

Dr hab. inż. Piotr LACKI, mgr inż. Konrad ADAMUS
Politechnika Częstochowska, Częstochowa
e-mail: piotr@lacki.com.pl

Specyfika spawania cienkich blach tytanowych o różnych właściwościach mechanicznych

Welding of thin titanium sheets of different mechanical properties

Streszczenie

W pracy zwrócono uwagę na specyfikę spawania blach tytanowych, wynikającą z dużej podatności tego materiału na dyfuzję gazów i małe przewodnictwo cieplne. Podano wyniki obliczeń numerycznych spawania wiązką elektronów blach tytanowych ze stopu Grade 2 i Grade 5. Dla łączonych blach wyznaczono rozkład temperatury, naprężeń zredukowanych i przemieszczeń charakteryzujących odkształcenia spawanych elementów.

Abstract

The paper analyses the welding process of titanium sheets which easily react with atmospheric gases and have low thermal conductivity. The results of numerical simulation were presented. For the purpose of joining titanium Grade 2 and Grade 5 sheets electron beam welding technology was used. For the sheet welding process distributions of temperature and effective stress, and sheet deformation were calculated.

Słowa kluczowe: blachy tytanowe, spawanie wiązką elektronów, symulacja MES

Keywords: titanium sheets, electron beam welding, FEM simulation

1. WSTĘP

Tytan jest materiałem o korzystnych właściwościach mechanicznych. Cechą charakterystyczną tytanu i jego stopów jest mały ciężar właściwy i wysoka wytrzymałość. Połączenie wysokiej wytrzymałości mechanicznej i małej gęstości jest cechą szeroko wykorzystywaną w technice. Tytan a zwłaszcza jego stopy są powszechnie stosowane tam, gdzie istotne znaczenie ma ciężar konstrukcji i jej wytrzymałość, tj. w takich gałęziach przemysłu jak lotnictwo, przemysł samochodowy, przemysł kosmiczny. Do korzystnych cech tytanu należy także zaliczyć jego wysoką odporność na korozję. Stąd też wynika zastosowanie tytanu i jego stopów w przemyśle chemicznym.

Duże zastosowanie przemysłowe mają blachy wytwarzane z tytanu i jego stopów typu Grade 1 do Grade 5 czy też wysokowytrzymałe stopy Grade 9.

1. INTRODUCTION

Titanium is a material that has attractive mechanical properties. The characteristic feature of titanium and its alloys is low density and high strength. Combination of high mechanical strength and low density is frequently used in technical applications. Titanium and its alloys are used often in applications where low weight and high strength of a construction are required, for instance, in aircraft, aerospace and automobile industries. Another attractive property of titanium is its high corrosion resistance. Thus titanium and its alloys are frequently used in chemical industry.

Of high importance in industrial applications are sheets made of titanium and its alloys of type Grade 1 to Grade 5 and high strength alloy Grade 9.

Elementy wytwarzane z blach tytanowych takie jak różnego rodzaju obudowy, elementy karoserii samochodowych czy też elementy stosowane w przemyśle lotniczym wymagają łączenia. Najczęściej stosowaną metodą łączenia blach tytanowych, poza nitowaniem jest spawanie i tej problematyce jest poświęcony niniejszy artykuł.

2. SPECYFIKA SPAWANIA TYTANU I JEGO STOPÓW

Spawanie tytanu i jego stopów wymaga doboru odpowiednich metod spawania z uwagi na dużą aktywność chemiczną i zdolność do dyfuzji gazów: tlenu azotu i wodoru w temp. powyżej 500°C. Prowadzi to do niepożądanych zmian w spoinie i ogranicza ilość stosowanych metod spawania. Stąd też spawanie stopów tytanu powinno się odbywać w osłonie gazów obojętnych np. w osłonie argonu. Do często stosowanych metod spawania zwłaszcza blach tytanowych należy spawanie wiązką elektronów.

Ze względu na szczególne właściwości fizyczne a zwłaszcza małe przewodnictwo cieplne, tytan charakteryzuje się odmiennymi cyklami cieplnymi spawania w porównaniu ze stalą. Dotyczy to zwłaszcza szybkości chłodzenia w strefie wpływu ciepła. Szybkość chłodzenia w strefie wpływu ciepła jest 2-3 razy mniejsza niż w przypadku stali, przy zachowaniu tych samych parametrów spawania [1].

W przypadku spawania stopów tytanu zmiany objętości związane z przemianami fazowymi oraz duża nierównomierność nagrzewania są przyczyną powstawania naprężeń cieplnych. Dlatego istotny wpływ na jakość spoiny ma prawidłowy dobór parametrów spawania. Duży wpływ na jakość spoiny ma zawartość pierwiastków stopowych w stopach tytanu. Stopy jednofazowe o strukturze α charakteryzują się stosunkowo dobrą spawalnością. Głównym czynnikiem decydującym o własnościach plastycznych spoiny jest szybkość chłodzenia spoiny i strefy wpływu ciepła. Najlepsze własności plastyczne spoiny ze stopów tytanu uzyskuje się stosując średnie i duże szybkości chłodzenia.

Elements made of titanium sheets such as different types of casings, car body parts or elements used in aircraft industry require joining. The most frequently used joining technique of titanium sheets, apart from riveting, is welding. This paper will focus on welding operation.

2. CHARACTERISTIC PROPERTIES OF TITANIUM AND ITS ALLOYS

Welding of titanium and its alloys requires selection of appropriate methods due to the fact that titanium has high chemical reactivity and easily absorbs gases such as oxygen, nitrogen and hydrogen at temperatures above 500°C. This causes undesirable changes in the weld and constrains the number welding methods that can be used. Welding operation of titanium sheets should be performed with use of protective gases such as argon. Another frequently used joining method of titanium sheets is electron beam welding.

In comparison to steel, due to different physical properties especially low thermal conductivity, titanium is characterized by different thermal cycles during welding. This phenomena affect mainly cooling rates in heat affected zone. Cooling speed in heat affected zone is 2-3 times lower compared to steel for the same set of welding parameters in both cases [1].

In case of titanium alloy welding changes in volume caused by phase transformations and large unevenness of heating are factors causing occurrence of thermal stresses. Thus selection of appropriate set of welding parameters has significant impact on weld quality. Weld quality is also influenced to a large extent by the content of alloying elements. Single phase alloys with α microstructure are characterized by relatively good weldability. Main factor having impact on weld plastic properties is cooling rate in fusion zone and heat affected zone. The best plastic properties are for high and medium cooling speeds.

Spawanie stopów tytanu o strukturze $\alpha+\beta$ jest nieco trudniejsze, a spoiny tych stopów mają mniejszą plastyczność z uwagi na tworzenie się fazy martenzytycznej α' . Połączenia spawane wykonane z tych stopów należy poddawać obróbce cieplnej. Stopy jednofazowe β charakteryzują się stosunkowo dobrą spawalnością, cechuje je jednak większa zdolność do pochłaniania gazów w porównaniu ze stopami $\alpha+\beta$ [1].

Należy zatem dobierać odpowiednią metodę spawania a zwłaszcza szybkość chłodzenia.

3. CEL PRACY

Celem pracy jest analiza numeryczna procesu spawania wiązką elektronów, cienkich blach tytanowych w oparciu o MES. Na podstawie przeprowadzonej analizy określony będzie rozkład temperatury, zasięg strefy wpływu ciepła (SWC) oraz głębokość i szerokość przetopu w zależności od przyjętego modelu źródła ciepła.

W opracowaniu przedstawiono termomechaniczną (TMC) symulację procesu spawania wiązką elektronów przy użyciu metody elementów skończonych (MES). W pracy rozważano połączenie blachy z czystego technicznie tytanu z gatunku Grade 2 z blachą wykonaną ze stopu tytanu Grade 5 (Ti6Al4V). Blachy typu Tailored Welded Blanks – TWB łączy się w celu wykorzystanie dobrych właściwości plastycznych jednej z blach w połączeniu z dobrymi właściwościami wytrzymałościowymi drugiej blachy. Korzystne właściwości blach TWB uzyskuje się przy dobrze zaprojektowanym złączu spawanym.

W pracy podano przykładowo wyniki obliczeń dla następujących parametrów spawania:

– Zestaw parametrów: 50 kV, 4 mA, 20 mm/s.

Praca ma na celu skalibrowanie źródła ciepła przyjętego w obliczeniach numerycznych na podstawie danych z eksperymentu. Na podstawie obliczeń numerycznych określono strefę wpływu ciepła, wielkość deformacji spawanych blach, oraz naprężenia własne po spawaniu. Obliczenia zweryfikowano porównując deformację spawanego elementu uzyskanego w drodze eksperymentu z wynikami obliczeń numerycznych.

Weldability of titanium alloys with $\alpha+\beta$ microstructure is poorer and welds for these alloys have lower plasticity due to the occurrence of martensitic phase α' . Welded joints for these alloys should undergo heat treatment operation. Single phase alloys with β microstructure have relatively good weldability. However they are characterized by increased ability to absorb gases compared to alloys with $\alpha+\beta$ microstructure [1].

Thus appropriate welding method should be selected that allows for achieving required cooling rate.

3. GOAL OF WORK

The goal of the work is numerical analysis of electron beam welding process applied to joining of thin titanium sheets. The analysis was performed using finite element method, FEM. Temperature distribution, size of heat affected zone (HAZ), depth and width of fusion zone were determined for the assumed heat source model.

Thermo-mechanical (TMC) simulation of electron beam welding process using FEM was presented in the paper. The joining of two sheets, one made of technically pure titanium Grade 2 and the other of titanium alloy Grade 5 (Ti6Al4V), was analyzed in the work. Sheets of type Tailored Welded Blanks – TWB are joined in order to utilize combined properties of two sheets, one characterized by good plastic properties and the other characterized by good strength properties. The attractive property combination for TWB sheets can be used if weld joint is designed appropriately.

In the paper sample calculation results were given for the following welding parameters:

- Parameter set: 50 kV, 4 mA, 20 mm/s.

The goal of the work is calibration of heat source assumed in the numerical calculations on the basis of experimental results. The size of heat affected zone, effective stress distribution after welding and degree of deformation in the welded sheets were determined based on the results of numerical simulation. The calculation results obtained using numerical simulation were compared against the actual deformation of the welded object in order to verify the model.

4. OPIS MODELU

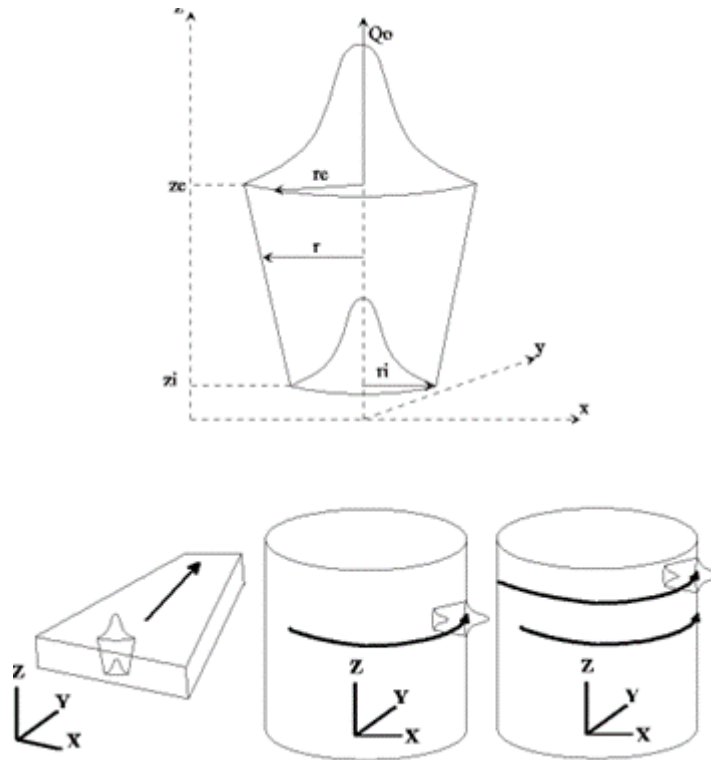
Model numeryczny zbudowano za pomocą Metody Elementów Skończonych MES przy użyciu programu SYSWELD [2]. W modelu uwzględniono zmiany naprężeń w funkcji temperatury. Takie rozwiązanie wymagało zbudowania modelu termomechanicznego. W modelu numerycznym zastosowano sześciennie elementy skończone o ośmiu węzłach.

W symulacji numerycznej zastosowano stożkowe źródło ciepła. Schemat stożkowego źródła ciepła pokazano na rys. 1. Taki model źródła ciepła jest używany w symulacjach numerycznych spawania za pomocą wiązki elektronów.

4. MODEL DESCRIPTION

Numerical model was based on Finite Element Method FEM using SYSWELD program [2]. The material model takes into account dependence of stress-strain curve on temperature. This approach required building thermo-mechanical model. Hexahedral elements with 8 nodes were applied in the numerical model.

Conical heat source was applied in the numerical simulation. Fig. 1 presents the diagram of conical heat source. The conical heat source is used for numerical simulations of high power density welding methods such as electron beam welding.



Rys. 1. Graficzna reprezentacja stożkowego źródła ciepła
Fig. 1. Graphical representation of conical heat source

Matematyczny opis stożkowego źródła ciepła można przedstawić za pomocą równania [3]:

$$Q(x, y, z) = Q_0 \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{r_0^2(z)}\right)$$

$$r_0(z) = r_e + \frac{r_i - r_e}{z_i - z_e}(z - z_e)$$

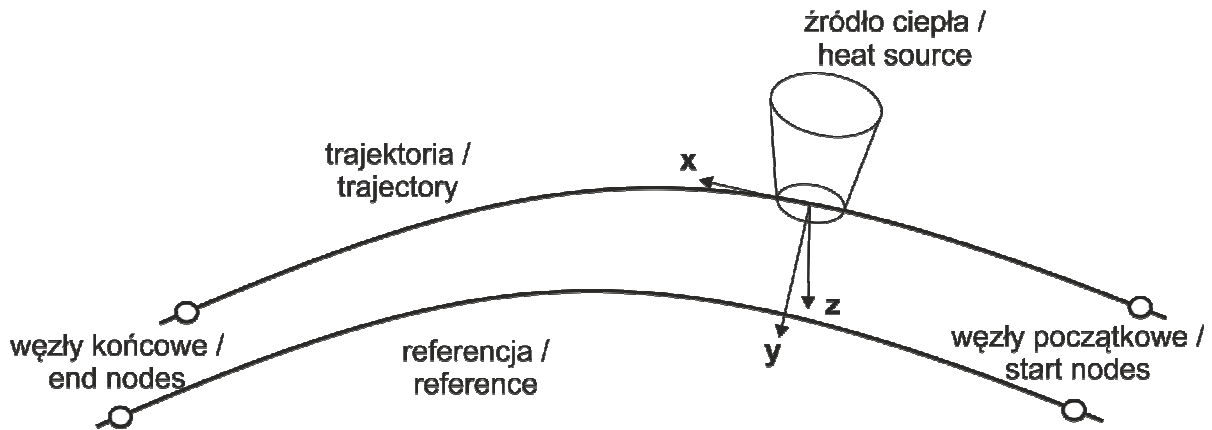
Mathematical description of conical heat source is represented by the following equation [3]:

$$Q(x, y, z) = Q_0 \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{r_0^2(z)}\right)$$

$$r_0(z) = r_e + \frac{r_i - r_e}{z_i - z_e}(z - z_e)$$

W programie SYSWELD do opisu trajektorii spawania źródła ciepła niezbędne są dwie linie. Jedna tzw. „Trajectory” definiuje linie spawania, a druga tzw. „Reference” pozycjonuje źródło ciepła w przestrzeni 3D. Ponadto niezbędne jest określenie początku i końca trajektorii spawania, co ilustruje rys. 2.

In SYSWELD program the trajectory of welding heat source is defined by two lines. The first line “Trajectory” corresponds to trajectory along which electron beam moves and the second line “Reference” is used to define direction of the conical heat source in 3D space. Additionally the beginning and the end of heat source trajectory must be also defined, which is presented in Fig. 2.



Rys. 2. Schemat metody opisu trajektorii spawania zastosowany w programie SYSWELD

Fig. 2. Diagram of welding trajectory definition used in SYSWELD program

W całym modelu użyto 6232 elementów. Całkowita liczba wygenerowanych węzłów wyniosła 12184. Z uwagi na nieliniowy i niestacjonarny charakter zadania w obliczeniach zastosowano 4800 kroków czasowych (time step). Wartość pojedynczego kroku czasowego wynosiła 0.05 s. Cały symulowany proces wynosi 240 s z czego 8 sekundy stanowi proces spawania na drodze 160 mm.

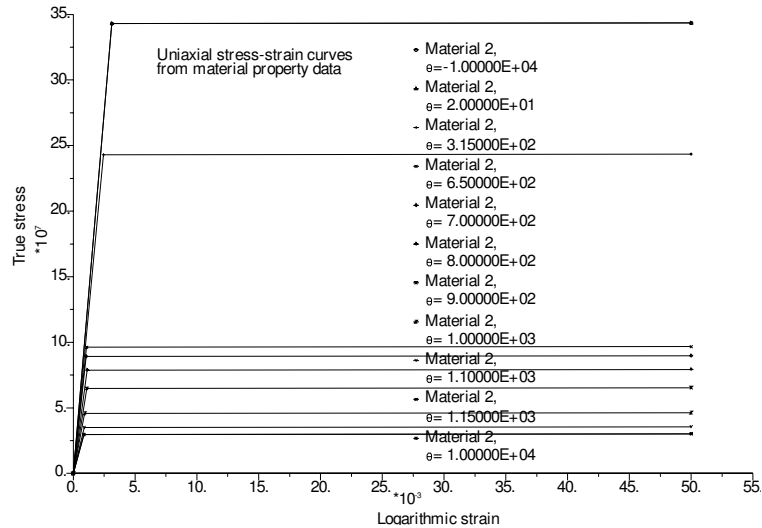
Model mechaniczny

W zakresie statycznej analizy mechanicznej przyjęto trójwymiarowy 3D stan naprężenia [4], [5]. Do opisu zachowania się materiału zastosowano model sprężysto-plastyczny. Właściwości poszczególnych materiałów przedstawiono na rys. 3 oraz rys. 4.

In the whole model 6232 elements were used. The total number of generated nodes was 12184. Due to the fact that the analyzed process has nonlinear transient character during calculations 4800 time steps were applied. The single time step corresponds to period of time equal to 0.05 s. The whole simulated process lasted 240 s where 8 s correspond to welding along 160 mm long trajectory.

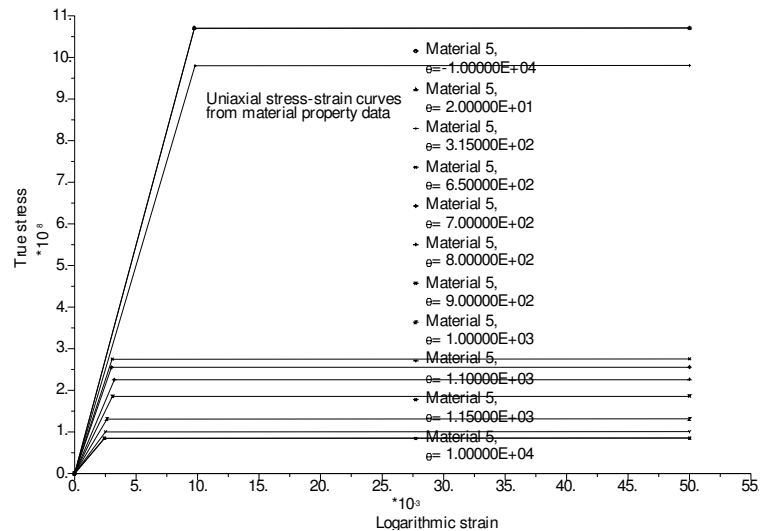
Mechanical model

In the scope of static mechanical analysis three dimensional stress state was assumed [4], [5]. The behavior of material was described by elastic-plastic material model. The material properties corresponding to stress-strain curves for titanium Grade 2 and Grade 5 were presented in Fig. 3 and 4.



Rys. 3. Przyjęte właściwości materiału sprężysto-plastycznego dla stopu Grade 2

Fig. 3. The assumed properties of elastic-plastic material for titanium Grade 2



Rys. 4. Przyjęte właściwości materiału sprężysto-plastycznego dla stopu Grade 5

Fig. 4. The assumed properties of elastic plastic material for titanium Grade 5

Model termiczny

W analizie termicznej zastosowano płaski trójwymiarowy 3D model wymiany ciepła opisany równaniem Fouriera [6]. Założono, że temperatura początkowa blach wynosi $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. W objętości symulującej kroplę przy spawaniu wydziela się ciepło wewnętrzne w ilości $150 \cdot 10^9\text{ W/m}^3$ (Internal heat) w czasie 0,2 s. Kolejna objętość (kropla) metalu pojawia się po 0,2 s. Dla materiału Grade 2 oraz Grade 5 założono współczynnik przewodzenia ciepła $k = 6,7\text{ W/mK}$, ciepło właściwe 526 J/KgK , oraz gęstość 4430 kg/m^3 .

Thermal model

The flat 3D model of heat exchange described by Fourier equation [6] was used for the purpose of thermal analysis. It was assumed that initial temperature of sheets is equal to $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Volumetric heat source was applied so that in the volume of material corresponding to electron beam operation density of power is set to $150 \cdot 10^9\text{ W/m}^3$ (Internal heat) for the period of time equal to 0,2 s. After 0,2 s heat source moves to the next volume of material. For titanium Grade 2 and Grade 5 the following values were assumed: thermal conductivity is 6.7 W/mK , specific heat is 526 J/KgK , and density is 4430 kg/m^3 .

Geometria spawanych blach

Do analizy przyjęto blachę tytanową Grade 2 o długości 160 mm i szerokości 30 mm i grubości 0,8 mm, oraz Grade 5 o takich samych wymiarach. Widok siatki elementów skończonych analizowanego połączenia doczołowego pokazano na rys. 5.

Badania eksperymentalne

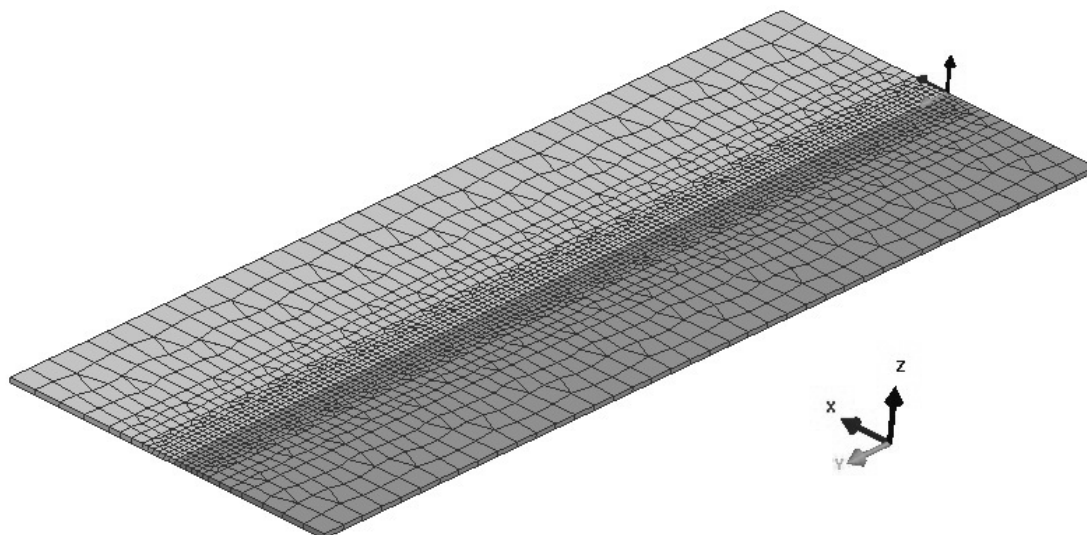
Do weryfikacji i oceny obliczeń numerycznych użyto próbki spawanej wiązką elektronów według tych samych zasad jak w obliczeniach numerycznych. Przykładowo próbkę z badań doświadczalnych pokazano na rys. 6.

Geometry of welded sheets

For the purpose of analysis titanium sheets were taken with length of 160 mm, width of 30 mm and depth of 0.8 mm. Both titanium Grade 2 and Grade 5 had the same dimensions. The overall view of finite element mesh corresponding to welded sheets is presented in Fig. 5.

Experimental research

For the purpose of verification and assessment of numerical calculations the electron beam welded specimen was taken. The parameters used in simulation and actual welding process were identical. The specimen used in the analysis is presented in Fig. 6.



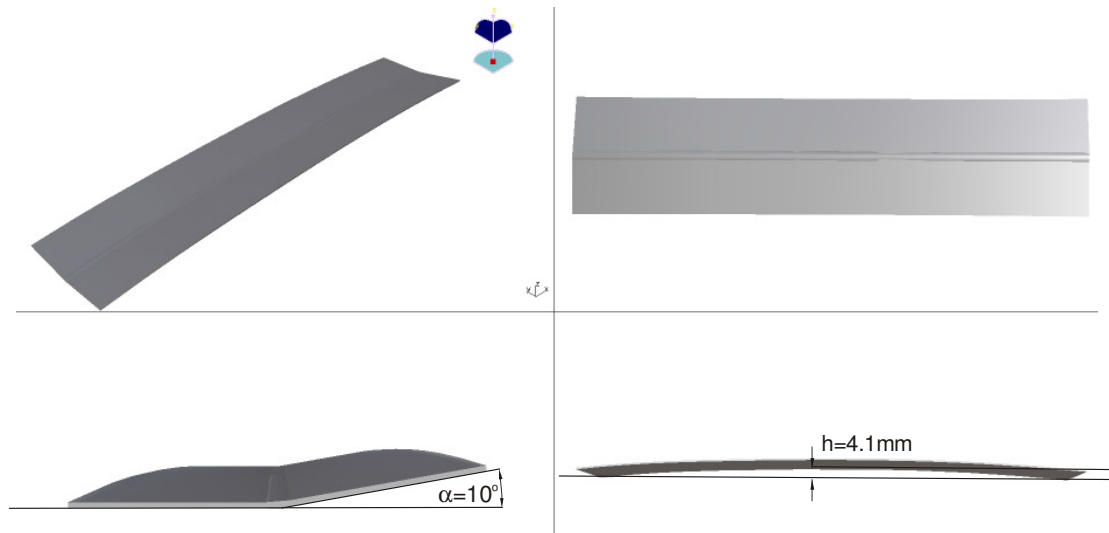
Rys. 5. Siatka elementów skończonych analizowanego połączenia

Fig. 5. Overall view of finite element mesh corresponding to welded sheets



Rys. 6. Widok próbki po spawaniu

Fig. 6. Overall view of specimen after welding



Rys. 7. Schemat próbki po spawaniu z zaznaczoną charakterystyką deformacji
 Fig. 7. Diagram of specimen after welding with visible deformation characteristics

Próbka po spawaniu ulega deformacji we wszystkich płaszczyznach układu kartezjańskiego. Na rys. 7 pokazano schemat próbki po spawaniu z zaznaczoną charakterystyką deformacji. Przedstawiono istotne wymiary opisujące deformację spawanego połączenia.

Due to welding operation the specimen deforms in all planes of Cartesian coordinate system. Fig. 7 presents diagram of specimen after welding with highlighted deformation characteristics. The important aspects of deformation were measured and their value were put into the figure.

5. WYNIKI OBLICZEŃ NUMERYCZNYCH DLA PARAMETRÓW: 50 kV, 4 mA, 20 mm/s

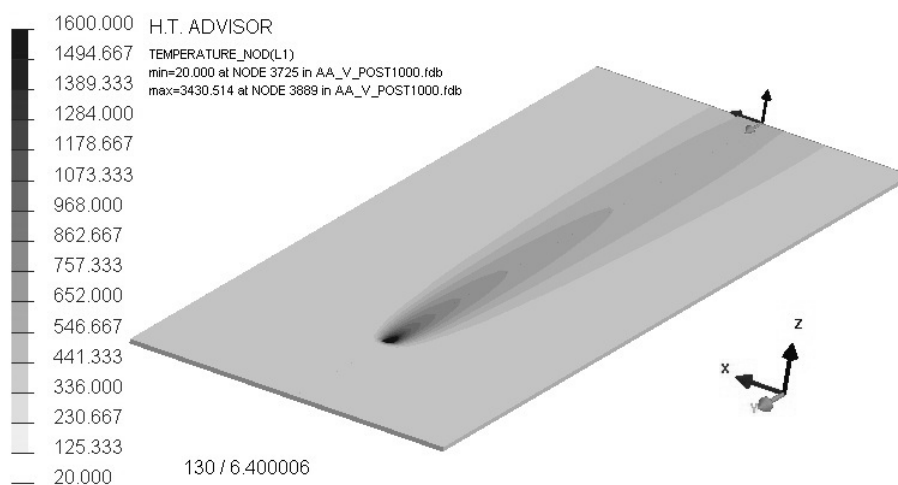
Temperatura

Na rys. 8 pokazano zmianę temperatury w czasie 6,4 s procesu spawania.

5. THE RESULTS OF NUMERICAL CALCULATIONS FOR PARAMETERS: 50 kV, 4 mA, 20 mm/s

Temperature

Fig. 8 presents temperature distribution 6.4 s after welding operations started.



Rys. 8. Rozkład temperatury, °C na powierzchni spawanej próbki w 6,4 s procesu spawania
 Fig. 8. Temperature distribution, °C, at the surface on the analyzed specimen 6.4 s after welding started

Wyniki badań numerycznych. Naprężenia

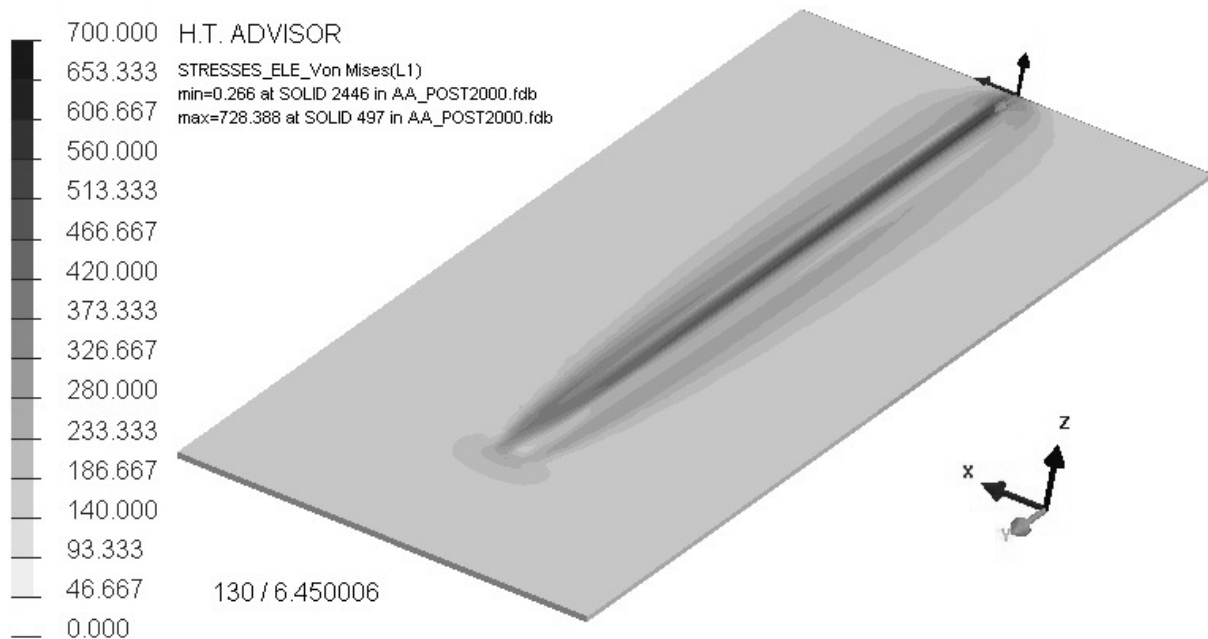
Obliczenia numeryczne, na podstawie przyjętych założeń, pozwalają na uzyskanie danych o badanych procesach. W procesie spawania jedną z najtrudniejszych informacji do uzyskania jest określenie naprężeń własnych. Naprężenia własne przedstawione w postaci naprężeń zredukowanych pojawiają się już w pierwszych sekundach spawania i narażają przez cały czas trwania procesu. Maksymalna wartość naprężeń zredukowanych w 1 s procesu wynosi 391 MPa. Rysunek 9 przedstawia zmianę naprężeń własnych po 6,4 s od chwili rozpoczęcia procesu spawania. W tym przypadku maksymalne naprężenia wzrastają do 728 MPa.

Po zakończeniu procesu spawania temperatura wyrównuje się a rozkład naprężeń własnych ustala się na poziomie pokazanym na rys. 10.

Results of numerical calculations. Stresses

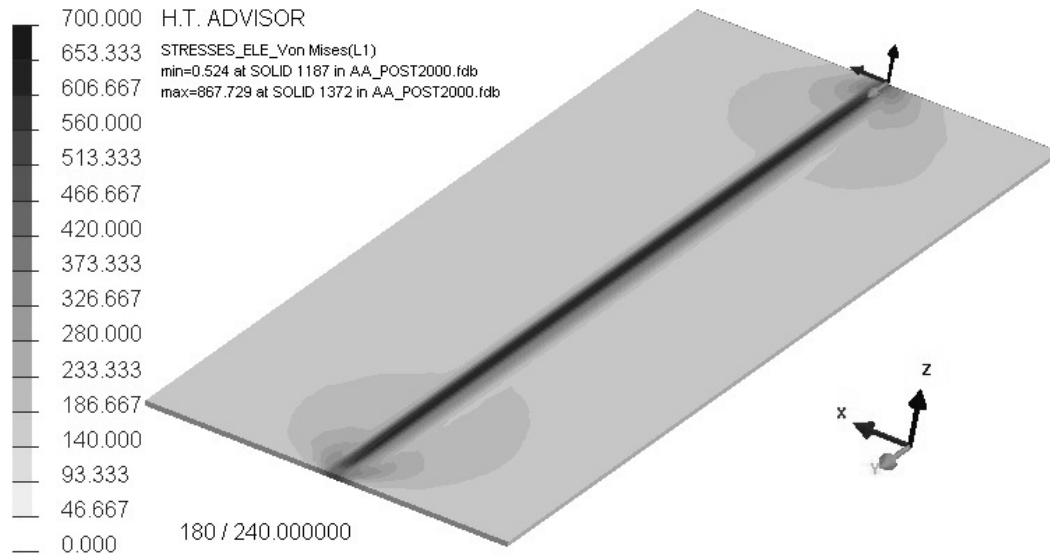
Numerical calculations, on the basis of formulated assumptions, allow for gaining information about analyzed processes. In case of welding process one the most difficult to obtain data are residual stress values. Residual stresses presented as effective stresses start to occur during first second of welding operation and they increase throughout the welding process. The maximal value of effective stress in the first second is 391 MPa. Fig. 9 presents distribution of effective stress 6.4 s after welding operation started, the maximal value of effective stress is 728 MPa.

After welding operation ends temperature distribution becomes uniform and stress distribution is as presented in Fig. 10.



Rys. 9. Rozkład naprężeń zredukowanych, MPa w trakcie spawania w 6,4 s spawania

Fig. 9. Effective stress distribution, MPa, 6.4 s after welding operations started



Rys. 10. Rozkład naprężeń zredukowanych, MPa po wyrównaniu temperatury

Fig. 10. Effective stress distribution, MPa, after temperature distribution becomes uniform

Po ustaleniu się temperatury (240 s od chwili spawania) maksymalne naprężenia osiągną wartość 867 MPa i występują w strefie wpływu ciepła po stronie stopu Grade 5, który ma wyższą granicę plastyczności.

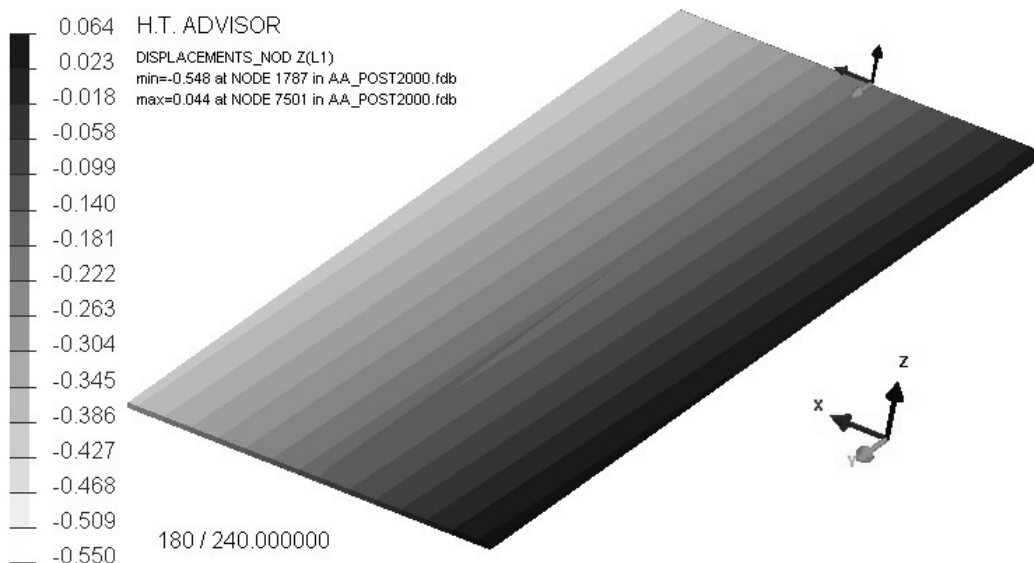
Wyniki badań numerycznych. Deformacja

Deformację spawanych blach pokazano na rys. 11.

After temperature distribution becomes uniform (240 s after welding operation starts) effective stresses have maximal value of about 867 MPa and occur in heat affected zone at the side corresponding to Grade 5, which has higher yield stress.

Numerical calculation results. Deformation

Deformation of welded sheets is presented in Fig. 11.



Rys. 11. Wielkość przemieszczeń, mm charakteryzujących deformację spawanej próbki

Fig. 11. Displacement distribution, mm, characterizing deformation of welded specimen

6. PODSUMOWANIE

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń numerycznych można stwierdzić, że:

- Spawane blachy tytanowe ulegają deformacji na skutek wprowadzenia ciepła przy spawaniu. Wielkość deformacji zależy od ilości energii wprowadzonej do spoiny. Wraz ze wzrostem ilości wprowadzonej energii rośnie deformacja spawanej próbki. Badania doświadczalne potwierdzają jakościową zgodność tych badań z obliczeniami numerycznymi.
- Przy stałych referencyjnych parametrach napięcia przyspieszającego 50 kV, prędkości spawania 20 mm/s i natężenia prądu wiązki 4 mA maksymalna obliczona temperatura spawania dochodzi do 3430 °C. Obniżenie natężenia prądu wiązki o 1 mA w stosunku do parametrów referencyjnych powoduje średnio spadek maksymalnej temperatury spawania o 1000 °C.
- Naprężenia własne w 1 s od rozpoczęcia spawania osiągają wartość 390 MPa dla parametrów referencyjnych. Obniżenie natężenia prądu wiązki o 1 mA w stosunku do parametrów referencyjnych powoduje średnio spadek naprężeń własnych o 60 MPa w 1s spawania.
- Naprężenia własne w 6,4 s od rozpoczęcia spawania osiągają wartość 728 MPa dla parametrów referencyjnych. Obniżenie natężenia prądu wiązki o 1 mA w stosunku do parametrów referencyjnych powoduje spadek naprężeń własnych o 70 MPa w 6,4 s spawania. Obniżenie natężenia prądu wiązki o 2 mA w stosunku do parametrów referencyjnych powoduje spadek naprężeń własnych aż o 440 MPa w 6,4 s spawania.
- Obliczone naprężenia własne po spawaniu wiązką elektronów EBW dla parametrów referencyjnych osiągają wartość 867 MPa i występują w strefie wpływu ciepła po stronie stopu Grade 5, który ma wyższą granicę plastyczności.

6. SUMMARY

On the basis of performed numerical calculation the following conclusions can be made:

- *The welded titanium sheets undergo deformation due to heat input occurring during welding. Degree of deformation depends on amount of heat introduced into the joint. As amount of introduced energy increases also the deformation of welded specimen increases. There is qualitative agreement between empirical research and experimental calculations.*
- *For the constant reference set of parameters: accelerating voltage of 50 kV, welding speed of 20 mm/s and beam current of 4 mA maximal calculated temperature achieves value of 3430 °C. Decreasing beam current by 1 mA relative to the reference set of parameters causes decrease of maximal temperature by 1000 °C.*
- *Effective stress in the first second of welding operations achieves value of 390 MPa for the reference set of parameters. Decreasing beam current by 1 mA relative to the reference set of parameters causes decrease of effective stress by 60 MPa in the first second of welding operation.*
- *Effective stress 6.4 s after welding operations starts achieves maximal value of about 728 MPa for the reference set of parameters. Decreasing beam current by 1 mA relative to the reference set of parameters causes decrease of effective stress by 70 MPa 6.4 s after welding operation starts. In identical set-up decreasing beam current by 2 mA causes decrease of effective stress by 440 MPa.*
- *Effective stresses at the end of electron beam welding achieve maximal value of 867 MPa for the reference set of parameters and they occur in heat affected zone at the side corresponding to Grade 5, that has higher yield stress.*

- Przy zmniejszeniu natężenia prądu wiązki z 4 mA do 3 mA maksymalna wartość naprężeń zredukowanych maleje z 867 do 810 MPa, o 8% maleje również deformacja blach. Mniejsza moc wiązki wiąże się z mniejszym rozmiarem strefy przetopienia. Jednak z technologicznego punktu widzenia tak mała strefa przetopienia może powodować problemy z uzyskaniem pełnego przetopu, co stanowi wadę połączenia spawanego.
- *Decreasing of electron beam current from 4 to 3 mA causes decrease in maximal value of effective stress from 867 to 810 MPa. Simultaneously the degree of deformation decreases by 8%. The lower value of beam power results in smaller size of fusion zone. However, from technological point of view such small fusion zone might lead to problems with achieving full depth fusion which is considered weld defect.*

Podziękowania

Badania realizowane w ramach Projektu "Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym", Nr PO-IG.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", No POIG.01.01.02-00-015/08-00 is gratefully acknowledged.

LITERATURA/REFERENCES

- [1] Bylica A., Sieniawski J.: Tytan i jego stopy. PWN, Warszawa, 1985.
- [2] Pyttel T.: Finite Element Course. ESIGmbH, Eschborn, 2002.
- [3] Ferro P., Zambon A., Bonollo F.: Investigation of electron-beam welding in wrought Inconel 706 – experimental and numerical analysis. Materials Science and Engineering A, 392 (2005) 94 -105.
- [4] Zienkiewicz O.C.: Metoda Elementów Skończonych. Arkady, Warszawa 1972.
- [5] Bathe K.J.: Finite Element Procedures. Prentice-Hall Inc. Upper Saddle River, New Jersey, 1996.
- [6] Dean Deng, Hidekazu Murakawa, Wei Liang: Numerical and experimental investigations on welding residual stress in multi-pass butt-welded austenitic stainless steel pipe. Computational Materials Science 42 (2008) 234–244.