

Wpływ modeli źródeł ciepła na proces symulacji przetapiania laserowego w środowisku SYSWELD

Influence of heat source models on simulation of laser remelting in SYSWELD environment

Streszczenie

W artykule przedstawiono porównanie przetapiania laserowego do symulacji tego procesu wykonanej w środowisku SYSWELD. Zbadano parametry geometryczne uzyskanych przetopień podczas przetapiania laserem dyskowym Tru-Disk 3302 oraz diodowym ROFIN DL 020, porównując z danymi z procesu symulacji. Przedstawiono zastosowanie różnorodnych modeli źródeł ciepła i ich wpływ na prawidłowość modelowanego procesu. W wyniku analiz uzyskano rozkłady pól temperatur, które następnie porównano z wynikami z rzeczywistych prób.

Słowa kluczowe: przetapianie laserowe; symulacje numeryczne; modele źródeł ciepła; kalibracja; SYSWELD; Goldak; 3D-Gauss

Abstract

The article presents a comparison of laser remelting and simulation of this process carried out in the SYSWELD environment. Geometric parameters of obtained remelts were examined, comparing with the data received from the simulation process. The application of various models of heat sources and their influence on the correctness of the modelled process is presented. As a result of the analyzes, the distributions of temperature fields were obtained, which were then compared to the results from actual tests.

Keywords: laser remelting; numerical simulations; heat source model; calibration; SYSWELD; Goldak; 3D-Gauss

Wstęp

Dostępne na rynku zaawansowane pakiety bazujące na metodzie elementów skończonych odgrywają kluczową rolę w podniesieniu jakości oraz trwałości wytwarzanych wyrobów. Zastosowanie symulacji numerycznych w postaci programów dedykowanych do procesów spawania pozwala na wykorzystanie ich do szczegółowego zrozumienia procesu na podstawie analizy wpływu poszczególnych parametrów. W efekcie, już na etapie projektowania można wyeliminować potencjalne wady produkcyjne czy testować różne warianty rozwiązań tj. kolejność spawania, obróbka cieplna po spawaniu, temperatura wstępnego podgrzewania. Dzięki ograniczeniu ilości potrzebnych do wykonania prototypów proces wytwarzania może zostać w znaczny sposób przyspieszony, a koszty wytwarzania zredukowane [4÷6].

Modele źródeł ciepła

Czynniki wpływające na przepływ ciepła w przestrzeni pomiędzy źródłem a elementem spawanym (m.in. kondukcja, konwekcja, promieniowanie, efekt Joule'a) określają

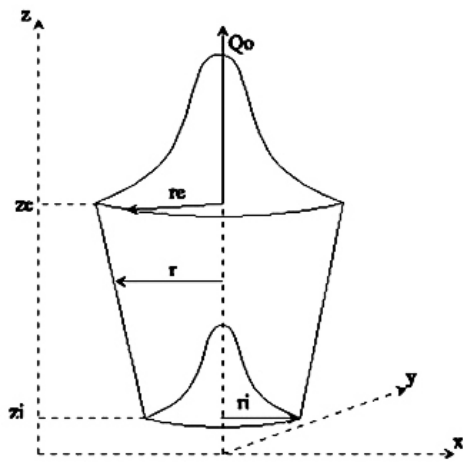
parametry i kształt uzyskanego jeziora ciekłego metalu. Kształt jeziora jest ściśle uzależniony od rozkładu ciepła, jednak w symulacjach komputerowych nie można rozpatrywać wymienionych czynników indywidualnie. Wynika to z faktu, iż mnogość tych czynników wpływa na złożoność obliczeń matematycznych, co w efekcie uniemożliwiłoby uzyskanie skomplikowanych wyników w wymaganym czasie. W efekcie stosuje się modele źródeł ciepła, które wyrażane są w sposób analityczny [1÷3].

Model stożkowy 3D-Gauss

W celu zamodelowania procesów wysokoenergetycznych stosowany jest model źródła ciepła o kształcie stożkowym – 3D Gauss, który przedstawiony został na rysunku 1. Taki typ źródła umożliwia prawidłowe zaprojektowanie symulacji spawania przy użyciu lasera czy wiązki elektronów charakteryzujących się dużą gęstością mocy. Z parametrycznego punktu widzenia model określony jest za pomocą mocy źródła ciepła, jego promienia oraz głębokości wtopienia [6].

Mgr inż. Tomasz Poloczek, dr inż. Tomasz Kik – Politechnika Śląska.

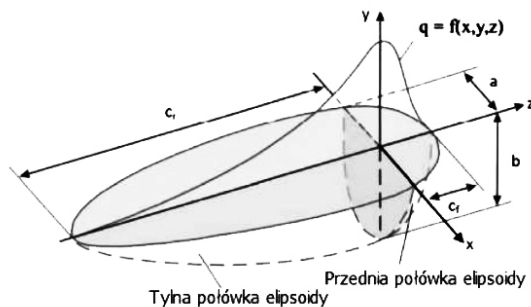
Autor korespondencyjny/Corresponding author: tomasz.poloczek@polsl.pl



Rys. 1. Źródło ciepła w postaci stożka [1]
Fig. 1. Cone heat source [1]

Model Goldaka

Model źródła ciepła zaproponowany w 1984 roku przez Johna Goldaka składa się z połączenia dwóch elipsoid, które mają miejsce przecięcia w płaszczyźnie określonej przez centralny punkt źródła ciepła i prostopadle do kierunku spawania. Istotną zaletą opisywanego źródła jest możliwość łatwego manipulowania kształtem przez określenie geometrii jego przedniej i tylnej strefy. Każda elipsoida identyfikuje obszar stopionego materiału w określonej części jeziorka. Pozwala to na dostosowanie modelu zarówno do dużych gęstości mocy – spawanie techniką z oczkiem, jak i do procesów o płytkim wtopieniu – spawanie techniką z jeziorkiem [3]. Główny obszar zastosowania modelu Goldaka to symulacja procesów spawania łukowego nisko- i średnioenergetycznego – MIG/MAG, TIG, łuk kryty. Biorąc pod uwagę obecny stan techniki, taki model zapewnia najlepszy opis matematyczny rzeczywistego stanu dla łukowych procesów spawania –



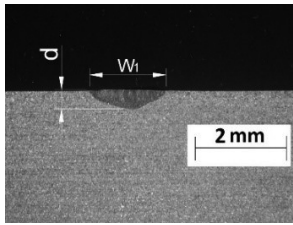
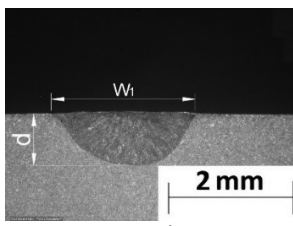
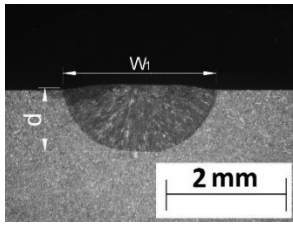
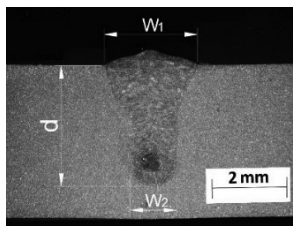
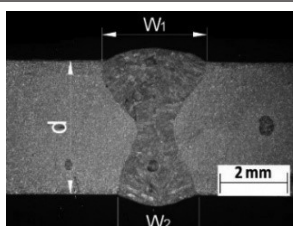
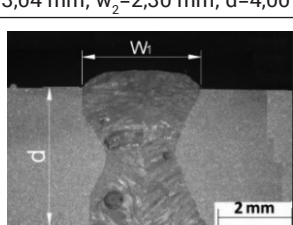
Rys. 2. Model źródła ciepła Goldaka [3]
Fig. 2. Goldak's heat source [3]

Badania własne

Zakres pracy obejmował przeprowadzenie prób przetapiania płaskich próbek o wymiarach 150 x 50 x 4 mm ze stali austenicznej X5CrNi18-10, dwoma typami laserów, różniących się rozkładem energii na powierzchni wiązki laserowej oraz przeprowadzenie numerycznych analiz termometalurgicznych w programie SYSWELD, w celu ustalenia zasad modelowania tych źródeł ciepła. Podczas modelowania wykorzystano różne warianty źródeł ciepła – model stożkowy oraz Goldaka, określając ich przydatności do symulacji procesów laserowych. Przetapianie zrealizowano przy wykorzystaniu trzech odmiennych mocy wiązki promieniowania wykorzystując w tym celu następujące typy laserów: HPDL

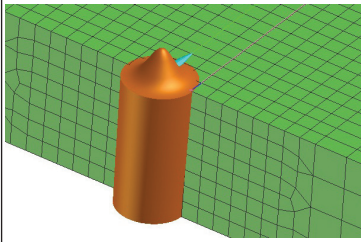
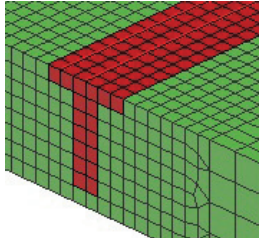
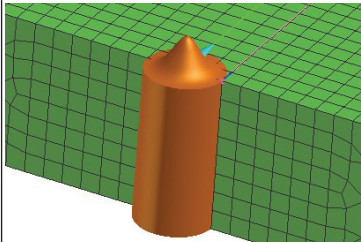
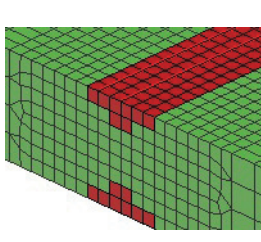
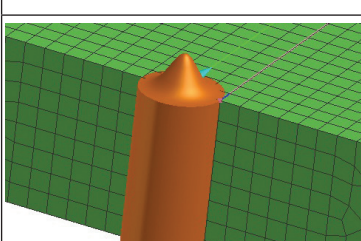
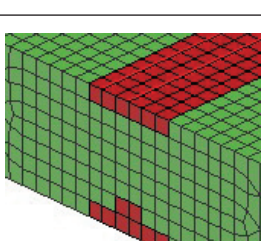
DL 020 wyprodukowany przez ROFIN SINAR oraz TruDisk 3302 firmy TRUMPF. Proces przetapiania został przeprowadzony z prędkością posuwu głowicy laserowej wynoszącej 0,5 m/min przy osłonie gazowej w postaci argonu, którego przepływ wynosił 18 l/min. Parametry kolejnych ściągów oraz ich zgłady metalograficzne makroskopowe zostały przedstawione w tabelicy I.

Tablica I. Parametry poszczególnych ściągów przetopień
Table I. Parameters of beads during laser remelting

Numer próbki	Moc wiązki [W]	Charakterystyczne wymiary przetopienia
HPDL-1000W	1000	 $w_1=1,63$ mm; $d=0,45$ mm
HPDL-1500W	1500	 $w_1=2,26$ mm; $d=0,87$ mm
HPDL-2000W	2000	 $w_1=2,51$ mm; $d=1,03$ mm
TruDisk-1000W	1000	 $w_1=2,44$ mm; $w_2=1,12$ mm; $d=3,16$ mm
TruDisk-1500W	1500	 $w_1=3,04$ mm; $w_2=2,30$ mm; $d=4,00$ mm
TruDisk-2000W	2000	 $w_1=3,16$ mm; $w_2=3,21$ mm; $d=4,00$ mm

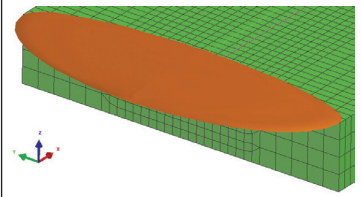
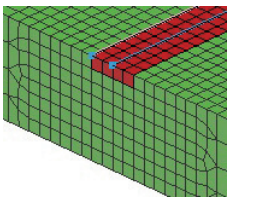
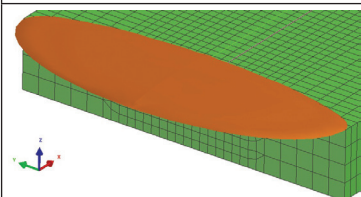
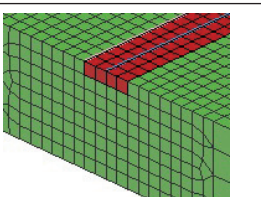
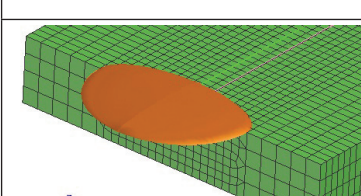
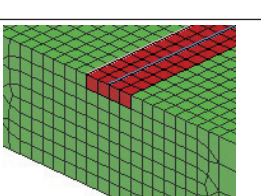
Tablica II. Parametry źródła ciepła oraz przedstawienie elementów skończonych obciążonych tym źródłem ciepła podczas przetapiania laserem dyskowym

Table II. Parameters of the heat source and the presentation of finite elements loaded with this heat source during disk laser remelting process

Model źródła ciepła i jego parametry	Sposób obciążenia elementów źródłem ciepła
TruDisk-1000W	
 <p data-bbox="491 342 818 421">Górna średnica modelu – 2,1 mm Dolna średnica modelu – 2,0 mm Głębokość penetracji – 4 mm</p>	 <p data-bbox="1150 353 1425 409">Energia liniowa – 125 J/mm Sprawność źródła – 0,9</p>
TruDisk-1500W	
 <p data-bbox="491 640 818 719">Górna średnica modelu – 2,0 mm Dolna średnica modelu – 2,0 mm Głębokość penetracji – 4 mm</p>	 <p data-bbox="1150 647 1425 703">Energia liniowa – 180 J/mm Sprawność źródła – 0,9</p>
TruDisk-2000W	
 <p data-bbox="491 954 818 1032">Górna średnica modelu – 2,0 mm Dolna średnica modelu – 2,0 mm Głębokość penetracji – 4 mm</p>	 <p data-bbox="1150 965 1425 1021">Energia liniowa – 210 J/mm Sprawność źródła – 0,9</p>

Tablica III. Parametry źródła ciepła oraz przedstawienie elementów skończonych obciążonych tym źródłem ciepła podczas przetapiania laserem diodowym

Table III. Parameters of the heat source and the presentation of finite elements loaded with this heat source during diode laser remelting process

Model źródła ciepła i jego parametry	Sposób obciążenia elementów źródłem ciepła
HPDL-1000W	
 <p data-bbox="499 1440 818 1518">Długość modelu – 7 mm Szerokość modelu – 20 mm Głębokość penetracji – 0,45 mm</p>	 <p data-bbox="1150 1451 1425 1507">Energia liniowa – 120 J/mm Sprawność źródła – 0,63</p>
HPDL-1500W	
 <p data-bbox="499 1693 818 1771">Długość modelu – 7 mm Szerokość modelu – 20 mm Głębokość penetracji – 0,87 mm</p>	 <p data-bbox="1150 1704 1425 1760">Energia liniowa – 160 J/mm Sprawność źródła – 0,62</p>
HPDL-2000W	
 <p data-bbox="512 1946 818 2024">Długość modelu – 7 mm Szerokość modelu – 10 mm Głębokość penetracji – 0,5 mm</p>	 <p data-bbox="1150 1957 1425 2013">Energia liniowa – 180 J/mm Sprawność źródła – 0,62</p>

W kolejnym etapie wykorzystano program SYSWELD w celu utworzenia modelu blachy, na którym wykonane zostały przetopienia. Możliwość przeprowadzenia symulacji procesu przetapiania dla danego materiału uzależniona jest od bazy materiałowej jaka jest w dyspozycji na danym stanowisku. Na obecną chwilę można w niej znaleźć materiały takie jak: stale niestopowe oraz stopowe, stopy aluminium, stopy tytanu oraz odlewnicze stopy z żelaza. Dla każdego urządzenia emitującego promieniowanie laserowe dobrano źródło ciepła posiadające odpowiedni kształt umożliwiającą właściwą symulację procesu (model Goldaka o kształcie podwójnej elipsoidy dla procesu przetapiania laserem diodowym oraz model stożkowy dla procesu przetapiania laserem dyskowym). Parametry zastosowanych źródeł ciepła zostały przedstawione w tablicach II i III.

Wyniki badań oraz ich analiza

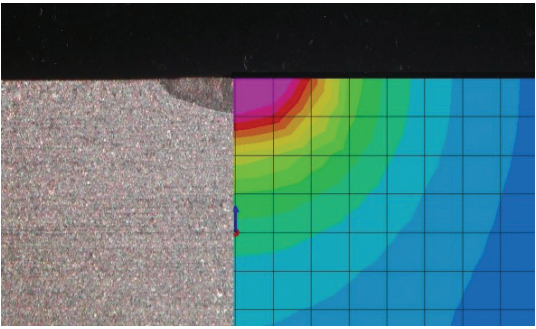
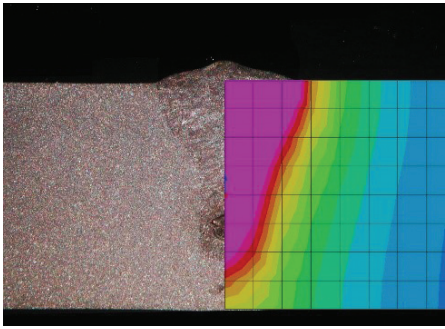
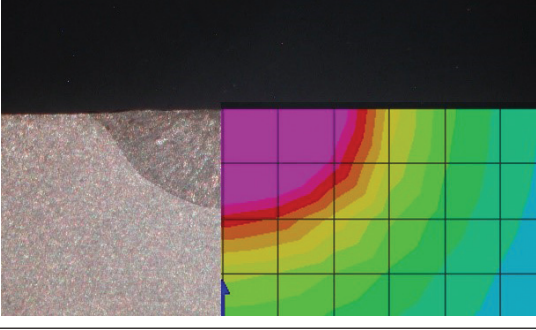
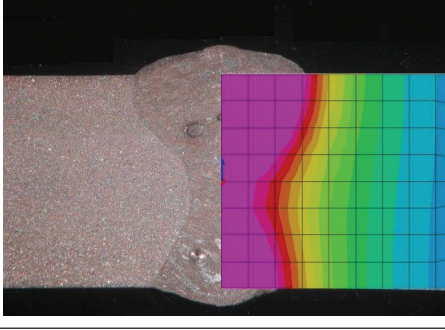
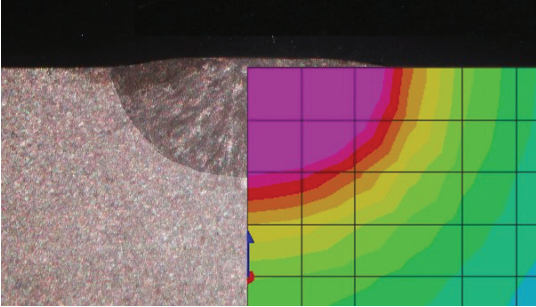
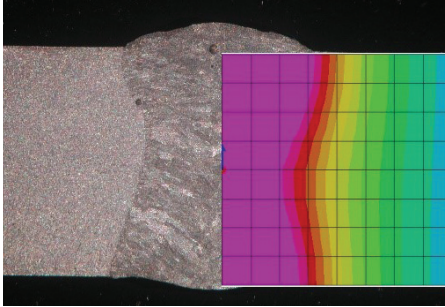
Na podstawie pomiaru charakterystycznych wymiarów (szerokości i głębokości wtopienia) podczas przetapiania oraz symulacji tego procesu w programie SYSWELD dokonano analizy otrzymanych danych. Obliczono względne

(w odniesieniu do rzeczywistych próbek) oraz bezwzględne różnice poszczególnych wymiarów, które zostały przedstawione na rysunkach 3 oraz 4.

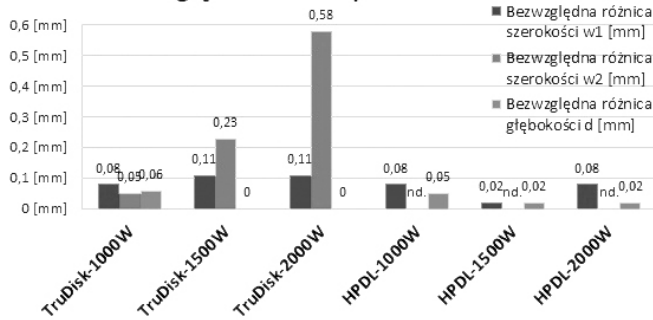
Największą różnicę pomiędzy charakterystycznymi parametrami przetopienia uzyskanymi z przeprowadzonych prób oraz wyników symulacji zaobserwowano dla źródła w postaci lasera dyskowego generującego moc 1,5 kW, 2 kW oraz lasera diodowego generującego wiązkę promieniowania o mocy 1 kW. Maksymalna bezwzględna różnica szerokości przetopienia od strony przeciwległej oddziaływania źródła ciepła – parametr w_2 dla próbki „TruDisk-2000W” wynosiła 0,58 mm, co stanowi odpowiednio 17,42% różnicy względnej. Pozostałe parametry głębokości i szerokości były zbliżone wobec siebie generując różnice względne z zakresu 0,88÷4,91%.

Uzyskane w procesie symulacji kształty jeziora spawalniczego wiernie odzwierciedlają dane otrzymane z próbek rzeczywistych. Jest to możliwe dzięki właściwemu doborowi źródeł ciepła do danego procesu, jego kalibracji, jak i odpowiedniemu obciążeniu poszczególnych elementów skończonych źródłem ciepła. Jedynie w przypadku zastosowania lasera dyskowego zaobserwowano wzrostowy trend różnicy szerokości przetopienia w_2 wraz ze zwiększaniem mocy źródła.

Tablica IV. Zestawienie rzeczywistych i symulowanych kształtów przetopień
Table IV. A comparison of real and simulated shapes of remelts

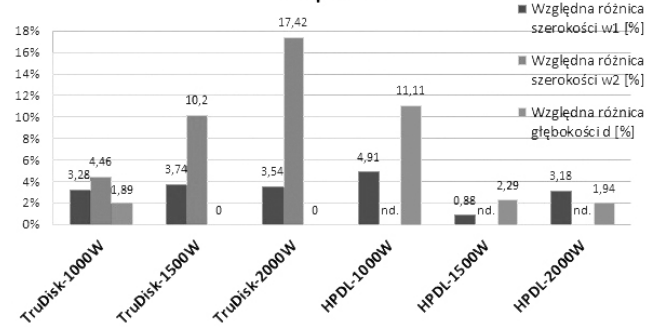
TruDisk-1000W	HPDL-1000W
	
TruDisk-1500W	HPDL-1500W
	
TruDisk-2000W	HPDL-2000W
	

Bezwzględne różnice szerokości i głębokości wtopienia



Rys. 3. Bezwzględne różnice szerokości i głębokości wtopienia pomiędzy próbkami a uzyskanymi modelami z procesu symulacji
Fig. 3. Absolute differences in the width and depth of the penetration between the samples and the obtained models from the simulation process

Względne różnice szerokości i głębokości wtopienia



Rys. 4. Względne różnice szerokości i głębokości wtopienia pomiędzy próbkami a uzyskanymi modelami z procesu symulacji
Fig. 4. Relative differences in the width and depth of the penetration between the samples and the obtained models from the simulation process

Podsumowanie

Program SYSWELD w sposób precyzyjny umożliwia symulacje laserowych procesów spawalniczych, pozwalając na właściwe odzwierciedlenie geometrycznych kształtów przetopień oraz jeziora spawalniczego. W wyniku analizy otrzymanych danych udowodniono, że model źródła ciepła w postaci podwójnej elipsoidy oprócz procesów niskoenergetycznych znajduje również zastosowanie przy modelowaniu spawania laserem diodowym. Przez zastosowanie źródła ciepła o odpowiednio dużej objętości jesteśmy w stanie generować równomierny rozkład energii na powierzchni ogniska wiązki, tak jak ma to miejsce w przypadku laserów diodowych. Tworzenie modeli dyskretnych, jak i właściwa kalibracja parametrów symulacji to długotrwały i żmudny proces, jednak informacje uzyskane w końcowym efekcie pozwalają w dokładny sposób przewidzieć wpływ poszczególnych parametrów na przebieg procesów spawalniczych.

Literatura

- [1] Rochalski D., Golański D., Chmielewski T.: Modele spawalniczych źródeł ciepła w analizie pola temperatury, *Przegląd Spawalnictwa*, vol. 89, 5/2017, s.109-112.
- [2] Bradáč J.: Calibration of heat source model in numerical simulations of fusion welding, *Machines, Technologies, Materials*, no. 11, pp. 9-12, 2013.
- [3] Joshi S., Hildebrand J., Aloraier A., Rabczuk A.: Characterization of material properties and heat source parameters in welding simulation of two overlapping beads on a substrate plate, *Computational Materials Science*, vol.69, pp. 559-565, 2013.
- [4] Rochalski D., Golański D., Chmielewski T.: Modelowanie spawalniczego źródła ciepła w procesie spawania hybrydowego, *Przegląd Spawalnictwa*, vol. 89, 10/2017, s. 98-103.
- [5] Grolík L., Kik T., Irek P.: Modelling of Welding Processes – Applied Models and Examples, *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa w Gliwicach*, vol. 61, 6/2017, s. 31-38.
- [6] Kik T., Slovák M., Wygładacz B.: Analiza numeryczna procesu spawania wielościgowego złącza teowego oraz obróbki cieplnej po spawaniu, *Przegląd Spawalnictwa*, vol.88, No 5, 2016.