

dr inż. Konrad ADAMUS, dr hab. inż. Piotr LACKI, prof. nadzw., dr hab. inż. Agata DUDEK
Politechnika Częstochowska, Częstochowa
E-mail: piotr@lacki.com.pl

Analiza naprężeń i deformacji w cienkich blachach tytanowych podczas spawania wiązką elektronów

The analysis of thermally induced stresses and distortions in thin titanium sheets during electron beam welding

Streszczenie

W pracy przedstawiono termiczno-mechaniczną analizę procesu spawania wiązką elektronów. W procesie spawania połączono dwie cienkie blachy wykonane z różnych gatunków tytanu, Grade 2 i Grade 5. W wyniku spawania powstały znaczne deformacje blach. Model numeryczny został opracowany na podstawie Metody Elementów Skończonych, MES. Model oblicza wpływ obciążenia termicznego na pole naprężeń i przemieszczeń. Wyniki uzyskane za pomocą modelu numerycznego zostały porównane z wynikami badań eksperymentalnych. Obliczone pole naprężeń zweryfikowano poprzez porównanie obliczonych naprężeń własnych z naprężeniami zmierzonymi na powierzchni blach za pomocą metody dyfrakcji rentgenowskiej.

Abstract

This paper presents a thermo-mechanical analysis of an electron beam welding process. During the process two thin sheets made of dissimilar titanium grades, Grade 2 and Grade 5, were joined together. The welding processes introduced significant distortions into the sheets. The numerical model is based on finite element method. The model calculates the impact of thermal load on stress and displacement fields. The results calculated by the model were compared with the experimental results. The calculated stress field was verified by comparing residual stresses at the external surface in a given cross-section with stress values obtained by x-ray diffraction measurements.

Słowa kluczowe: spawanie wiązką elektronów, termiczno-mechaniczna analiza, cienkie blachy, dyfrakcja rentgenowska, naprężenia własne, deformacje spawalnicze, odstęp pomiędzy blachami

Keywords: electron beam welding, thermo-mechanical analysis, thin sheets, x-ray diffraction, residual stresses, weld distortions, welding gap

1. WPROWADZENIE

Spawanie wiązką elektronów, SWE, jest procesem wykorzystującym elektrony do łączenia materiałów [1]. Elektrony posiadają ładunek elektryczny i można im nadać przyspieszenie za pomocą pola elektrycznego. Wiązka przyspieszonych elektronów jest kierowana na powierzchnię łączonych elementów. W wyniku zderzenia ich energia kinetyczna jest zamieniana na ciepło. Proces spawania odbywa się w próżni w celu uniknięcia rozogniskowania wiązki i utraty mocy.

Spawarki elektronowe generują wiązki o szerokim zakresie mocy, od 0.5 do 300 kW, i o wysokiej gęstości mocy, 10^7 W/cm². Połączenie wy-

1. INTRODUCTION

Electron beam welding, EBW, is a fusion welding process that utilizes electrons to join materials [1]. Electrons have an electric charge and thus they can be accelerated using electric field. The beam of accelerated electrons is focused on the external surface of a welded component. As electrons collide with the object surface their kinetic energy is converted into heat. The welding process is performed in vacuum in order to avoid beam defocus and loss of beam power.

EBW can produce beams that have wide range of powers, from 0.5 to 300 kW, and high power density, about 10^7 W/cm². The combination

sokiej mocy i wysokiej gęstości mocy wywołuje tworzenie się kanału parowego wewnątrz jeziora spawalniczego. Ilość ciepła wytwarzanego przez elektrony jest tak duża, że materiał nie nadąża z jego odprowadzaniem poprzez przewodzenie, co prowadzi to topnienia i parowania metalu. Wiązka elektronów jest w stanie przeniknąć przez kanał parowy i uzyskać dostęp do głębiej położonych warstw materiału. Umożliwia to uzyskanie spoin o wysokim stosunku głębokości do szerokości. Ilość ciepła potrzebna do wykonania spoiny oraz wprowadzane deformacje spawalnicze są stosunkowo małe w porównaniu do konwencjonalnych technik spawania.

Dostępne komercyjnie spawarki elektronowe pozwalają na wykonanie spoin o głębokościach od 0.2 do 300 mm. SWE umożliwia łączenie różnorodnych materiałów, m.in.: stali, materiałów o wysokiej temperaturze topnienia, materiałów o wysokiej przewodności cieplnej, materiałów podatnych na reakcje z gazami atmosferycznymi. Spoiny otrzymane przy użyciu SWE charakteryzują się wysoką jakością i dużą powtarzalnością.

Zaawansowane systemy odchylenia pozwalają na rozdzielenie pojedynczej wiązki i utworzenie kilku osobnych. Umożliwia to równoczesne wykonanie kilku operacji. Zhao [2] opisuje zastosowanie systemu odchylenia do utworzenia trzech osobnych wiązek wykonujących trzy różne zadania: podgrzewanie wstępne, spawanie i wygładzanie lica spoiny.

Nowoczesne spawarki elektronowe umożliwiają autodiagnostykę parametrów wiązki elektronów i jeziora spawalniczego w trakcie spawania. Dilthey [3] opisuje system pozwalający na monitorowanie pozycji ogniska wiązki i rozkładu gęstości mocy wiązki w jej przekroju. System ten umożliwia wykrywanie pogorszenia parametrów wiązki w wyniku uszkodzenia katody, niewłaściwej pozycji katody i zmiany ciśnienia w komorze próżniowej.

SWE jest stosowane zarówno w procesach wymagających stosunkowo małej liczby spoin o wysokiej jakości, na przykład w przemyśle lotniczym, jak i procesów wymagających dużej liczby stosunkowo tanich spoin, na przykład w przemyśle motoryzacyjnym.

of high power and high power density triggers formation of vapor channel inside the pool of molten metal. The amount of heat produced by electrons is so large that material is unable to transport it using conduction. As temperature increases material melts and vaporizes. The thin vapor channel called keyhole is formed. The beam can penetrate through the keyhole and access deeper material layers. This process allows for obtaining welds that have high depth to width ratio. As a result EBW heat input necessary to produce weld and distortions introduced into material are low compared to other welding technologies.

The standard EBW units can produce joints with thicknesses ranging from 0.2 to 300 mm. EBW allows for welding of various materials including among others: steels, high melting point materials, high thermal conductivity materials, materials with affinity for oxygen, dissimilar materials. EBW is characterized by high quality of joints and high repeatability of weld parameters in consecutive operations.

The advanced deflection systems enable splitting single electron beam into several beams. Thus it is possible to perform simultaneously several welding operations. Zhao [2] describes the application of multi-beam technique where a single beam is split into three separate beams performing three different tasks: preheating, welding and smoothing of external surface in a single pass of an electron beam gun.

Modern EBW units have the capability to diagnose the parameters of electron beam and weld pool during welding process. Dilthey [3] describes a system allowing for monitoring of beam focus position, cross-sectional beam power density. The system enables also detection of beam parameters deterioration due to coil failures, vacuum level fluctuations and incorrect cathode position.

EBW is applied both for process that require joining of high quality, low volume components such as in aerospace industry and low expense, high volume components such as in automotive industry.

2. SPECYFIKA SPAWANIA TYTANU I JEGO STOPÓW

Tytan charakteryzuje się unikalnym połączeniem stosunkowo wysokiej wytrzymałości i małej gęstości [4]. Do innych zalet tytanu należą zachowanie parametrów mechanicznych w podwyższonych temperaturach i odporność na korozję. Tytan i jego stopy są stosowane w różnych przemysłach. W przypadku przemysłu lotniczego tytan jest stosowany do produkcji elementów przenoszących obciążenia, silników i wirników.

Obróbka plastyczna tytanu stwarza wiele trudności. Problemy powstające przy formowaniu tytanu i sposoby zwiększenia jego tłoczności zostały przedstawione w [5–7]. Tytan jest materiałem stosowanym na wsady spawane do tłoczenia. Technologia ta polega na łączeniu blach o różnych właściwościach lub różnych grubościach. Formowanie części ze wsadów spawanych umożliwi zmniejszenie ich ciężaru. Winowiecka [8] opisuje stosowanie tytanu Grade 2 i Grade 5 jako materiału na wsady spawane. Zrozumienie wpływu SWE na złącza z blach tytanowych umożliwi poprawę procesu tłoczenia wsadów. Inną formą produkcji części z tytanu jest metalurgia proszków [9].

Spawalność tytanu została opisana w [10]. Czysty tytan oraz stopy α wykazują dobrą spawalność. Stopy $\alpha+\beta$ ze słabo stabilizowaną fazą β takie jak Ti-6Al-4V są spawalne, jednakże stopy $\alpha+\beta$ z silnie stabilizowaną fazą β w wyniku spawania stają się kruche. Metastabilne stopy β są spawalne, złącza mają dobrą ciągliwość i obniżoną wytrzymałość.

Procesy spawalnicze wprowadzają naprężenia własne do stopów tytanu. Najwyższe naprężenia występują w jednofazowych stopach α i β . W stopach $\alpha+\beta$ dominuje proces transformacji z fazy β w α wykazujący tendencję do uwalniania naprężeń własnych [11]. Naprężenia własne wprowadzone podczas spawania do części lotniczych wykonanych z tytanu obniżają ich wytrzymałość zmęczeniową [10]. W celu minimalizacji negatywnego wpływu naprężeń własnych i deformacji zaleca się stosowanie technologii spawania o wysokiej gęstości mocy w miejsce wielościegowego spawania łukiem elektrycznym.

2. CHARACTERISTICS OF TITANIUM AND TITANIUM ALLOYS WELDING

Titanium is characterized by a unique combination of relatively high strength and low density [4]. Other attractive properties of titanium include heat resistance and sufficient corrosion resistance. Titanium is applied in various industries among others in aerospace industry. In aerospace industry titanium is used for airframe components, engine components and rotors.

Plastic forming of titanium poses many problems. The difficulties in titanium forming and techniques to improve titanium drawability were presented in [5–7]. Titanium has been used as a material for Tailor Welded Blanks, TWB. TWB consists in joining materials having different mechanical properties or thicknesses. The purpose of TWB is to reduce the weight of components. Winowiecka [8] describes the application of titanium Grade 2 and Grade 5 sheets for TWBs. Understanding the impact of a welding process on joints made of titanium sheets will improve the effectiveness of drawing process. Another form of manufacturing products from titanium alloys is powder metallurgy [9].

Titanium weldability is described in [10]. Unalloyed titanium and α alloys exhibit good weldability. The weakly β stabilized $\alpha+\beta$ alloys such as Ti-6Al-4V are weldable however strongly β stabilized $\alpha+\beta$ alloys are embrittled by welding. Metastable beta alloys are weldable, they joints have good ductility but low strength.

Welding processes introduce residual stresses into titanium alloys. The highest values of stress occur in single phase α and β or weakly heterogenized titanium alloys, in $\alpha+\beta$ alloys the dominating process is transformation β to α which has tendency to release the residual stresses [11]. Residual stresses introduced into aerospace titanium components by welding processes can reduce fatigue properties [10]. In order to minimize negative impact of residual stresses and distortions the high power density, single pass welding processes are preferred over multi-pass conventional arc processes.

W temperaturach powyżej 500°C tytan staje się wrażliwy na reakcję z gazami atmosferycznymi. Konieczne jest stosowanie gazów ochronnych po stronie lica i grani spoiny lub komory próżniowej.

3. MODELOWANIE ODSTĘPU POMIĘDZY BLACHAMI

Arai [12] zauważa, [1] że w większości symulacji spawania występuje tylko jakościowa ocena deformacji. Przyjmowane jest założenie, że spawanie jest wykonywane dla pojedynczego bloku materiału – źródło ciepła przemieszcza się przez połączone ze sobą elementy. Uwzględnienie w symulacji odstępu pomiędzy łączonymi elementami jest ważnym czynnikiem mającym wpływ na obliczone deformacje, zwłaszcza w przypadku cienkich blach. Arai analizuje przypadek spawania wiązką laserową sztywno umocowanych blach stalowych o grubości 1 mm. Wykonane zostały zarówno badania eksperymentalne, jak i numeryczne. Nie zostały przedstawione szczegóły dotyczące implementacji odstępu pomiędzy blachami. Stwierdzono, że istnieją znaczne różnice w obliczonym stopniu deformacji pomiędzy przypadkiem uwzględniającym i nieuwzględniającym odstęp pomiędzy blachami.

Innym podejściem stosowanym w symulacjach spawania w celu dobrego odwzorowania odstępu jest wykorzystanie specjalnych elementów reprezentujących granicę pomiędzy łączonymi komponentami. Deng i Murakawa [13, 14] wykorzystują nieliniowe elementy typu sprężyna. Zależność pomiędzy przemieszczeniem i siłą jest określana za pomocą sztywności i maksymalnej siły łączącej. Osobne zależności są określone dla podłużnych, poprzecznych, normalnych i rotacyjnych kierunków. Kształt krzywej określającej zależność pomiędzy przemieszczeniem i siłą jest zależny od sposobu mocowania elementów, rozmieszczenia spoin szczepnych oraz etapu procesu spawania, przed lub po spawaniu. Przedstawione rozwiązanie zostało zastosowane do modelowania złożonej struktury zbudowanej z cienkich blach. Zeng [15] zastosował elementy typu LEWE. W celu wykorzystania elementów LEWE należy określić ich szerokość, moment bezwładności i moment zginający.

In temperatures over 500°C titanium becomes reactive with atmospheric gases thus it is necessary to apply appropriate countermeasures during welding. Either shielding gases should be applied at face and root of a weld or welding should be performed in a vacuum chamber.

3. MODELING OF WELDING GAP

Arai [12] notes that in most welding simulations there is only qualitative assessment of distortions. It is assumed that weld is performed in a bead-on-plate mode, there is no initial gap between welded components and heat source moves through the mesh representing already joined parts. Welding gap is an important factor to be taken into account in the analysis of distortions which are especially important for thin plate welding and precision welding. Arai analyzes the case of laser beam welding of 1-mm thick steel sheets that are fixed in a jig. Both experimental research and numerical analysis were performed. There were no details regarding the numerical implementation of a welding gap. It was concluded that there are significant differences in the degree of deformations between cases with bead-on-plate and with welding gap. For the analyzed process the higher deformations occurred for the case with bead-on-plate.

Another approach used in welding simulations to capture initial gap between sheets is to apply dedicated finite elements that represent the interface between joined components. Deng and Murakawa [13, 14] use nonlinear spring elements called interface elements. The relationship between displacement and force is defined by stiffness and maximal bonding force. The separate relationship are defined in longitudinal, transverse, normal and rotational directions. The shape of curve representing dependencies between displacements and force is dependent on clamping devices, tack welds and stage of the process, i.e. before or after welding. The suggested solution was applied in simulation of welding process consisting in joining complex structure made of thin sheets. Zeng [15] applied local equivalent welding element, LEWE. LEWE is defined by its width, inertia moment and bending moment. Zeng suggests calibration of LEWE based on fine finite element model of a welding process.

Lacki i Adamus [16, 17] analizowali proces łączenia cienkich blach tytanowych za pomocą SWE. W [16] autorzy zbudowali model termiczno-mechaniczny procesu spawania. Zakres obliczonych deformacji spawalniczych był mniejszy niż w rzeczywistych blachach. W [17] model spawania został rozszerzony o początkowy odstęp pomiędzy blachami. Wykorzystano parametr narodzin elementu w celu określenia czasu pojawienia się elementu pomiędzy łączonymi blachami. Zauważono, że zastosowanie początkowego odstępu pomiędzy blachami zwiększa stopień ugięcia poprzecznego oraz to, że wzrost ugięcia poprzecznego jest pozytywnie skorelowany ze wzrostem ugięcia podłużnego. Dokładność odwzorowania deformacji blach została zwiększona. Celem niniejszej pracy jest rozszerzenie badań nad symulacją spawania cienkich blach o weryfikację doświadczalną obliczonych naprężeń za pomocą metody dyfrakcji rentgenowskiej.

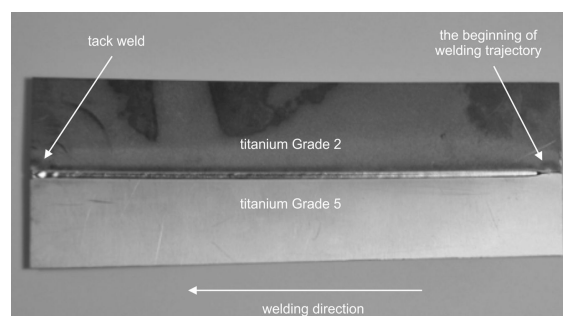
4. PROCES SPAWANIA

Analizowany proces polega na łączeniu doczołowym dwóch blach tytanowych, jednej wykonanej z tytanu Grade 2 i drugiej wykonanej z tytanu Grade 5. Spawane blachy miały grubość 0,8 mm i długość 158 mm. W pierwszym etapie procesu spawania wykonano spoinę szczipną na jednym końcu linii spawania w celu unieruchomienia blach, rys. 1. W drugim etapie wykonano spoinę łączącą blachy, zaczynając od drugiego końca linii spawania w kierunku spoiny szczipającej.

Lacki and Adamus [16, 17] analyzed a process of joining thin titanium sheets using EBW technology. In [16] the authors built thermo-mechanical model of the welding process. The degree of calculated welding distortions was lower than in the actual welded sheets. In [17] the welding model was extended with a welding gap. The element birth property was used to create elements representing interface between sheets during welding along the moving heat source. No clamping devices were used to fix sheets, instead tack weld was applied. It was found out that application of initial welding gap increases the degree of transverse bending and that an increase in transverse bending is positively correlated with an increase in longitudinal bending. The accuracy of welding distortion prediction was improved. This work aims to extend the research into simulation of thin sheets welding by comparing the calculated stress field with x-ray diffraction measurements.

4. WELDING PROCESS

The analyzed process consisted in butt welding of two titanium sheets. One sheet was made of titanium Grade 2 and the other of titanium Grade 5. The welded sheets had the thickness of 0.8 mm and the length of 158 mm. During the first stage of the process a tack weld was performed at one end of the welding trajectory in order to fix the sheets, Fig. 1. The tack weld prevents sheet movement away from the welding trajectory in response to thermal expansion caused by the electron beam. In the next stage of the process the main weld was performed starting from the other end of the welding trajectory towards the tack weld.

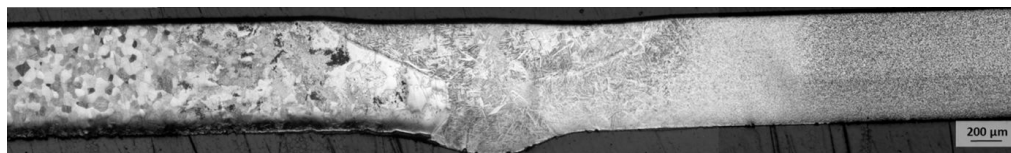


Rys. Widok ogólny połączonych blach [17]

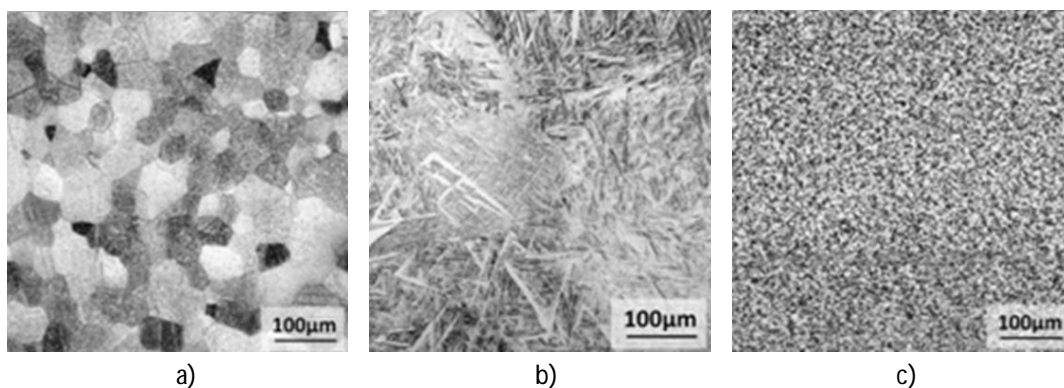
Fig. 1. The welded sheets [17]

Rys. 2 przedstawia mikrostrukturę przekroju poprzecznego złącza. Obserwację mikrostruktury przeprowadzono za pomocą mikroskopu optycznego Axiovert 25. W centralnej części zdjęcia widoczna jest strefa przetopienia. Lewa strona przedstawia blachę wykonaną z tytanu Grade 2, prawa strona przedstawia blachę wykonaną z tytanu Grade 5. Powiększone zdjęcia mikrostruktury blach i strefy przetopienia zostały przedstawione na rys. 3.

Fig. 2 presents the microstructure of the joint cross section. The observation of microstructure was performed using optical microscope Axiovert 25. In the centre of the picture there is a distinct zone corresponding to the fusion zone of the weld. The left side of the joint presents the sheet made of titanium Grade 2 and the right side presents the sheet made of titanium Grade 5. The magnified microstructure pictures of the sheets and the fusion zone are presented in Fig. 3.



Rys. 2 Mikrostruktura przekroju poprzecznego złącza
Fig. 2. Microstructure of the joint cross-section



Rys. 3. Mikrostruktura: (a) tytanu Grade 2, (b) strefa przetopienia, (c) tytan Grade 5
Fig. 3. Microstructure of: (a) titanium Grade 2, (b) fusion zone, (c) titanium Grade 5

SWE spowodowało deformacje blach: poprzeczne i podłużne ugięcie. Ugięcie podłużne, wzdłuż linii spawania, było wklęsłe. Ugięcie poprzeczne, w płaszczyźnie prostopadłej do linii spawania, było wypukłe.

The EBW process introduced distortions into the sheets: transverse and longitudinal bending. The longitudinal bending, along the welding trajectory, was concave. The transverse bending, in plane perpendicular to the welding trajectory, was convex.

5. OBLICZENIA NUMERYCZNE

Model numeryczny został zbudowany za pomocą programu ADINA, [18], opartego o Metodę Elementów Skończonych. Zastosowano termiczno-mechaniczną sprzężoną analizę TMC, która uwzględnia oddziaływanie części termicznej i mechanicznej. W przypadku spawania dominującym zjawiskiem jest wpływ źródła ciepła na rozszerzalność termiczną materiału. Analiza TMC pozwala na określenia pola temperatury, naprężeń i przemieszczeń. Znane są również mo-

5. NUMERICAL CALCULATIONS

The numerical model was based on finite element method and was built using ADINA program [18]. Thermo-mechanical coupled, TMC, analysis was used. TMC takes into account mutual interaction of thermal and structural interaction. In case of welding, the dominating phenomena is the impact of heat source on thermal expansion of welded components. This approach allows for calculating temperature, stress and displacement fields. In literature there are also

dele uwzględniające zjawiska termiczne i mechanikę płynów [19, 20] pozwalające określić wpływ parametrów spawania na geometrię strefy przetopienia.

Ewolucja pola temperatury została opisana za pomocą równania Fouriera-Kirchoffa:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \nabla^2 T + \frac{q_v}{\rho c_p} \quad (1)$$

gdzie: a – dyfuzyjność termiczna, ρ – gęstość, c_p – ciepło właściwe, q_v – wydajność wewnętrznego objętościowego źródła ciepła.

Równanie konstytutywne określające termiczno-sprężysto-plastyczny materiał ma następującą postać:

$${}^t\sigma_{ij} = {}^tC_{ijrs}^E ({}^t e_{rs} - {}^t e_{rs}^P - {}^t e_{rs}^{TH}) \quad (2)$$

gdzie: ${}^t\sigma_{ij}$ – tensor naprężenia w czasie t , ${}^tC_{ijrs}^E$ – tensor sprężystości dla temperatury w czasie t , ${}^t e_{rs}$ – tensor całkowitego odkształcenia w czasie t , ${}^t e_{rs}^P$ – tensor odkształcenia plastycznego w czasie t , ${}^t e_{rs}^{TH}$ – tensor odkształcenia termicznego w czasie t .

Odształcenia plastyczne zostały obliczone na podstawie modelu plastyczności von Misesa. Odształcenia termiczne zostały obliczone na podstawie temperatury w węzłach i zależnego od temperatury współczynnika rozszerzalności termicznej. Model określający zależność naprężeń od odkształceń wymaga zdefiniowania modułu Younga, naprężenia uplastyczniającego i modułu umocnienia w funkcji temperatury. Wykorzystano analizę statyczną, ponieważ prędkości i przyspieszenia dla SWE mają pomijalnie mały wpływ.

Model objętościowego źródła ciepła ze stałym rozkładem gęstości mocy oparto o pracę [21]. Siatka MES została utworzona w taki sposób, że elementy znajdują się w całości wewnątrz lub w całości na zewnątrz źródła ciepła. Gęstość mocy została przypisana do elementów reprezentujących źródła ciepła na podstawie szybkości spawania, mocy źródła ciepła i wydajności termicznej ($\eta = 82\%$). Kształt źródła został skalibrowany poprzez dopasowanie obliczonego i rzeczywistego kształtu strefy przetopienia.

Początkowy odstęp pomiędzy blachami został uwzględniony w celu lepszego odwzorowania naprężeń i przemieszczeń [17]. Wykorzystano opcję narodzin elementu do określenia czasu, gdy pojawia się on w symulacji. W chwili

thermal fluid models [19, 20] of welding processes. These models provide information on shape of welding pool based on the physical parameters of a heat source.

The temperature field evolution was described by Fourier-Kirchoff equation:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \nabla^2 T + \frac{q_v}{\rho c_p} \quad (1)$$

where: a – the thermal diffusivity, ρ – the density, c_p – the specific heat, q_v – the efficiency of internal volume heat source.

The constitutive equation describing thermo-elasto-plastic material has the following form:

$${}^t\sigma_{ij} = {}^tC_{ijrs}^E ({}^t e_{rs} - {}^t e_{rs}^P - {}^t e_{rs}^{TH}) \quad (2)$$

where: ${}^t\sigma_{ij}$ – stress tensor at time t , ${}^tC_{ijrs}^E$ – elasticity tensor at temperature corresponding to time t , ${}^t e_{rs}$ – total strain tensor at time t , ${}^t e_{rs}^P$ – time independent plastic strain tensor at time t , ${}^t e_{rs}^{TH}$ – thermal strain tensor at time t .

Plastic strains were calculated using the von Mises plasticity model. Thermal strains were calculated based on temperature in nodes and temperature dependent coefficient of thermal expansion. The dependency between stresses and strains was described by bilinear model using temperature dependent Young's modulus, yield stress and strain hardening modulus. Static analysis was applied in the model since velocities and accelerations occurring in fusion welding process have negligible effect and can be ignored.

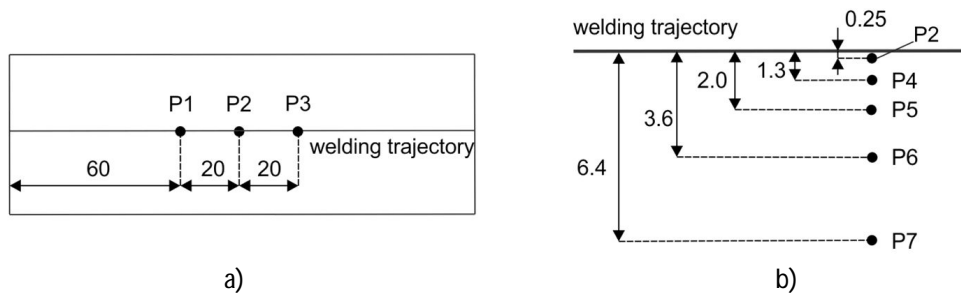
A model of volumetric heat source with constant power density was applied based on [21]. The mesh was generated in such a way that elements were either fully inside or fully outside the heat source. Power density was assigned to the elements representing moving heat source in accordance with welding speed, heat source power, thermal efficiency factor ($\eta = 82\%$). The shape of heat source was calibrated to provide match between the calculated fusion zone shape and the actual fusion shape.

An initial welding gap between sheets was taken into account to better describe stress and displacement fields [17]. An element birth option was used to define the time at which an element becomes present in the simulation. At the beginn-

rozpoczęcia symulacji, nie ma elementów pomiędzy blachami. Pojawianie się elementów wypełniających odstęp zostało zsynchronizowane z przemieszczaniem się źródła ciepła.

6. WYNIKI OBLICZEŃ

Rys. 4 przedstawia rozmieszczenie punktów, w których analizowano obliczone numerycznie wartości naprężeń zredukowanych. Rys. 4 (a) przedstawia rozmieszczenie punktów leżących w kierunku zgodnym z linią spawania, punkty P1–P3. Rys. 4 (b) przedstawia rozmieszczenie punktów leżących w kierunku prostopadłym do linii spawania, punkty P2 oraz P4–P7. Punkt P2 jest wspólny dla części (a) i (b).



Rys. 4. Rozmieszczenie punktów, dla których analizowano obliczone numerycznie naprężenia zredukowane: (a) wzdłuż linii spawania, (b) w kierunku prostopadłym do linii spawania (wszystkie wymiary podano w mm)

Fig. 4. The layout of points where effective stress values were obtained from numerical simulation: (a) along the welding trajectory, (b) in direction normal to the welding trajectory (all distances are in mm)

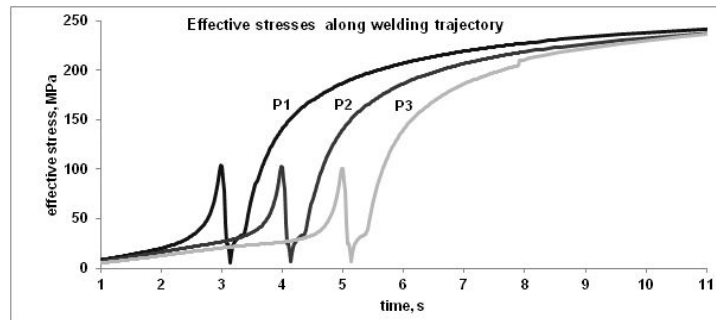
Rys. 5 przedstawia wykres naprężenia zredukowanego w funkcji czasu dla punktów P1–P3 rozmieszczonych wzdłuż linii spawania dla czasu w przedziale 1–11 s. Dla każdego punktu wykres składa się z początkowego piku o amplitudzie około 100 MPa i stopniowego wzrostu wartości naprężenia do około 230 MPa. Początkowy pik odpowiada zbliżaniu się źródła ciepła do punktu. Rozszerzalność termiczna materiału wokół jeziora powoduje wzrost naprężenia. W chwili przejścia źródła ciepła przez punkt wartości naprężeń gwałtownie maleją w wyniku zależności krzywej naprężenie-odkształcenie od temperatury. Im wyższa jest temperatura, tym niższe są naprężenia dla tego samego odkształcenia. Następnie, w miarę oddalania się źródła ciepła w kierunku kolejnych punktów, materiał wychładza się i naprężenia wzrastają.

ing of the simulation there were no elements in the gap between the sheets. The elements started to fill the consecutive positions in the gap at times corresponding to the heat source passing a given location.

6. CALCULATION RESULTS

Fig. 4 presents the layout of measurement points at which numerically calculated values of effective stresses were taken. Fig. 4 (a) corresponds to direction along welding trajectory. Three point P1–P3 were selected at distance interval of 20 mm. Fig. 4 (b) corresponds to direction normal to the welding trajectory. In addition of point P2 from Fig. (a) there 4 more points P4–P7.

Fig. 5 presents the plot of effective stress against time at points P1–P3 placed along the welding trajectory for time span ranging from 1 to 11 seconds after the beginning of welding process. For each point a time series comprises an initial peak of about 100 MPa and a gradual increase towards the value of about 230 MPa. The initial peak corresponds to the time when the heat source nears a measurement point. Thermal expansion around weld pool causes increase in the stress values. As the heat source passes through the measurement point the value of stress drops due to thermal dependence of stress-strain curve. The higher the temperature, the lower the stress for the same strain. Subsequently, as the heat source moves away from the current measurement point towards the next measurement point material cools down and, due to thermal dependence, stress values start to increase.

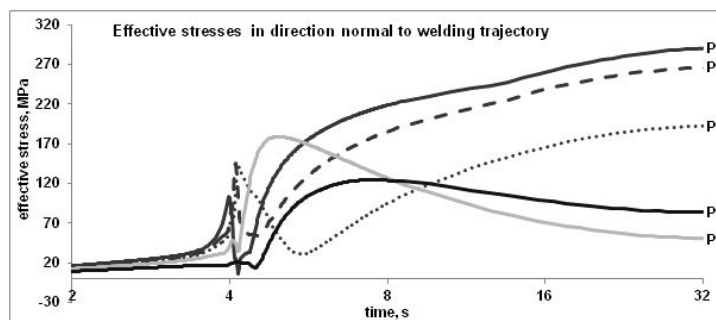


Rys. 5. Naprężenia zredukowane dla punktów P1–P3 położonych wzdłuż linii spawania dla czasu w przedziale 1–11 s

Fig. 5. Effective stress values at points P1, P2 and P3 lying along welding trajectory for time range 1–11 s

Rys. 6 przedstawia wykres naprężenia zredukowanego w funkcji czasu dla punktów P2 oraz P4–P7 położonych w kierunku normalnym do linii spawania dla czasu w przedziale 2–23 s. Rozkład naprężeń dla punktu P2 jest identyczny z rys. 5. W miarę zwiększania się odległości od linii spawania, dla punktów P4 i P5, zwiększa się wartość maksymalna odpowiadająca zbliżeniu się źródła ciepła. Pod wpływem malejącej temperatury materiału, naprężenia zaczynają wzrastać, jednakże wartości maksymalne maleją wraz ze wzrostem odległości od linii spawania. Zaczynając od punktu P6, położonego w odległości 3,6 mm od linii spawania, początkowy pik jest wygładzony, co wskazuje na znacznie mniejszy wpływ przejścia źródła ciepła na naprężenia. Po przejściu źródła ciepła, w wyniku ochładzania się materiału, naprężenia rosną do wartości około 170 MPa a następnie zaczynają się obniżać do wartości około 70 MPa. Podobny charakter rozkładu naprężeń w czasie można zaobserwować dla punktu P7 w odległości 6,4 mm od linii spawania.

Fig. 6 presents the plot of effective stress against time at points P2 and P4–P7 placed in direction normal to the welding trajectory for time span ranging from 2 to 32 seconds after the beginning of the welding process. The distribution of effective stress in time for point P2 is identical with Fig. 5. As distance from the welding trajectory increases, for points P4 and P5 stress value at the initial peak, corresponding to the nearing heat source, grow. As the material starts to cool down, the value of stresses for points P4 and P5 increase again, however they are lower with growing distance from the welding trajectory. Starting with point P6, at distance of about 3.6 mm from the welding trajectory, the initial peak is smoothed out and the immediate impact of the passing heat source is lower. As the material starts to cool down, stress values for point P6 start to grow to about 170 MPa and then gradually decrease towards 70 MPa. Similar pattern can be observed for point P7 at the distance of about 6.4 mm.



Rys. 6 Naprężenia zredukowane dla punktów P2 oraz P4–P7 leżących w kierunku normalnym do linii spawania dla czasu w przedziale 2–32 s

Fig. 6. Effective stress values at points P2 and P4–P7 lying in direction normal to welding trajectory for time range 2–32 s

7. WERYFIKACJA DOŚWIADCZALNA

W celu weryfikacji obliczonych numerycznie naprężeń własnych wykonano pomiary eksperymentalne naprężeń przy użyciu dyfrakcji rentgenowskiej. Dyfrakcja rentgenowska umożliwia nieniszczący pomiar naprężeń na zewnętrznej powierzchni materiału. Zastosowano wariant $\sin^2\psi$. Metoda $\sin^2\psi$ bazuje na równaniu Hooke'a dla płaskiego stanu naprężeń ze składowymi elipsoidy odkształceń. Praktyczny pomiar polegał na wyznaczeniu odkształceń sieci krystalicznej $\varepsilon_{\phi,\psi}$ dla kilka kątów ψ . Wyznaczenie dokładnego położenia kątowego pików oraz dalsze obliczenia doprowadziły do wyznaczenia naprężeń własnych przy pomocy specjalistycznego oprogramowania RAYFLEX-STRESS ANALIZE.

Rys. 7 i 8 przedstawiają porównanie numerycznie obliczonych i eksperymentalnie zmierzonych naprężeń poprzecznych i podłużnych. Naprężenia zmierzono na górnej powierzchni blach, wzdłuż linii prostopadłej do linii spawania, przechodzącej przez punkt P2 na rys. 4. Wartości na osi X określają odległość od linii spawania, ujemne wartości odpowiadają tytanowi Grade 2, dodatnie wartości odpowiadają tytanowi Grade 5. Wartości na osi Y określają naprężenia własne, ujemne wartości odpowiadają naprężeniom ściskającym, dodatnie wartości odpowiadają naprężeniom rozciągającym. Kierunek naprężeń poprzecznych jest prostopadły do linii spawania, kierunek naprężeń podłużnych jest zgodny z kierunkiem linii spawania. Dla celów porównawczych, przedstawiono wyniki dla modeli MES uwzględniających i nieuwzględniających odstęp pomiędzy blachami.

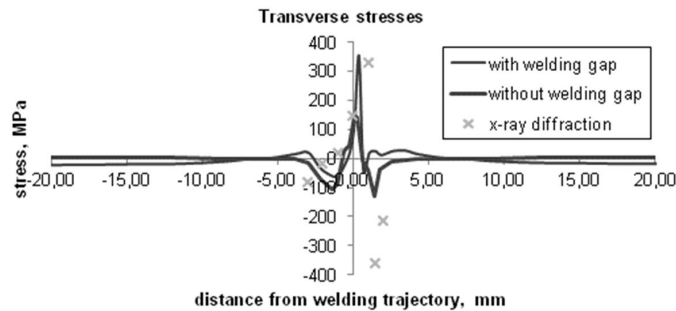
W przypadku naprężeń poprzecznych, rys. 7, istnieje rozbieżność pomiędzy modelami MES. Model uwzględniający odstęp przewiduje wyższe wartości naprężeń rozciągających po stronie tytanu Grade 5. Istnieje dobra zgodność w zakresie naprężeń rozciągających pomiędzy modelem MES uwzględniającym odstęp i pomiarami za pomocą dyfrakcji rentgenowskiej. Znaczne różnice można zaobserwować dla naprężeń ściskających, gdzie maksymalne zmierzone naprężenia osiągają wartość około 400 MPa po stronie tytanu Grade 5.

7. EXPERIMENTAL VERIFICATION

In order to verify the calculated residual stresses the experimental measurements with X-ray diffraction were performed. X-ray diffraction enables nondestructive measurements of stresses at an external surface of material. $\sin^2\psi$ variant of the method was applied. $\sin^2\psi$ method is based on Hooke's equation for plane stress state with components of strain ellipsoid. The stress measurements consisted in determining lattice strains $\varepsilon_{\phi,\psi}$ for several ψ angles. The identification of angular position of peaks and further calculations with use of dedicated software RAYFLEX-STRESS ANALIZE allowed for determination of residual stresses.

Fig. 7 and 8 present comparison of numerically calculated and experimentally measured transverse and longitudinal stresses respectively. The stresses were measured at the sheets' top surface, along the line perpendicular to the welding trajectory, crossing point P2 at Fig. 4. The values at X axis represent distance from the welding trajectory, negative values correspond to titanium Grade 2 sheet and positive values correspond to titanium Grade 5 sheet. The values at Y axis represent residual stresses, negative values correspond to compressive stresses and positive values correspond to tensile stresses. The transverse direction is perpendicular to the welding trajectory and longitudinal direction is along the welding trajectory. For comparative purposes, the results for two FEM models were taken into account, the one that takes into account the welding gap and the one that doesn't take into account the welding gap.

In case of transverse stresses, Fig. 7, there is a discrepancy between FEM models. The model with welding gap predicts higher values of tensile stresses at the side of titanium Grade 5. There is a good agreement with respect to distribution of tensile stresses between FEM model with welding gap and X-ray diffraction measurements. Significant differences can be observed for compressive stresses, where maximal stresses reach the value of about 400 MPa at the side of titanium Grade 5.

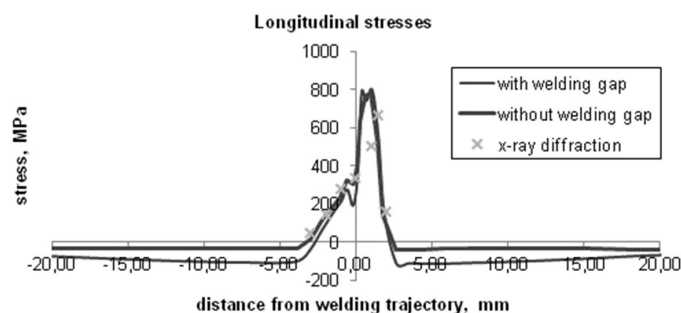


Rys. 7. Naprężenia poprzeczne: obliczone przez model MES uwzględniający odstęp, obliczone przez model MES nieuwzględniający odstępu, zmierzone za pomocą dyfrakcji rentgenowskiej

Fig. 7. Transverse stresses: calculated by FEM model with welding gap, calculated by FEM model without welding gap, measured by x-ray diffraction

W przypadku naprężeń podłużnych, rys. 8, istnieje dobra zgodność pomiędzy modelami MES. Istnieje również stosunkowo dobra zgodność pomiędzy wynikami obliczonymi przez modele MES i wartościami zmierzonymi przez dyfrakcję rentgenowską. Jedyna znacząca rozbieżność pojawia się po stronie tytanu Grade 5, gdzie maksymalne obliczone numerycznie naprężenia rozciągające osiągają wartość 800 MPa, a maksymalne zmierzone eksperymentalnie naprężenia rozciągające osiągają wartość 660 MPa.

In case of longitudinal stresses, Fig. 8, there is a good agreement between FEM models. There is also a good agreement between stress values calculated by FEM models and values measured by x-ray diffraction. The only significant discrepancy occurs at the side of titanium Grade 5, where maximal numerically calculated tensile stress has value of about 800 MPa and maximal x-ray measured tensile stress has value of 660 MPa.

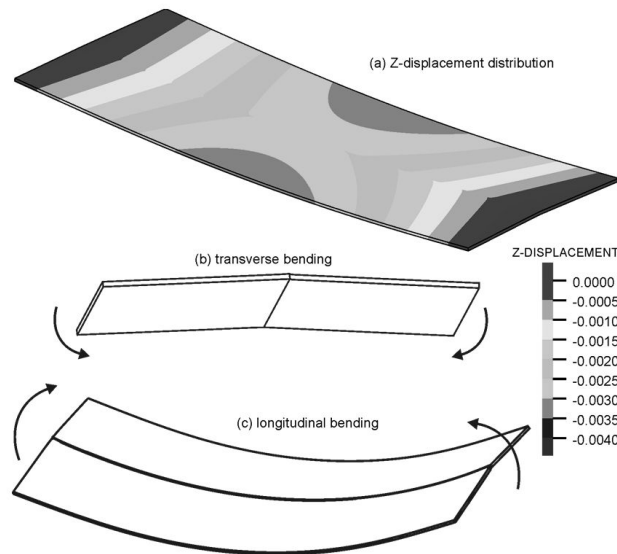


Rys. 8. Naprężenia podłużne: obliczone przez model MES uwzględniający odstęp, obliczone przez model MES nieuwzględniający odstępu, zmierzone za pomocą dyfrakcji rentgenowskiej

Fig. 8. Longitudinal stresses: calculated by FEM model with welding gap, calculated by FEM model without welding gap, measured by x-ray diffraction

Rys. 9 (a) przedstawia obliczony numerycznie rozkład przemieszczeń wzdłuż kierunku Z na górnej powierzchni blach. Kierunek Z odpowiada kierunkowi grubości blach. Rozkład przemieszczeń jest zgodny z rzeczywistymi deformacjami blach. Ugięcie poprzeczne jest wypukłe, krawędzie boczne blach są niższe niż linia spawania, rys. 9 (b). Ugięcie podłużne jest wklęsłe, środek linii spawania jest niższy niż początek i koniec linii spawania, rys. 9 (c).

Fig. 9 (a) presents numerically calculated distribution of Z-displacements on sheets' top surfaces. The Z direction corresponds to the direction of sheets; thickness. The displacement distribution is consistent with the sheets actual distortions. The transverse bending was convex, i.e. the sheet side edges were lower than the welding trajectory, Fig. 9 (b). The longitudinal bending was concave, i.e. the middle of the welding trajectory was lower than its beginning and end, Fig. 9 (c).



Rys. 9. Deformacje zespalanych blach: (a) przemieszczenie w kierunku Z, (b) ugięcie poprzeczne, (c) ugięcie podłużne

Fig. 9. Welded sheets distortions: (a) Z-displacement distribution, (b) transverse bending, (c) longitudinal bending

8. WNIOSKI

Na podstawie wykonanych symulacji numerycznych i przeprowadzonych badań eksperymentalnych można wyciągnąć następujące wnioski:

- Analiza rozkładów naprężeń zredukowanych w punktach położonych wzdłuż linii spawania ujawniła quasistacjonarny charakter wpływu jeziora spawalniczego. Dla kolejnych punktów przebieg naprężeń zredukowanych jest podobny i składa się z lokalnego pików wywołanego zbliżaniem się jeziora spawalniczego oraz stopniowego zwiększania się naprężeń w wyniku ochładzania się materiału.
- Analiza rozkładów naprężeń zredukowanych w punktach położonych wzdłuż linii prostopadłej do linii spawania wykazała, że w odległości do 2 mm od linii spawania rozkład naprężeń jest zgodny z rozkładem punktu w pobliżu linii spawania. W miarę oddalania się od linii spawania powyżej 3,6 mm, występuje lokalny wzrost naprężeń w wyniku zbliżania się źródła ciepła praktycznie nie występuje, a wartości naprężeń są mniejsze niż dla objętości materiału w pobliżu linii spawania.

8. CONCLUSIONS

Based on the performed numerical calculations and experimental research into thin sheets welding the following conclusions can be drawn:

- The analysis of effective stress distribution at measurement points along welding trajectory revealed quasi-stationary character of welding pool impact. Consecutive points have very similar stress distribution with the initial peak corresponding to the nearing weld pool and the subsequent increase in stress values related to material cooling.
- The analysis of effective stress distributions at measurement points along the line perpendicular to the welding trajectory showed that within 2 mm distance from the welding trajectory stress distribution is similar to points in the vicinity of the welding trajectory. At the distance greater than 3.6 mm the initial peak is smoothed out and the overall stress values are lower than in case of material volume near the welding trajectory.

- Istnieje zgodność pomiędzy obliczonymi numerycznie i zmierzonymi eksperymentalnie wartościami naprężeń podłużnych.
- Istnieje zgodność w rozkładzie poprzecznych naprężeń rozciągających pomiędzy wynikami symulacji numerycznej i pomiarów eksperymentalnych. Rozbieżność pojawia się dla poprzecznych naprężeń ściskających po stronie tytanu Grade 5. Według [17] modelowanie odstępu pomiędzy blachami ma znaczny wpływ na rozkład naprężeń poprzecznych. Dalsze badania są konieczne w celu określenia tego, czy rozbieżność jest spowodowana niedostatecznie dokładnym modelowaniem odstępu, czy niedokładnością pomiarów metodą $\sin^2\psi$.
- Uwzględnienie odstępu pomiędzy blachami w obliczeniach numerycznych poprawia dokładność obliczonych deformacji spawalniczych.
- *There is good agreement in the values of longitudinal stresses between the numerically calculated results and the x-ray diffraction measurements.*
- *There is good agreement in the values of transverse tensile stresses between the numerically calculated results and the x-ray diffraction measurements. The discrepancy occurs with respect to the transverse compressive stresses at the side of titanium Grade 5. According to [17] modeling of welding gap has the significant impact on the transverse stresses. Further research is needed to determine whether the discrepancy follows from inadequate accuracy of welding gap modeling or qualitative nature of x-ray $\sin^2\psi$ measurements.*
- *The application of welding gap in numerical calculations improves the accuracy of welding distortions prediction.*

PODZIĘKOWANIA

Badania realizowane w ramach Projektu „Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym”, Nr POIG.01.01.02-00-015/08-00 w Programie Operacyjnym Innowacyjna Gospodarka (PO IG). Projekt współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.

ACKNOWLEDGEMENTS

Financial support of Structural Funds in the Operational Programme – Innovative Economy (IE OP) financed from the European Regional Development Fund – Project ‘Modern material technologies in aerospace industry’, Nr POIG.01.01.02-00-015/08-00 is gratefully acknowledged.

LITERATURA / REFERENCES

- [1] Böllinghaus T. (et al.): *Manufacturing Engineering*, in K.H. Grote, E.K. Antonsson (Eds.): *Springer handbook of mechanical engineering*. Germany: Springer 2009.
- [2] Zhao H.Y., Wang X., Wang X.C., Lei Y.P.: *Reduction of residual stress and deformation in electron beam welding by using multiple beam technique*. *Front. Mater. Sci. China* vol. 2 no. 1 (2008), s. 66–71.
- [3] Diltthey U., Goumeniouk A., Böhm S., Welters T.: *Electron beam diagnostics: a new release of the diabeam system*. *Vacuum* vol. 62 no. 2–3 (2001), s. 77–85.
- [4] Bylica A., Sieniawski J.: *Tytan i jego stopy*. Warszawa: PWN 1985.
- [5] Adamus J., Lacki P.: *Forming of the titanium elements by bending*. *Computational Materials Science* vol. 50 no. 4 (2011), s. 1305–1309.
- [6] Adamus J., Lacki P.: *Investigation of sheet titanium forming with flexible tool – experiment and simulation*. *Archives of Metallurgy and Materials* no. 57 (2012), s. 1247–1252.
- [7] Adamus J.: *Theoretical and experimental analysis of the sheet-titanium forming process*. *Archives of Metallurgy and Materials* no. 54 (2009), s. 705–709.
- [8] Winowiecka J., Więckowski W., Zawadzki M.: *Evaluation of drawability of tailor-welded blanks made of titanium alloys Grade 2 // Grade 5*. *Computational Materials Science* vol. 77 (2013), s. 108–113.

- [9] Gronostajski Z., Bandoła P., Skubiszewski T.: *Influence of cold and hot pressing on densification behaviour of titanium alloy powder Ti6Al4V*. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* no. 9 (2009), s. 47–57.
- [10] Donachie M.J.: *Titanium: A technical guide*. 2nd ed. Materials Park, OH: ASM International 2000.
- [11] Moiseyev V.N.: *Titanium alloys: Russian aircraft and aerospace applications*. Boca Raton: Taylor & Francis 2006.
- [12] Arai T.: *The laser butt welding simulation of the thin sheet metal*, [w:] Öchsner A., da Silva L.F.M., Altenbach H. (Eds.): *Materials with complex behaviour: modelling, simulation, testing and applications*. Berlin: Springer Verlag 2010.
- [13] Deng D., Murakawa H., Liang W.: *Prediction of welding distortion in a curved plate structure by means of elastic finite element method*. *Journal of Materials Processing Technology* vol. 203 no. 1–3 (2008), s. 252–266.
- [14] Murakawa H., Deng D., Ma N., Wang J.: *Applications of inherent strain and interface element to simulation of welding deformation in thin plate structures*. *Computational Materials Science* vol. 51 no. 1 (2012), s. 43–52.
- [15] Zeng P., Gao Y., Lei L.P.: *Welding process simulation under varying temperatures and constraints*. *Materials Science and Engineering: A* vol. 499 no. 1–2 (2009), s. 287–292.
- [16] Lacki P., Adamus K.: *Welding of thin titanium sheets of different mechanical properties*. *Obróbka Plastyczna Metali*, vol. XXIII (2012), s. 169–180.
- [17] Adamus K., Kucharczyk Z., Wojsyk K., Kudła K.: *Numerical analysis of electron beam welding of different grade titanium sheets*. *Computational Materials Science* vol. 77 (2013), s. 286–294.
- [18] Bathe K.-J.: *Finite element procedures: Klaus-Jurgen Bathe*. 2006.
- [19] Słoma J., Szczygieł I., Sachajdak A.: *Modelling of thermal phenomena in electric arc during surfacing*. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* no. 11 (2011), s. 437–449.
- [20] Piekarska W., M. Kubiak: *Three-dimensional model for numerical analysis of thermal phenomena in laser–arc hybrid welding process*. *International Journal of Heat and Mass Transfer* vol. 54 no. 23-24 (2011), s. 4966–4974.
- [21] Lacki P., Adamus K., Wieczorek P.: *Theoretical and experimental analysis of thermo-mechanical phenomena during electron beam welding process*. *Computational Materials Science* (2014), DOI: Oct. 1016/j.commatsci.2014.01.027.