UTP University of Science and Technology, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Poland; e-mail: pioswa002@utp.edu.pl

² UTP University of Science and Technology, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Poland; e-mail: maciej.kotyk@utp.edu.pl

³ UTP University of Science and Technology, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Poland; e-mail: radsta005@utp.edu.pl

⁴ UTP University of Science and Technology, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Poland; e-mail: wojzio002@utp.edu.pl

* Correspondent author; e-mail: maciej.kotyk@utp.edu.pl

Summary: The main purpose of the work was to present the possibility of numerical analysis of the welding process and heat treatment with the use of the *SYSWELD* numerical software. Selected tools included in the *SYSWELD* software package are described in the paper. Examples of possible simulations of technological processes and the results that can be obtained on their basis are presented. The basic stages of the simulation, and the input data required to perform it have been defined. Two examples are also presented including simulation of T-joint welding process and grip hardening process of a testing machine. Results were presented in the form of color maps and graphs. In addition, their analysis was done. The conducted analyzes showed that the presented numerical tool can be a valuable source of information about the simulated process. The data obtained can form the basis for the optimization of individual processes.

Key words: numerical analysis, *FEM*, *SYSWELD*, welding, heat treatment

1. Wstęp

W następstwie nieustannego rozwoju w budowie maszyn, w przemyśle samochodowym, stoczniowym, maszynowym, narzędziowym i w wielu innych produkcji są zmuszeni do wprowadzania nowoczesnych rozwiązań w celu zwiększenia wydajności oraz efektywności produkcji. Prowadzone prace zarówno badawcze, jak i rozwojowe skupiają się na wprowadzaniu nowych konstrukcji o zwiększonych własnościach użytkowych. Coraz szerzej stosuje się nowoczesne oraz kosztowne w zakupie materiały, co zwiększa koszt prototypowania. Nowe konstrukcje charakteryzują się większym stopniem skomplikowania geometrii oraz niekiedy większymi rozmiarami, co niejednokrotnie utrudnia prowadzenie badań na rzeczywistych obiektach. Zdarza się też, że wyniki laboratoryjne po przeprowadzonych badaniach nie są skorelowane z rzeczywistymi obiektami, a stosowane procesy spawania czy też obróbki, z racji ich skomplikowania, przynoszą nieoczekiwane efekty. Z tych powodów coraz częściej stosuje się komputerowe symulacje numeryczne, które mają na celu w relatywnie tani oraz efektywny sposób pomóc inżynierowi w ocenie poprawności wykonania modelu przed wdrożeniem rzeczywistego rozwiązania. Na rynku CAE istnieje bardzo duża różnorodność oprogramowania służącego do obliczeń numerycznych z zakresu szeroko stosowanej Metody Elementów Skończonych (MES): od elementarnych implementacji stanowiących dodatkowe narzędzie, np. w pakiecie *Autodesk INVENTOR*, po rozbudowane uniwersalne środowiska, np. *ANSYS* lub *ABAQUS*. Ze względu na specyfikę niektórych zagadnień twórcy programów do symulacji MES są zmuszeni do opracowania specjalizowanego oprogramowania. Do tego typu problemów należą symulacje procesów spawania. Specjalizacja narzędzi numerycznych pozwala na znacznie bardziej efektywne wykorzystanie ich w gałęziach przemysłu, do których zostały przeznaczone [1, 2, 11, 12].

Symulacje numeryczne procesów spawania oraz obróbki cieplnej należą do bardzo złożonych zagadnień, są jednak coraz częściej przeprowadzane podczas projektowania elementów konstrukcyjnych. Modelowanie tych procesów wymaga dużej wiedzy, a także wyznaczenia wielu właściwości cieplno-metalurgicznych, jak i mechanicznych stosowanych materiałów. Wynika to z faktu, iż oddziałujący na materiał cykl cieplny towarzyszący spawaniu powoduje powstanie naprężeń oraz odkształceń, których rozkład uwarunkowany jest wpływem wielu czynników, takich jak: przemiany metalurgiczne, rodzaj i parametry technologii spawania, temperatura podgrzania, sposób mocowania łączonych elementów, rodzaj spoin i kolejność ich wykonywania, postać geometryczna konstrukcji i jej wymiary oraz właściwości mechaniczne materiału. Uzyskany niezrównoważony układ sił wewnętrznych w postaci naprężeń szczątkowych może być przyczyną zmniejszenia trwałości konstrukcji oraz może powodować zmianę jej własności w trakcie eksploatacji. Odkształcenia wywołane spawaniem mogą spowodować zmianę wymiarów konstrukcji do wielkości wykraczających ponad dopuszczalne normy [2, 4, 9, 13].

Zjawiska termiczno-metalurgiczne zachodzące podczas obróbki cieplnej są przyczyną zmian w strukturze materiałów. Zmiany te mogą skutkować niejednorodnością struktury. Dodatkowo podczas obróbki cieplnej, szczególnie hartowania, pojawiają się naprężenia własne w materiale. Naprężenia te są wynikiem nierównomiernych dylatacyjnych zmian wymiarów na skutek występowania gradientu temperatury oraz wywołane są przemianami fazowymi i zmianami w objętości właściwej faz. Na wartość powstałych naprężeń wpływają: wielkość oraz geometria przedmiotu, skład chemiczny, szybkości chłodzenia, gatunek stali, struktura, hartowność, temperatury obróbki cieplnej, intensywność chłodzenia, medium chłodzące itd. Niewłaściwie przeprowadzona obróbka cieplna może być przyczyną odkształceń oraz pęknięć. Aby przewidzieć rozkład faz metalurgicznych, podczas obróbki cieplnej konieczne jest odpowiednie zaplanowanie zabiegów nagrzewania, wygrzewania oraz chłodzenia. Do tego celu w coraz większym stopniu stosuje się symulacje numeryczne [3, 6].

W pracy przedstawiono możliwości oprogramowania numerycznego *SYSWELD* w zakresie symulacji procesu spawania oraz obróbki cieplnej. Aby to zrealizować, opracowano model złącza spawanego oraz model elementu, dla którego prowadzi się proces hartowania.

2. Narzędzie numeryczne

Na rynku występują zaawansowane i rozbudowane środowiska obliczeniowe MES pozwalające na przeprowadzenie analiz zjawisk zachodzących w trakcie spawania oraz obróbki cieplnej elementów konstrukcyjnych. Pakietem oprogramowania tego typu jest *SYSWELD* opracowany przez *ESI Group*. W skład pakietu wchodzi kilka narzędzi. W tej pracy wykorzystano następujące:

- *Visual-Mesh* – preprocesor umożliwiający tworzenie elementów 1D, 2D i 3D oraz generowanie siatki elementów skończonych,
- *Visual-Weld* – modelowanie procesów spawania,
- *Visual-Heat Treatment* – modelowanie procesów obróbki cieplnej,
- *SYSWELD Solvers* – moduł obliczeniowy,
- *Visual-Viewer* – postprocesor pozwalający na analizę wyników, generowanie wykresów, map barwnych oraz animacji.

Pakiet *SYSWELD* pozwala na przeprowadzenie analiz nieliniowych obejmujących nieliniową geometrię dużych odkształceń, nieliniowe przewodzenie ciepła, izotropowe i kinematyczne umocnienie materiału czy przemiany fazowe. Narzędzie to dzięki uwzględnieniu wielu czynników pozwala na uzyskanie dużej zgodności wyników symulacji z rzeczywistą reakcją elementu lub konstrukcji. Symulacje zachodzące dzięki pakietowi *SYSWELD* mogą być prowadzone w szerokim zakresie, tj. zarówno ze spoiwem, jak i bez, dla źródeł ciepła wchodzących w bezpośredni fizyczny kontakt z elementem spawanym (zgrzewanie punktowe, zgrzewanie tarczowe), a także dla źródeł w bezpośredni kontakt niewchodzących (łuk elektryczny, wiązka laserowa, wiązka elektronów). Zakres symulacji obróbki cieplnej jest równie

szeroki i obejmuje m.in. odpuszczanie (laserowe, indukcyjne, wiązką elektronów, plazmą, tarciami), hartowanie, karbonizację i azotowanie.

W celu przeprowadzenia poprawnej symulacji niezbędna jest znajomość podstawowych danych dotyczących procesu, tj. metody stosowanej w procesie spawania, wartości energii liniowej procesu spawania, geometrii spawanego elementu bądź konstrukcji, własności materiałowych, temperatury podgrzewania, liczby spoin/ściągów oraz ich lokalizacji i kolejności spawania, sposobu mocowania łączonych elementów, parametrów obróbki cieplnej itp. Oprogramowanie zostało wyposażone w stosunkowo bogatą bazę materiałową uwzględniającą własności materiałowe w funkcji temperatury oraz zawartości poszczególnych faz.

Symulacja procesu spawania oraz obróbki cieplnej składa się z dwóch głównych etapów: analizy termo-metalurgicznej oraz analizy mechanicznej. W analizie termo-metalurgicznej uwzględnia się zachodzące zjawiska termiczne oraz związane bezpośrednio z nimi przemiany faz metalurgicznych w funkcji czasu. Uzyskane dane są następnie wykorzystywane jako wejściowe do analizy mechanicznej. Taka kolejność wynika z przyjętej zasady mówiącej, że zmiany mechaniczne (naprężenia, odkształcenia) nie zmieniają temperatury procesu, natomiast zmiana temperatury ma wpływ na naprężenia oraz odkształcenia.

Efektami symulacji są wyniki w postaci rozkładów pól i gradientów temperatur, faz metalurgicznych (ferryt, bainit oraz martenzyt), przemieszczeń, odkształceń, naprężeń własnych oraz twardości [5, 7, 8, 10, 14, 15].

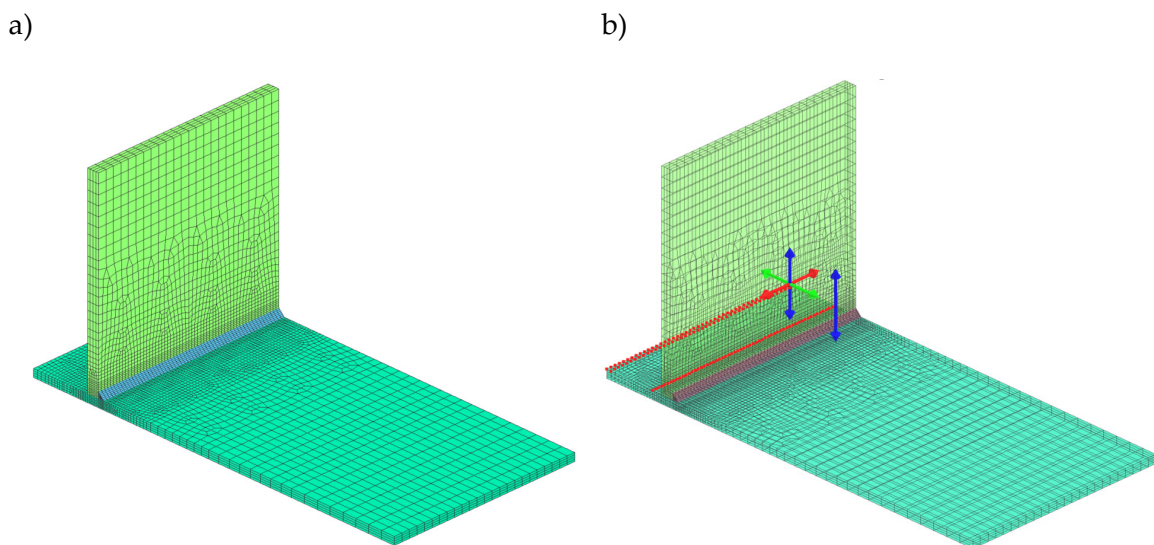
3. Przykłady obliczeniowe

Możliwości oprogramowania wchodzącego w skład pakietu SYSWELD zaprezentowano na dwóch przykładach: jednym uwzględniającym symulację połączenia spawanego oraz drugim – symulację procesu hartowania.

3.1. Połączenie spawane

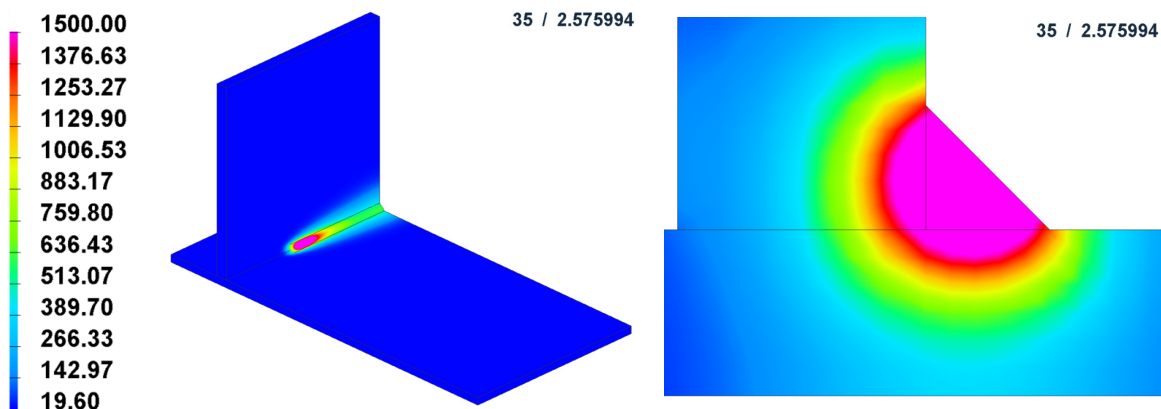
Pierwszy przykład dotyczy symulacji procesu spawania złącza teowego wykonanego ze stali S355J2G3. Charakterystyki materiałowe wybranej stali zawarte są w domyślnej bazie materiałowej programu. Zamodelowane złącze składało się z dwóch blach: dolnej o wymiarach 100 x 200 x 4 mm i górnej o wymiarach 100 x 100 x 6 mm. Model dyskretny MES przygotowany za pomocą narzędzia *Visual-Mesh* składał się z 27 404 trójwymiarowych elementów skończonych typu solid oraz z 33 184 węzłów (rys. 1). Na rysunku 1 przedstawiono również warunki brzegowe odpowiadające sposobowi zamocowania blachy dolnej (poziomej na rys. 1). Węzły ograniczone wiązaniami zostały oznaczone na czerwono. Węzły znajdujące się na krawędzi blachy zostały ograniczone we wszystkich kierunkach, natomiast węzły przy połączeniu – tylko w kierunku pionowym. Blacha górna (pionowa na rys. 1) nie miała żadnych wiązań. Siatkę zagęszczono w sąsiedztwie złącza oraz w obszarze do niego przyległym w celu zwiększenia dokładności analizy.

Parametry procesu spawania wprowadzono do modelu z wykorzystaniem narzędzia *Visual-Weld*. Założono, że złącze zostanie wykonane za pomocą metody MAG, która była symulowana z użyciem źródła ciepła w kształcie podwójnej elipsoidy (tzw. źródło Goldaka). Po wstępnej kalibracji w module *Heat Source Fitting* uzyskano źródła ciepła o długości 10 mm, szerokości 6 mm, głębokości wtopienia 3,5 mm, charakteryzujące się prędkością spawania wynoszącą 22 mm/s i energią liniową spawania 300 J/mm. Do symulacji powstawania połączenia wykorzystano metodę analizy ciągłej procesu spawania (*transient welding*). Metoda ta pozwoliła określić lokalne efekty wynikające z procesu spawania, takie jak rozkład temperatury w czasie (rys. 2), faz metalurgicznych (rys. 3), odkształceń (rys. 4) oraz naprężeń (rys. 5) [14]. Przedstawione mapy barwne uzyskano, korzystając z *Visual-Viewera*.



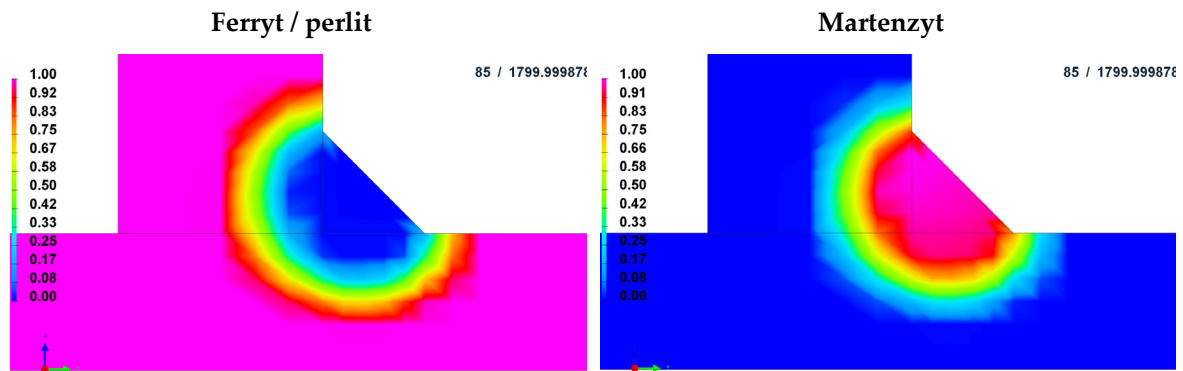
Rys. 1. Model dyskretny: a) widok, b) warunki brzegowe – sposób zamocowania [opracowanie własne]

Fig. 1. Discrete model: a) view, b) boundary conditions – fixing method [own study]



Rys. 2. Rozkład temperatur w trakcie spawania (°C) [opracowanie własne]

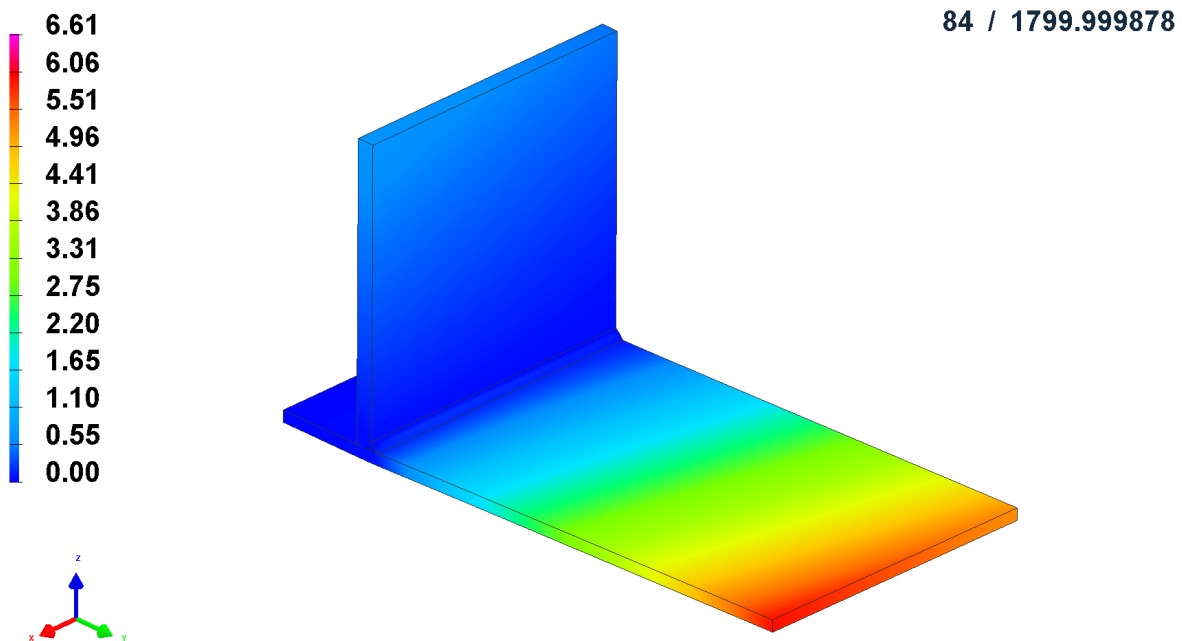
Fig. 2. Temperature distribution during welding (°C) [own study]



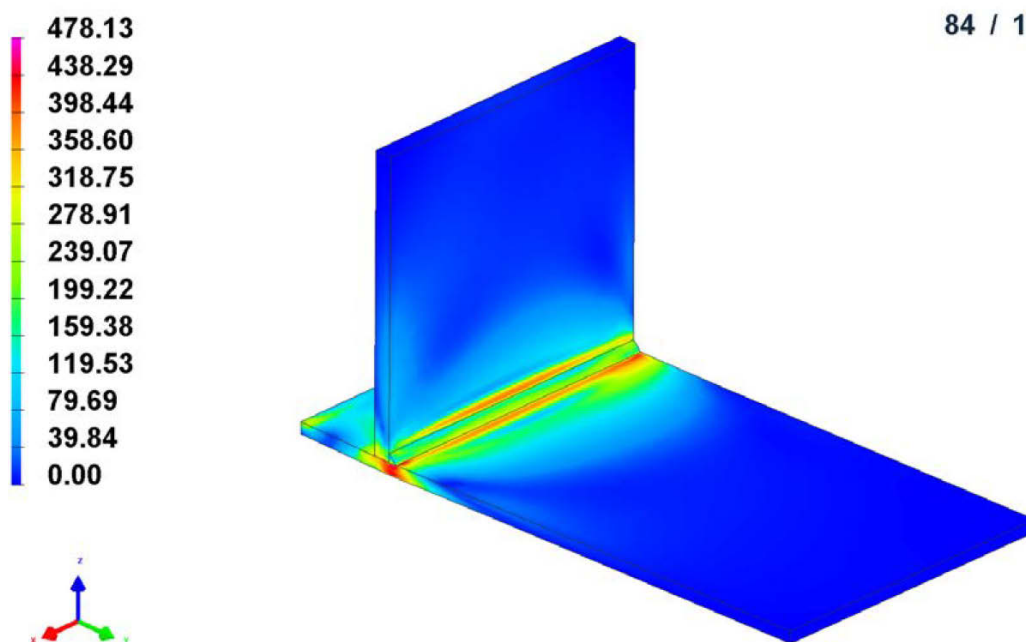
Rys. 3. Rozkład wybranych faz metalurgicznych po procesie spawania (%)
[opracowanie własne]

Fig. 3. Distribution of selected metallurgical phases after the welding process (%)
[own study]

Rozkład temperatur oraz wynikający z niego rozkład faz metalurgicznych pozwalają określić poprawność doboru parametrów spawania. Na podstawie wygenerowanych map rozkładu temperatury można określić głębokość wtopienia oraz sposób rozchodzenia się ciepła w połączeniu. Na podstawie przedstawionej struktury metalurgicznej można określić udział poszczególnych faz w złączy.



Rys. 4. Rozkład odkształceń całkowitych (mm) [opracowanie własne]
Fig. 4. Total strain distribution (mm) [own study]



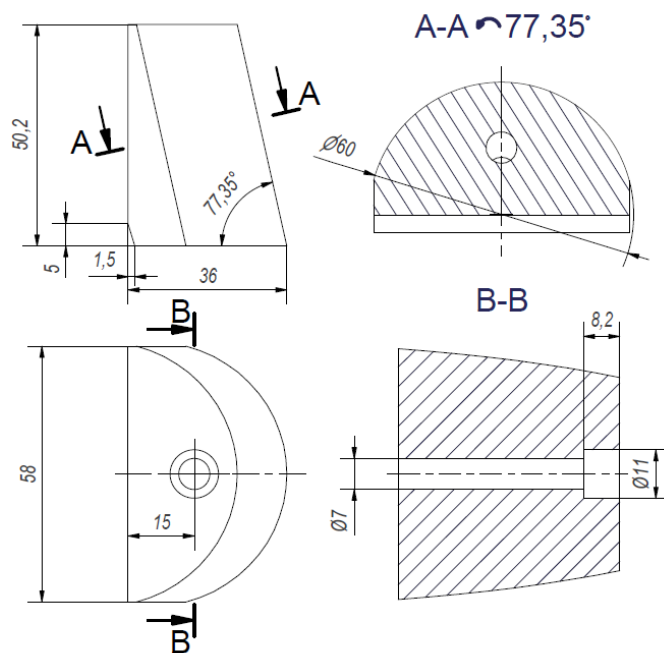
Rys. 5. Rozkład naprężeń zredukowanych wg hipotezy von Misesa (MPa)
[opracowanie własne]

Fig. 5. Distribution of equivalent von Mises stress (MPa)
[own study]

Rozkład odkształceń oraz ich wielkość zależne są od sposobu zamocowania elementu, również w tym przypadku widoczne jest znaczące odkształcenie na końcach łączonych blach, a szczególnie w skrajnym narożniku dolnej blachy od tej strony, w której proces spawania był kończony. Analiza odkształceń pozwala uzyskać cenne informacje, które posłużyć mogą do zmiany sposobu zamocowania elementów, kierunku spawania czy też parametrów procesu spawania. W analizowanym przypadku na mapie rozkładu naprężeń można zauważyć ich spiętrzenia w okolicy spoiny, szczególnie w dolnej, cieńszej blasze. Skupiska naprężeń pospawalniczych w tym złączy oraz możliwość wystąpienia obciążeń zmiennych zwiększają prawdopodobieństwo wystąpienia pęknięcia. Aby uniknąć takiej sytuacji, można zastosować co najmniej kilka rozwiązań. Jednym z nich jest zaplanowanie dodatkowego wygrzewania przed spawaniem, czyli wyżarzania odprężającego, lub – jak w przypadku odkształceń – można zmienić sposób mocowania bądź parametry procesu.

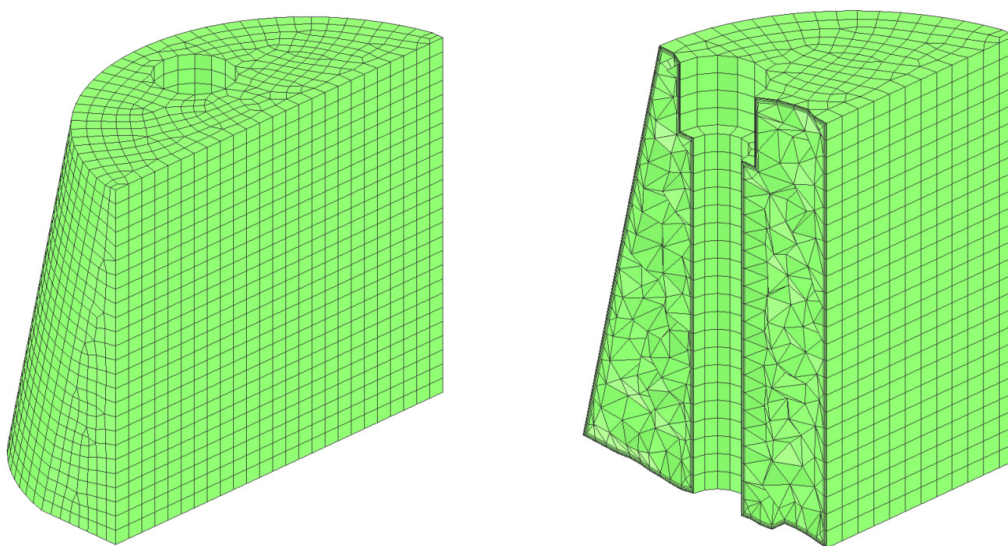
3.2. Obróbka cieplna

Proces obróbki cieplnej z wykorzystaniem pakietu *SYSWELD* został zaprezentowany na przykładzie hartowania szczęki maszyny wytrzymałościowej wykonanej ze stali 18CrNiMo7-6. Jej model materiałowy dostępny jest w bazie materiałowej programu. Wymiary omawianej szczęki przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Podstawowe wymiary analizowanej szczęki [opracowanie własne]
Fig. 6. Basic dimensions of the analyzed grip [own study]

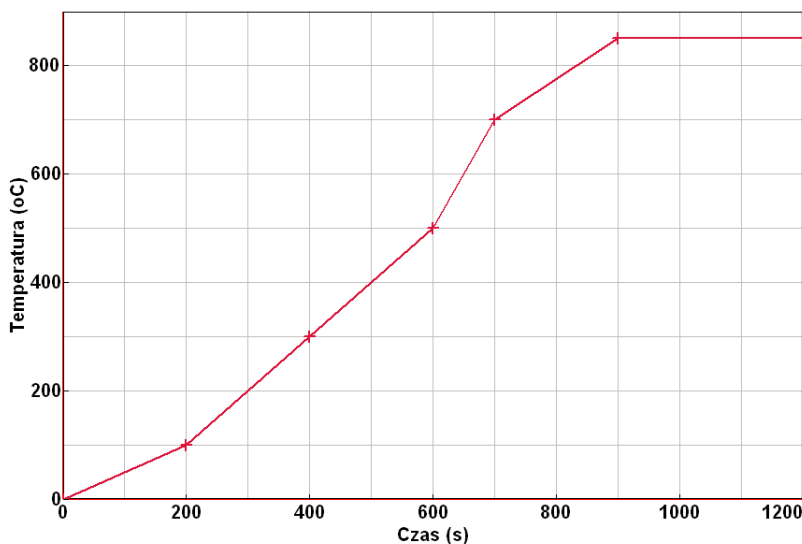
Bryłowy model szczęki przygotowano w oprogramowaniu *Autodesk INVENTOR*. Został on zaimportowany do programu *Visual-Mesh*, w którym wygenerowano siatkę elementów skończonych, składającą się z 47 850 trójwymiarowych elementów skończonych typu solid oraz z 20 165 węzłów (rys. 7). Siatka MES została zagęszczona w sąsiedztwie powierzchni zewnętrznych.



Rys. 7. Model dyskretny analizowanej szczęki [opracowanie własne]
Fig. 7. Discrete model of the analysed grip [own study]

Symulację procesu obróbki cieplnej przeprowadzono za pomocą narzędzia *Visual-Heat Treatment*, w odniesieniu do którego określono parametry nagrzewania, wygrzewania oraz rodzaj ośrodka chłodzącego. Zgodnie z kartą materiałową

dla wybranej stali temperatura austenitowania powinna wynosić 850°C. Na rysunku 8 przedstawiono przebieg symulowanego procesu nagrzewania oraz wygrzewania elementu. Jako ośrodek chłodzący wybrano wodę. Proces hartowania przeprowadzono wraz z końcem wygrzewania.

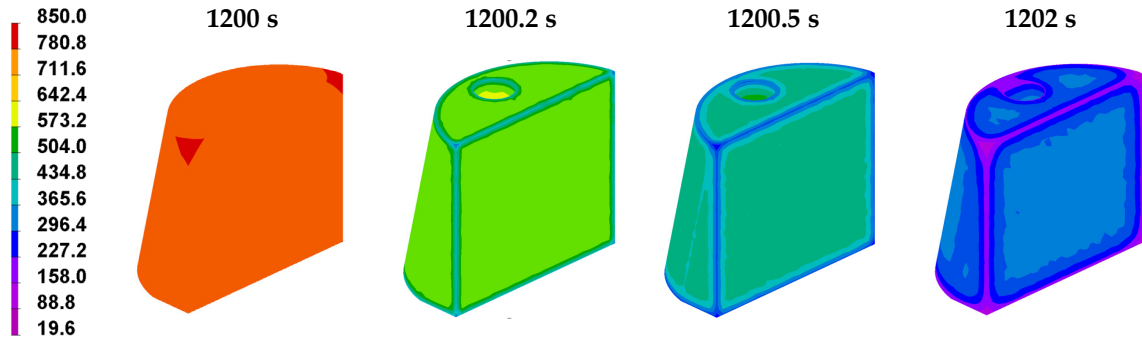


Rys. 8. Wykres przedstawiający planowany proces grzania szczęki [opracowanie własne]

Fig. 8. Diagram showing the planned heating of the grip [own study]

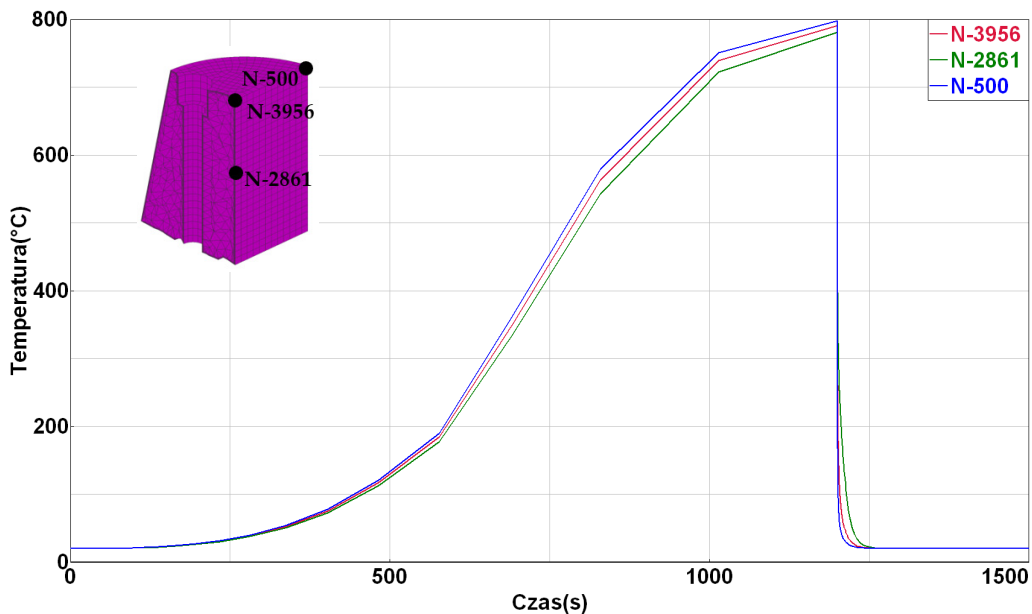
Zgodnie z [3] dla krawędzi zewnętrznych analizowanej szczęki zabieg wygrzewania powinien trwać znacznie dłużej. Czas ten skrócono w celu zaprezentowania faz powstałych podczas hartowania w chwili, w której nie nastąpiło austenitowanie obejmujące całą objętość obrabianego cieplnie przedmiotu.

Wyniki symulacji obróbki cieplnej poddano analizie z wykorzystaniem narzędzia *Visual-Viewer*. Za jego pomocą określono mapy zmian rozkładu temperatury podczas procesu hartowania (rys. 9). Wyznaczono wykres przebiegu zmiany temperatury w czasie w wybranych węzłach modelu (rys. 10). Węzły te to miejsca, w których zaobserwowano występowanie uszkodzeń w trakcie eksploatacji szczęki. Program *Visual-Viewer* wykorzystano również do przedstawienia zmian rozkładu poszczególnych faz metalurgicznych w czasie obróbki cieplnej (tab. 1). Wygenerowano mapę obrazującą rozkład twardości na powierzchni szczęki (rys. 11).



Rys. 9. Rozkład temperatury w trakcie oraz zaraz po zainicjowaniu procesu hartowania ($^{\circ}\text{C}$) [opracowanie własne]

Fig. 9. Temperature distribution during and immediately after the initiation of the hardening process ($^{\circ}\text{C}$) [own study]



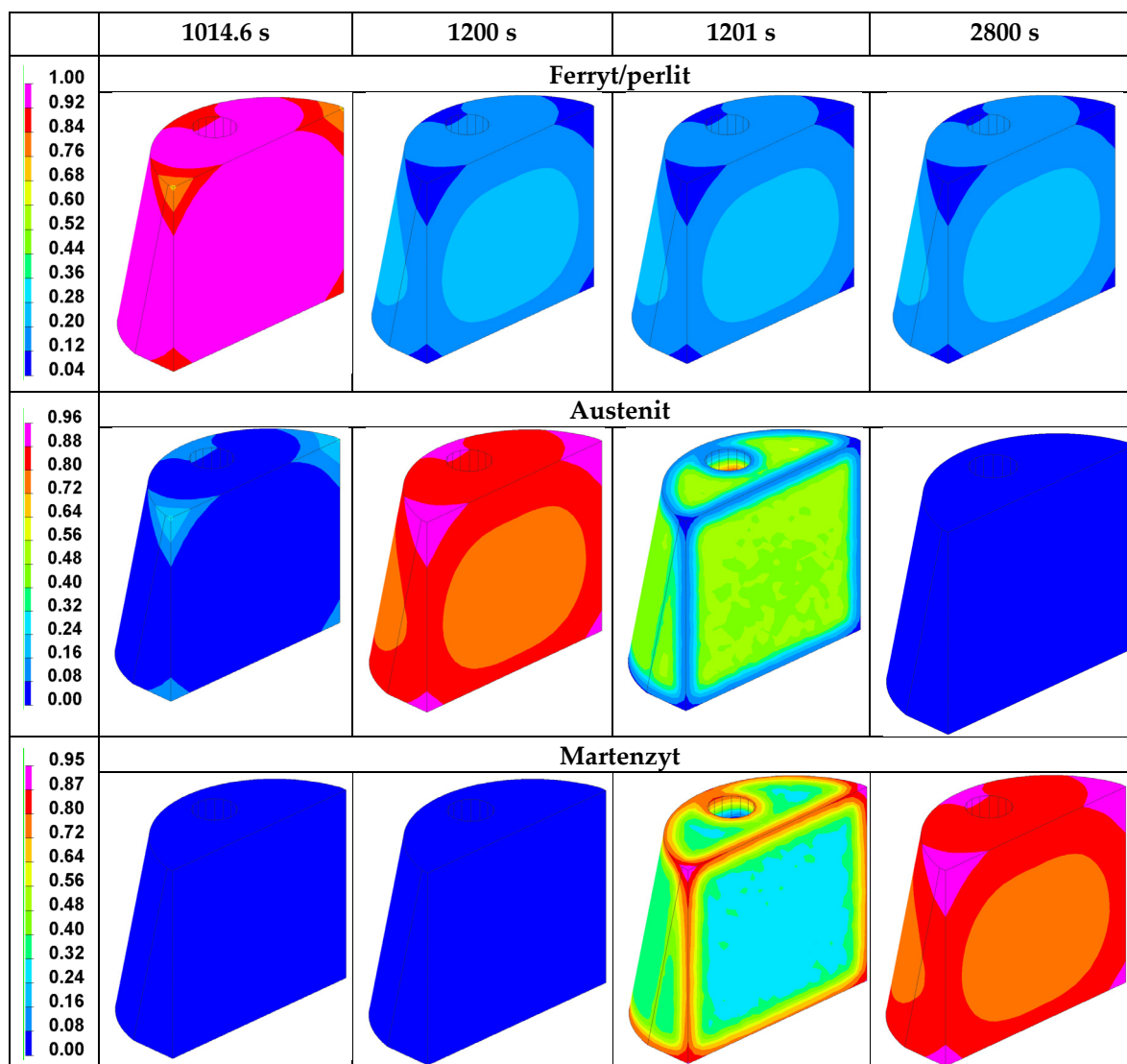
Rys. 10. Wykres zmiany temperatury w czasie w wybranych węzłach [opracowanie własne]

Fig. 10. Graph of temperature change over time at selected nodes [own study]

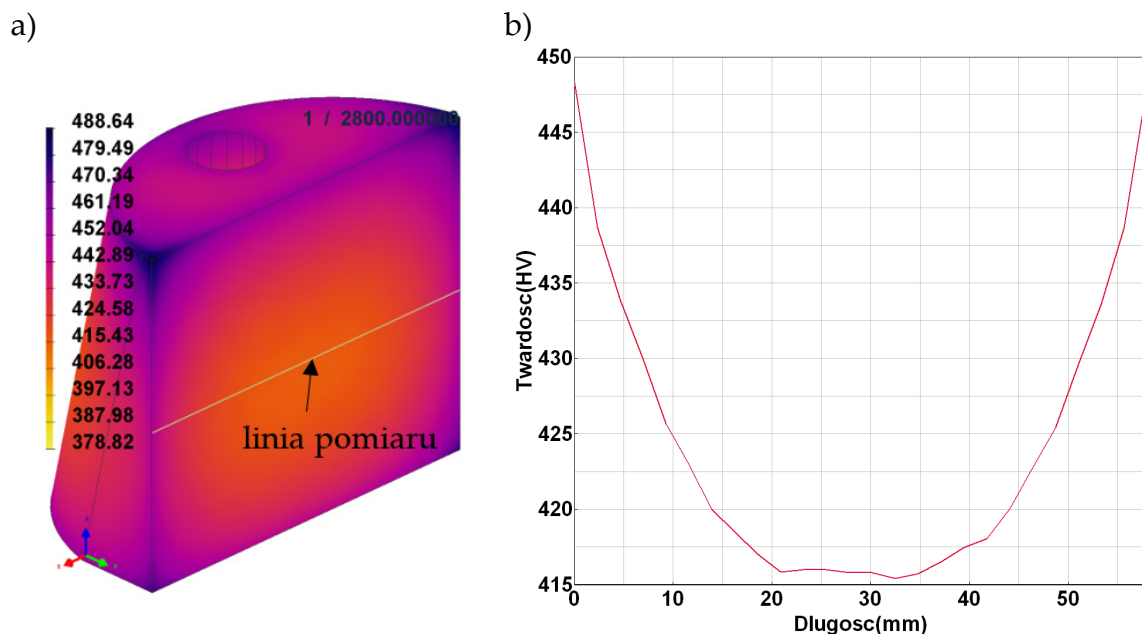
Rozkład temperatur w zakresie czasu, w którym następuje hartowanie elementu, obrazuje dynamikę procesu. Można zauważyć, że zgodnie z dostępną wiedzą temperatura spada najgwałtowniej w sąsiedztwie krawędzi elementu. Spadek temperatury dla punktu N-2861 znajdującego się w środkowej części zamodelowanych szczęk nie jest aż tak gwałtowny. Są to przesłanki do stwierdzenia, że proces odzwierciedla w pewnym stopniu warunki rzeczywiste. Przebieg temperatur dla węzłów, w obrębie których następują uszkodzenia struktury materiału w procesie eksploatacji, pozwala sprawdzić, czy proces nagrzewania oraz wygrzewania przebiega w tych punktach prawidłowo.

Tabela 1. Przebieg zmian rozkładu poszczególnych faz podczas obróbki cieplnej (%) [opracowanie własne]

Table 1. Changes in the distribution of individual phases during heat treatment (%) [own study]



Na podstawie przedstawionej powyżej tabeli można stwierdzić zależność zmian procentowych poszczególnych faz w czasie. Wraz ze wzrostem temperatury elementu zachodził proces przemiany ferrytu/perlitu w austenit. Proces chłodzenia powodował gwałtowną przemianę austenitu w martenzyt. Na rozkładzie map barwnych zauważyć można, że szczeka nie uległa całkowitej przemianie ferrytu/perlitu w austenit, co spowodowane było zbyt krótkim czasem wygrzewania. Na skutek tego nie uzyskano znaczącego udziału fazy martenzytu w objętości szczęki, co ma odzwierciedlenie w rozkładzie twardości. Na wykresie można dostrzec zróżnicowanie w wartościach twardości na powierzchni szczęki czołowej, co podczas eksploatacji skutkować może przedwczesnym jej uszkodzeniem.



Rys. 11. Wyniki twardości (HV): a) mapa barwna, b) wykres rozkładu twardości na powierzchni szczęki (zgodnie z linią pomiaru) [opracowanie własne]

Fig. 11. Hardness (HV) results: a) color map, b) hardness distribution diagram on the grip surface (according to the measuring line) [own study]

4. Podsumowanie

W przypadku złącza teowego przedstawiona symulacja procesu spawania pozwoliła na wyznaczenie rozkładów temperatury oraz faz metalurgicznych powstałych w złączu, dzięki czemu możliwe jest określenie rozmiarów strefy wpływu ciepła (SWC). Mapy odkształceń całkowitych w uzyskanym złączu mogą być wskazówkami odnośnie do konieczności wprowadzenia zmian w sposobie zamocowania łączonych elementów, wielkości spoiny, kierunku spawania czy też parametrów spawania. Rozkłady naprężeń zredukowanych w zależności od zastosowania elementu wskazywać mogą na konieczność wprowadzenia dodatkowej obróbki odprężającej po spawaniu, zwiększenia temperatury elementów przed procesem spawania, a także, jak w przypadku odkształceń, sugerują zmianę sposobu zamocowania elementów czy też zmianę parametrów spawania.

Zastosowanie symulacji procesu obróbki cieplnej pozwoliło uzyskać zamierzony efekt zbyt krótkiego zabiegu wygrzewania, gdyż analizowany element nie nagrzał się do temperatury 850°C w całej objętości. Skutkiem tego proces austenitowania nie przebiegł w całej szczęce, co przy przedwczesnym chłodzeniu poskutkowało niepełną przemianą struktury w martenzyt oraz znalazło swoje odzwierciedlenie w rozkładzie twardości.

Na podstawie przeprowadzonych analiz numerycznych spawania złącza teowego oraz hartowania szczęki można stwierdzić, że pakiet SYSWELD stanowi wartościowe narzędzie ułatwiające planowanie procesów spawania czy też obróbki cieplnej. Niewątpliwą jego zaletą jest fakt, że zmiany zachodzące podczas poszczególnych procesów można śledzić w sposób ciągły. Wykonanie oraz śledzenie poszczególnych etapów symulacji pozwala lepiej poznać dany proces, poddać go op-

tymalizacji i znaleźć odpowiednie wartości jego parametrów bez ponoszenia dodatkowych kosztów prototypowania, co ma szczególne znaczenie w przypadku planowania badań eksperymentalnych na obiektach rzeczywistych.

Bibliografia

- [1] Agaciak, S., Nowacki, J., Sajek, A., „Możliwości realizacji numerycznej symulacji spawania łukowego”, *Badania Nieniszcz. i Diagnostyka* 2(2), (2019), 3–11.
- [2] Deshpande, A.A., Tanner, D.W.J., Sun, W., Hyde, T.H., McCartney, G., “Combined butt joint welding and post weld heat treatment simulation using SYSWELD and ABAQUS”, *Proc. Inst. Mech. Eng. Part L J. Mater. Des. Appl.* 225(1), (2011), 1–10.
- [3] Dobrzański, L.A., „Materiały inżynierskie i projektowanie materiałowe. Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo”, Wydawnictwo WNT, Warszawa 2006.
- [4] Ferenc, K.F.J., „Konstrukcje spawane”, Wydawnictwo WNT, Warszawa 2003.
- [5] Giętka, T., Ciechacki, K., Kik, T., “Numerical Simulation of Duplex Steel Multipass Welding”, *Arch. Metall. Mater.*, 61(4), (2016), 1975–1984.
- [6] Jemioło, S., Gajewski, M., „Symulacja MES obróbki cieplnej wyrobów stalowych z uwzględnieniem zjawisk termometalurgicznych. Część 1. Nieustalony przepływ ciepła i przejścia fazowe”, Oficyna Wydawnicza PW, Warszawa 2005.
- [7] Jemioło, S., Gajewski, M., „Symulacja MES obróbki cieplnej wyrobów stalowych z uwzględnieniem zjawisk termometalurgicznych. Część 2. Przykłady numeryczne z zastosowaniem programu SYSWELD”, Oficyna Wydawnicza PW, Warszawa 2005.
- [8] Kik, T., “Numerical analysis of MIG welding of butt joints in aluminium alloy”, *Biul. Inst. Spaw.* 3, (2014), 37–45.
- [9] Kik, T., Górka, J., Kotarska, A., Poloczek, T., “Numerical verification of tests on the influence of the imposed thermal cycles on the structure and properties of the S700MC heat-affected zone”, *Metals (Basel)*. 10(7), (2020), 1–23.
- [10] Kik, T., Slováček, M., Wyględacz, B., „Analiza numeryczna procesu spawania wielościęgowego złącza teowego oraz obróbki cieplnej po spawaniu”, *Przegląd Spaw. – Weld. Technol. Rev.* 88, (2016), 38–45.
- [11] Rusiński, E., Czmochoński, J., Smolnicki, T., „Zaawansowana metoda elementów skończonych w konstrukcjach nośnych”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2000.
- [12] Skibicki, A., „Wyznaczanie obszarów badań diagnostycznych spoin na podstawie numerycznej symulacji rozkładów temperatury i naprężeń”, *Stud. Mater. Pol. Stowarzyszenia Zarządzania Wiedzą* 69, (2014), 212–224.
- [13] Slováček, M., Kik, T., “Use of Welding Process Numerical Analyses as Technical Support in Industry. Part 3: Industrial Examples – Transport Industry”, *Biul. Inst. Spaw.* 6, (2015), 38–45.
- [14] M. Slováček, M. Vanek, i T. Kik, “Use of Welding Process Numerical Analyses as Technical Support in Industry. Part 2: Methodology and Validation”, *Biul. Inst. Spaw.* 5, (2015), 25–32.
- [15] “Welding simulation user guide”, Sysweld manual, ESI Group, 2016.



© 2020 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/>).