

KRÓL Roman

ANALIZA NUMERYCZNA PROCESU SPAWANIA I JEGO WPŁYWU NA TRWAŁOŚĆ ZMĘCZENIOWĄ ZŁĄCZA NAROŻNEGO

Streszczenie

W artykule przedstawione zostały rezultaty analizy numerycznej procesu spawania łukowego. Analiza wykonana została w programie MSC Marc, z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Przedstawione zostały rezultaty spawania modelu złącza narożnego dla dwóch różnych prędkości spawania oraz stałej wartości mocy źródła ciepła. Otrzymano wyższe naprężenia własne przy spawaniu złącza z mniejszą prędkością, natomiast szerokość strefy wpływu ciepła w analizowanych przypadkach jest podobna.

W artykule został pokazany niekorzystny wpływ naprężeń własnych na trwałość zmęczeniową złącza narożnego. Dla trwałości zmęczeniowej 500 000 cykli, złącze bez naprężeń własnych może przenieść czterokrotnie większe obciążenie, niż złącze z naprężeniami własnymi po procesie spawania łukowego.

WSTĘP

Analiza naprężeń własnych jest ważnym etapem w projektowaniu nowego produktu lub podczas poprawy trwałości maszyn, konstrukcji lub ich części. O ile celowe wprowadzenie naprężeń własnych może poprawić parametry wytrzymałościowe detali pracujących pod stałym lub cyklicznym obciążeniem, to powstawanie tych naprężeń w procesie spawania ma zwykle jedynie negatywne skutki prowadzące do znacznego obniżenia trwałości zmęczeniowej złącza. W przypadku jednoosiowego stanu, naprężenia własne można obniżyć przez przeciążenie powyżej granicy plastyczności. Jeśli naprężenia własne w spawanym elemencie zmieniają się przestrzennie, to przeciążanie będzie skutkowało jedynie zmianą ich rozkładu [3]. Wartość tych naprężeń można obniżyć stosując cykliczne obciążenie relaksacyjne [8] lub dodatkową obróbkę termiczną.

W artykule pokazany został wpływ naprężeń własnych po spawaniu na trwałość zmęczeniową spawanego doczołowo złącza narożnego. Porównane zostały następujące warianty złącza narożnego poddanego cyklicznemu obciążeniu: złącze bez naprężeń własnych, złącze z naprężeniami własnymi od spawania z prędkością 0,005 m/s (0,3 m/min) oraz złącze z naprężeniami własnymi od spawania z prędkością 0,0083 m/s (0,5 m/min).

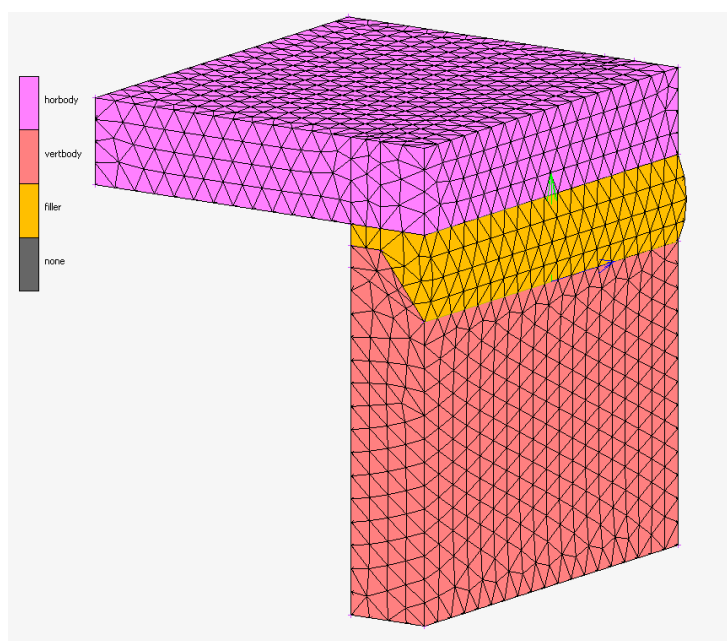
1. PARAMETRY ANALIZY TERMO-MECHANICZNEJ

1.1. Symulacja procesu spawania

Do przeprowadzenia analizy naprężeń własnych po spawaniu wykorzystany został program MSC Marc realizujący metodę elementów skończonych. W programie wykorzystywane są metody iteracyjne, w których rezultaty z poprzedniej iteracji są

przenoszone jako warunki brzegowe do kolejnej iteracji. Dla nieliniowej analizy strukturalnej wykorzystany został pięciowęzłowy element skończony czworościenny typu 157 przeznaczony do analiz, w których występują duże przemieszczenia.

Model geometryczny złącza ze spoiną narożną składa się z trzech ciał (rysunek 1). Są to dwie prostokątne płyty o grubości 0,01 m (10 mm), długości 0,05 m (50 mm) i szerokości 0,045 m (45 mm) złączone spoiną. Płyty są ukosowane, a spoina wykonana w kształcie $\frac{1}{2}$ V z granią o szerokości 0,0025 m (2,5 mm). Wymiana ciepła między ciałami odbywa się przy uwzględnieniu kontaktowego współczynnika przejmowania ciepła (*ang. contact heat transfer coefficient*) równego $10^5 \text{ kg}/(\text{s}^3\text{K})$ [$100 \text{ N}/(\text{mm}\cdot\text{s}\cdot\text{K})$]. Kontakt w programie MSC Marc modelowany był przy użyciu opcji *Glue*, która oznacza przenoszenie odkształceń między ciałami jak przy siatce jednorodnej oraz przenoszenie temperatur z uwzględnieniem kontaktowego współczynnika przejmowania ciepła.



Rys. 1. Model geometryczny złącza ze spoiną narożną podzielony na 17637 czworościennych elementów skończonych

Spawanie wykonane zostało dla tego samego modelu z dwiema różnymi prędkościami: 0,005 m/s (0,3 m/min) oraz 0,0083 m/s (0,5 m/min). Aby uniknąć problemów ze zbieżnością algorytmu numerycznego zastosowany został parametr *Thermal Activation Time* definiujący czas narastania warunków brzegowych. W zadaniach z ruchomym źródłem ciepła warunki brzegowe przemieszczają się, co może powodować zbyt gwałtowne zmiany temperatury w modelu numerycznym. W modelu złącza spawanego z prędkością 0,005 m/s (0,3 m/min) czas narastania warunków brzegowych wynosi 0,125 s, natomiast w modelu złącza spawanego z prędkością 0,0083 m/s (0,5 m/min) przyjęta została w celu uzyskania zbieżności wartość 0,2 s.

Parametry fizyczne procesu spawania przedstawione zostały w tabeli 1. Jako materiał płyt wybrana została sferoidyzowana stal konstrukcyjna 15H (PL). Podobny skład chemiczny mają stale: 15Cr3 (DIN), 10XCHД (GOST), 15XCHД (GOST), 5015 (SAE), 5115 (SAE) lub 1.7015 (EN). Do analizy zostały przyjęte zależne od temperatury krzywe płynięcia z biblioteki programu MSC Marc. Po procesie spawania źródło ciepła jest wyłączane i spoina stygnie przy uwzględnieniu jedynie wymiany ciepła przez konwekcję. Analiza termomechaniczna procesu spawania nie uwzględniała kompensacji naprężeń własnych w wyniku przemiany fazowej. Zostało to uwzględnione w punkcie 2 przy pomocy oddzielnych obliczeń.

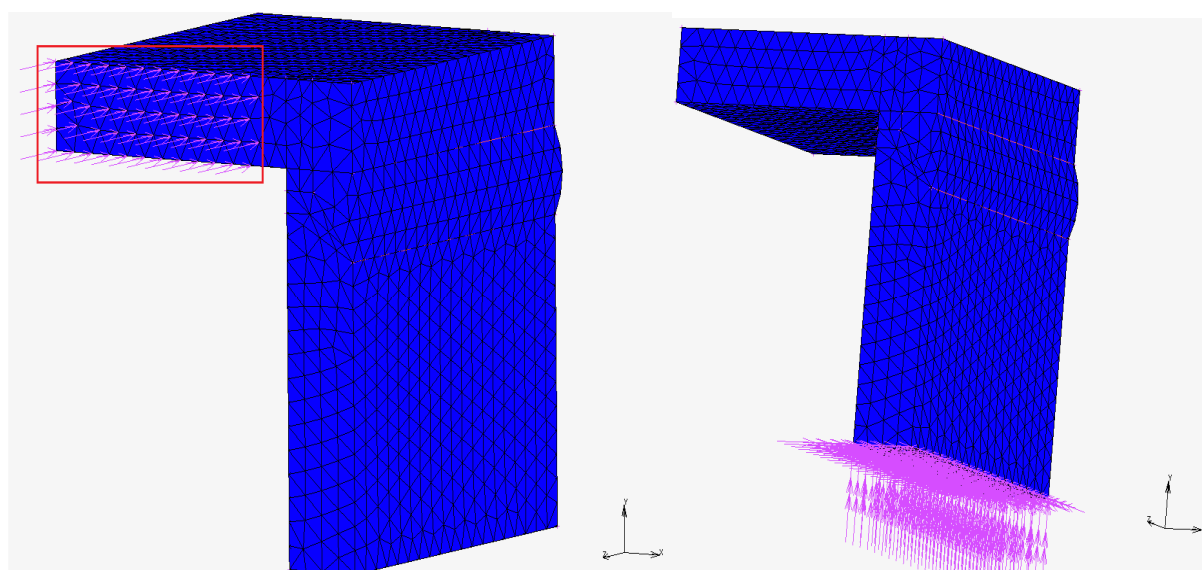
Spoina zamodelowana została z opcją *Quiet* [2, pp. 262]. Opcja ta oznacza, że parametry mechaniczne spoiny (oprócz granicy plastyczności, ciepła właściwego i gęstości) są skalowane. Jako współczynnik skali wybrana została domyślna wartość 10^{-5} . Gdy ruchome źródło ciepła obejmie element skończony spoiny, to parametry używane w analizie termicznej są aktywowane. Po osiągnięciu odpowiedniej temperatury aktywowane są także po czasie *Thermal Activation Time* wszystkie parametry materiałowe łącznie ze współczynnikiem rozszerzalności cieplnej. Zaletą opcji *Quiet* jest to, że elementy spoiny przy dużych odkształceniach podążają za odkształconym modelem. Może ona jednakże być przyczyną problemów ze zbieżnością analizy. Alternatywą jest opcja *Deactivated*, która nie powoduje złego uwarunkowania modelu ale aktywowane elementy mogą nie podążać za odkształconym modelem.

Tab. 1. Parametry fizyczne procesu spawania

Wielkość fizyczna	Wartość
Moc źródła ciepła	3600 kg·m ² /s ³ (3600 W)
Prędkość źródła ciepła	0,005 m/s (0,3 m/min) lub 0,0083 m/s (0,5 m/min)
Efektywność źródła ciepła	0,7
Współczynnik przejmowania ciepła podczas konwekcji	25 kg/(s ³ K) [0,025 N/(mm·s·K)]
Materiał płyt oraz materiał wypełniający spoinę	Stal 15Cr3 sferoidyzowana (15H)
Moduł umocnienia	1426·10 ⁶ kg/(m·s ²) (1426 MPa)
Czas spawania z prędkością 0,005 m/s (0,3 m/min)	10 s
Czas spawania z prędkością 0,0083 m/s (0,5 m/min)	6 s
Czas stygnięcia spoiny do temperatury 300 K	2300 s

1.2. Warunki brzegowe po procesie spawania (dla analizy zmęczeniowej)

Podczas analizy procesu spawania warunki brzegowe dla mechanicznej części analizy zostały przyłożone w taki sposób, aby nie powodowały powstawania koncentracji naprężeń w wyniku nagrzewania się modelu. W kolejnym etapie analizy, po wystygnięciu spoiny wykonana została nieliniowa analiza strukturalna z warunkami brzegowymi jak na rysunku 2. Trwałość zmęczeniowa spoiny obliczana była dla różnych wartości obciążenia przyłożonego jak na rysunku 2 z lewej.



Rys. 2. Warunki brzegowe po procesie spawania. Z lewej widoczny czerwony prostokąt na obszarze którego do węzłów przyłożone zostały siły, powodujące ścinanie ze skręcaniem. Z prawej widoczne są warunki brzegowe, blokujące zarówno liniowe jak i rotacyjne przemieszczenia

2. REZULTATY ANALIZY PROCESU SPAWANIA

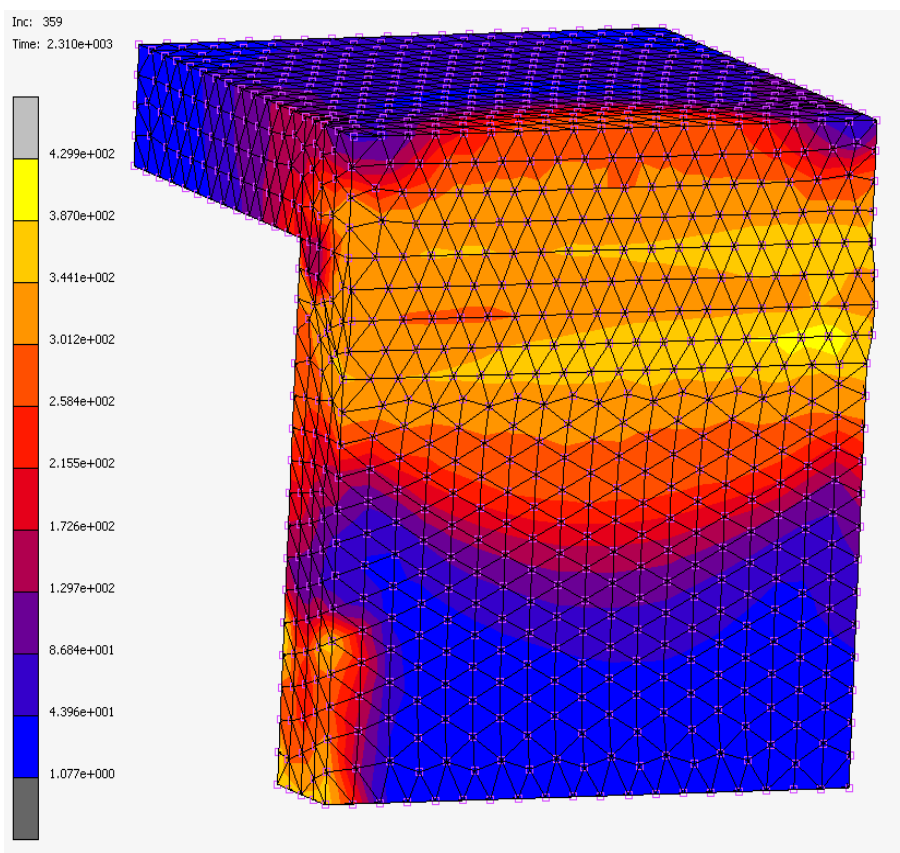
2.1. Naprężenia własne po spawaniu

Naprężenia własne po spawaniu mogą osiągać w aluminiowych i tytanowych stopach $0,5 \div 0,8$ granicy plastyczności. W stalach o niskiej zawartości węgla lub w stalach austenitycznych mogą one osiągać granicę plastyczności [5].

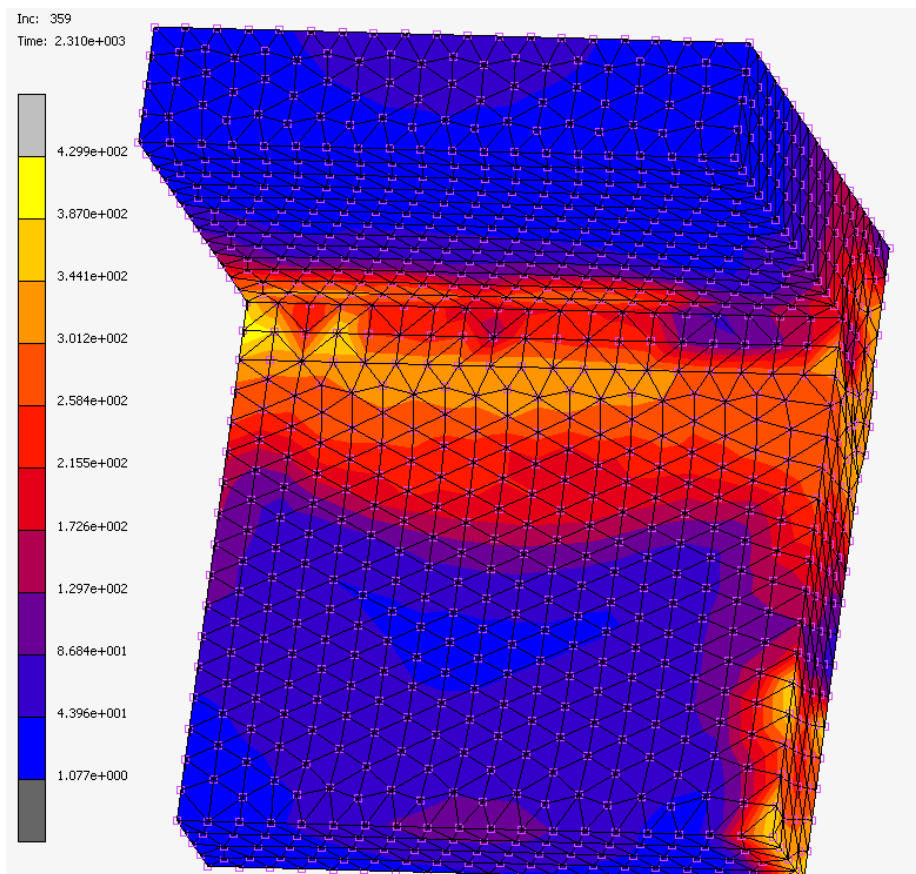
Istotne w analizie termomechanicznej jest uwzględnienie zależności parametrów materiałowych od temperatury. W stali 15Cr3 przyjętej do obliczeń granica plastyczności w temperaturze 293 K wynosi $394 \cdot 10^6 \text{ kg/(m}\cdot\text{s}^2)$ (394 MPa), a w temperaturze 873 K - $233 \cdot 10^6 \text{ kg/(m}\cdot\text{s}^2)$ (233 MPa). W temperaturach powyżej 1073 K przyjmuje się, że wynosi ona tylko $30 \cdot 10^6 \text{ kg/(m}\cdot\text{s}^2) \div 80 \cdot 10^6 \text{ kg/(m}\cdot\text{s}^2)$ ($30 \div 80$ MPa). Są to właściwości istotnie wpływające na poziom naprężeń własnych. Przeprowadzenie analizy przy granicy plastyczności niezależnej od temperatury i module umocnienia $E_H=1426 \cdot 10^6 \text{ kg/(m}\cdot\text{s}^2)$ (1426 MPa) dało w rezultacie zredukowane naprężenia własne osiągające $550 \cdot 10^6 \text{ kg/(m}\cdot\text{s}^2)$ (550 MPa).

Zaprezentowane w tym rozdziale rezultaty nie uwzględniają przemiany fazowej, która zgodnie z [4] może skompensować nawet $200 \cdot 10^6 \text{ kg/(m}\cdot\text{s}^2)$ (200 MPa) rozciągających naprężeń własnych. W niektórych zastosowaniach używa się stali z odpowiednią zawartością niklu, który decyduje o wartości temperatury końca przemiany fazowej. Im niższa jest ta temperatura, tym niższe będą rozciągające naprężenia własne po spawaniu lub obróbce termicznej [4, 5].

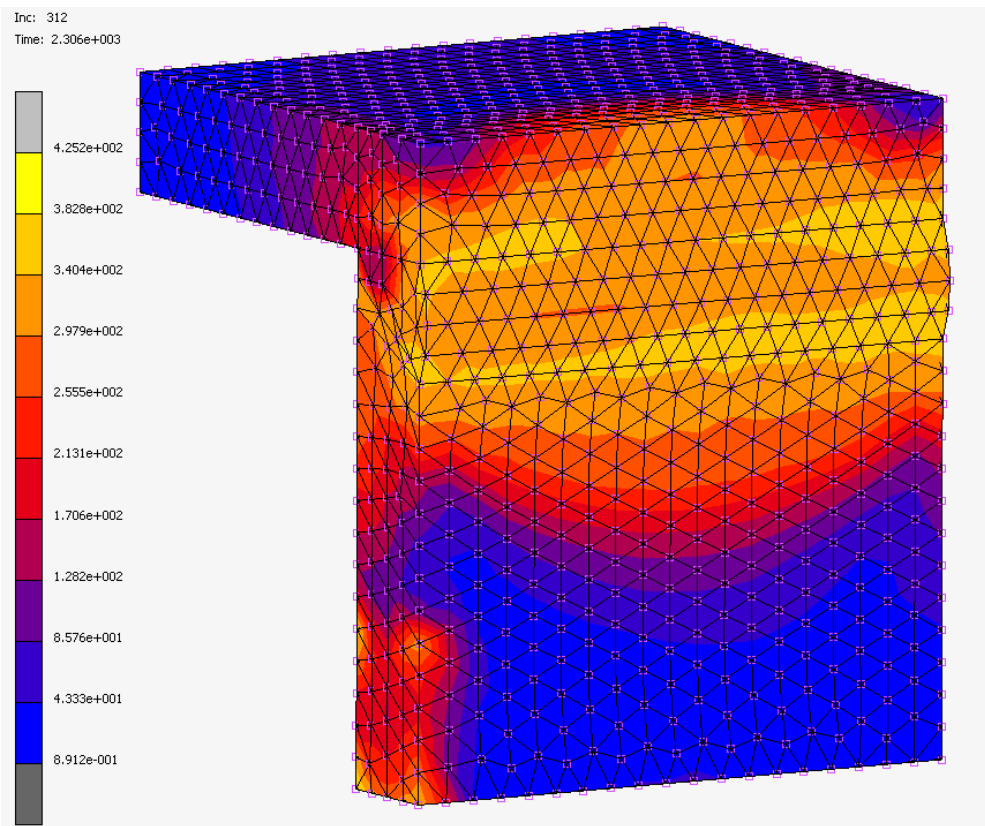
Na rysunku 3-5 pokazane zostały zredukowane naprężenia własne dla prędkości spawania 0,005 m/s (0,3 m/min) oraz 0,0083 m/s (0,5 m/min) po wystygnięciu złącza do temperatury pokojowej.



Rys. 3. Zredukowane naprężenia własne dla prędkości spawania 0,005 m/s (0,3 m/min), po wystygnięciu złącza do temperatury pokojowej

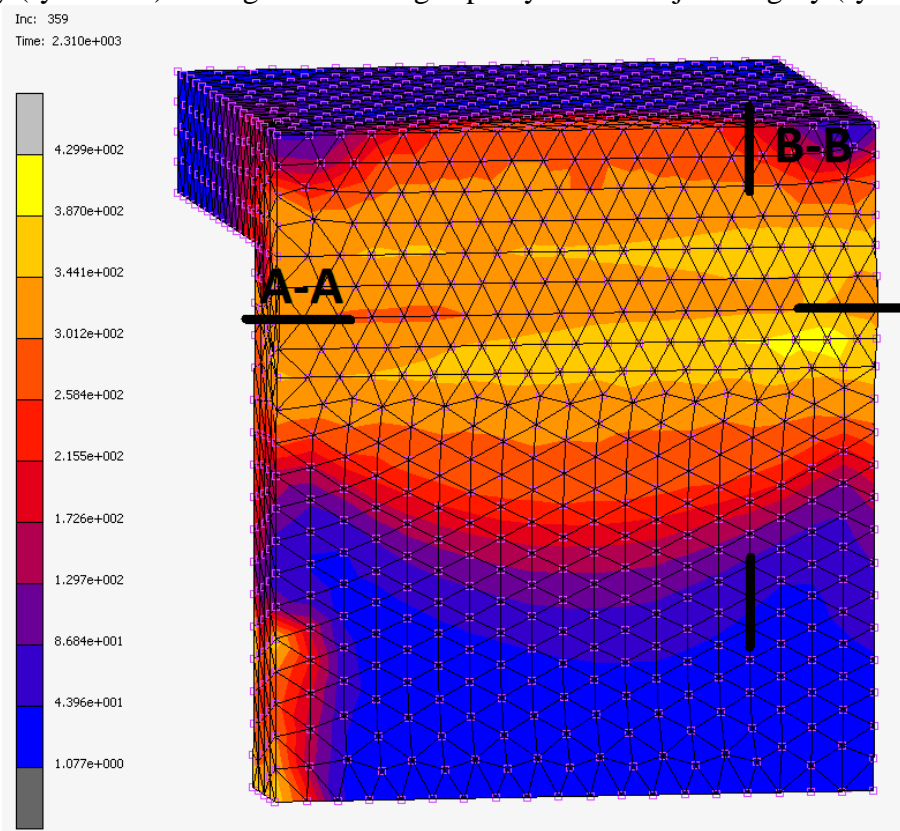


Rys. 4. Zredukowane naprężenia własne z rysunku 3 – wewnętrzna strona modelu

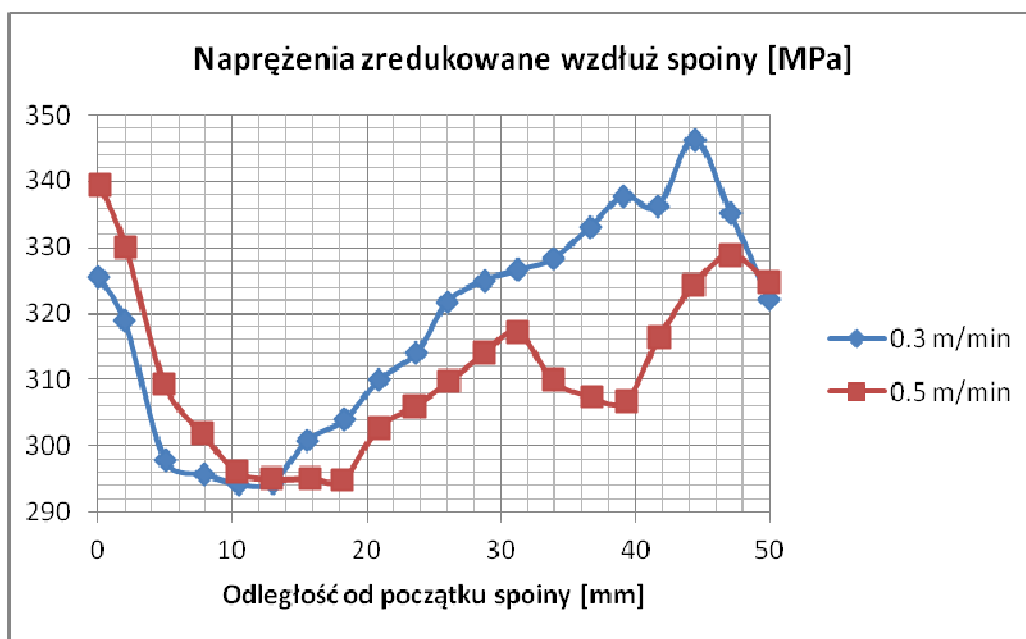


Rys. 5. Zredukowane naprężenia własne dla prędkości spawania 0,0083 m/s (0,5 m/min) po wystygnięciu złącza do temperatury pokojowej

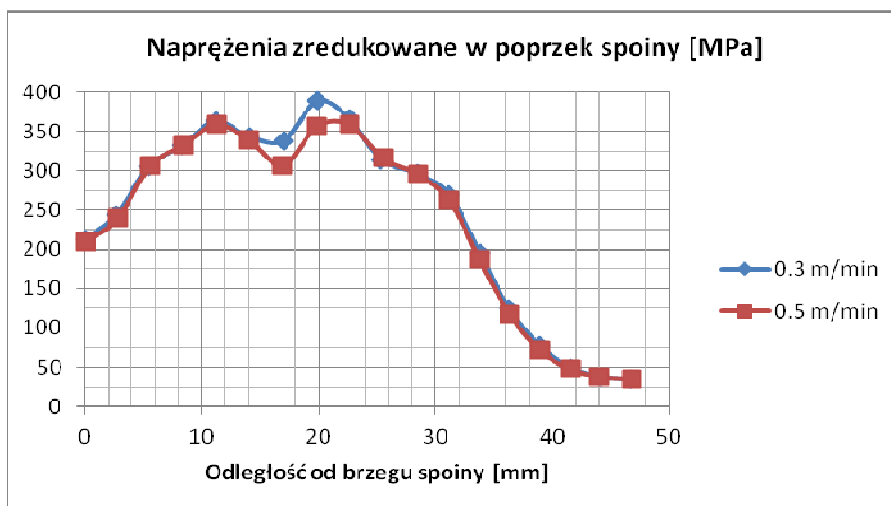
Na rysunku 7-10 przedstawione zostały wykresy zredukowanych naprężeń własnych w przekrojach A-A i B-B (rysunek 6) wzdłuż i w poprzek spoiny oraz tensorów YY i ZZ w przekrojach A-A (rysunek 6) wzdłuż spoiny. Odległość od początku spoiny mierzona jest od lewej strony (rysunek 6). Odległość od brzegu spoiny mierzona jest od góry (rysunek 6).



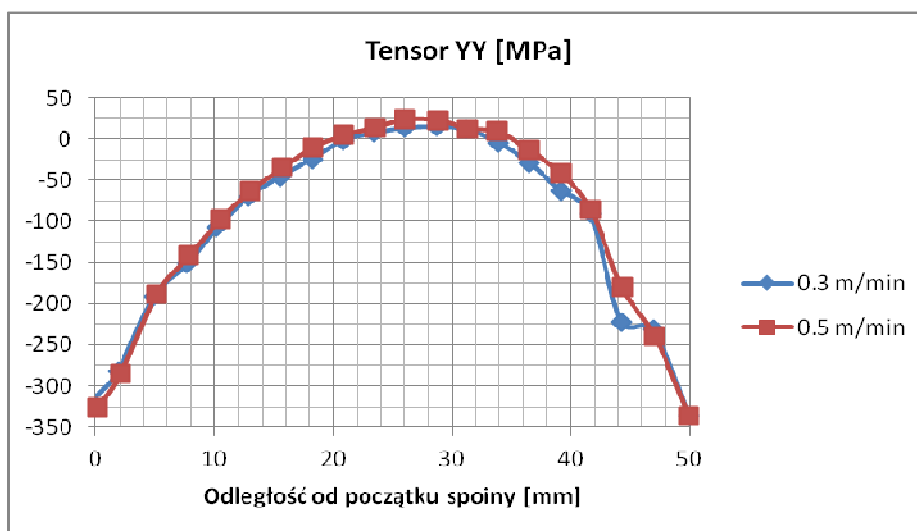
Rys. 6. Przekroje, w których wykonane zostały wykresy z rysunku 7-10. Przekrój A-A – wzdłuż spoiny i przekrój B-B – w poprzek spoiny



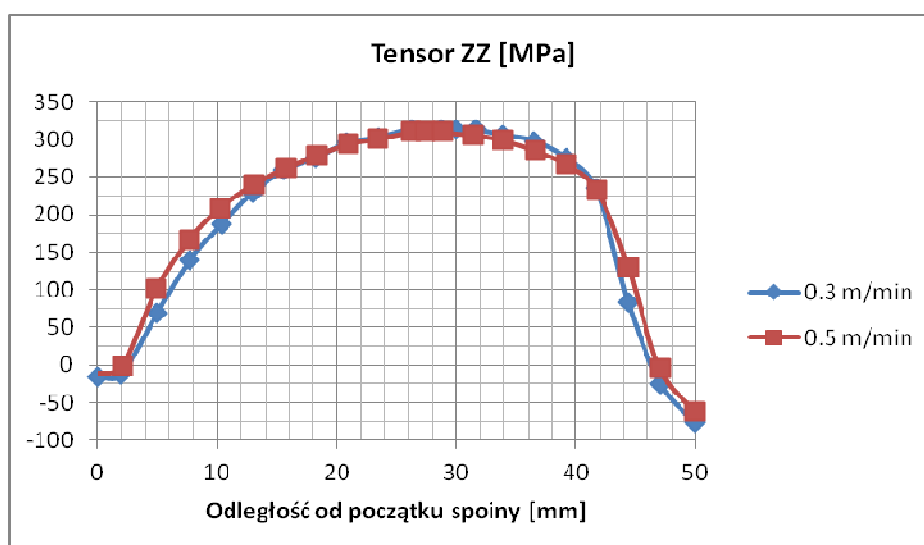
Rys. 7. Zredukowane naprężenia własne w przekroju A-A (rysunek 6) na powierzchni spoiny, po jej wystygnięciu dla dwóch różnych prędkości spawania



Rys. 8. Zredukowane naprężenia własne w przekroju B-B (rysunek 6) na powierzchni spoin, po jej wystygnięciu dla dwóch różnych prędkości spawania



Rys. 9. Tensor YY w poprzek spoiny naprężeń własnych w przekroju A-A (rysunek 6) na powierzchni spoiny, po jej wystygnięciu dla dwóch różnych prędkości spawania



Rys. 10. Tensor ZZ wzdłuż spoiny naprężeń własnych w przekroju A-A (rysunek 6) na powierzchni spoiny, po jej wystygnięciu dla dwóch różnych prędkości spawania

2.2. Kompensacja naprężeń własnych po przemianie fazowej

Zgodnie z [4] poziom naprężeń własnych z uwzględnieniem przemiany fazowej można oszacować ze wzoru (1) [7].

$$\varepsilon = \frac{5 \Delta V}{6 V} \frac{\sigma}{R_e}, \quad (1)$$

gdzie: ε – odkształcenie przy uwzględnieniu przemiany fazowej, $\Delta V/V$ – względna różnica objętości faz, σ – naprężenia, przy których zachodzi przemiana fazowa, R_e – granica plastyczności słabszej fazy.

Korzystając z danych w tabeli 2 oraz ze wzorów 2 ÷ 5 obliczona została wartość naprężeń, o którą zmniejszą się naprężenia zredukowane pokazane w punkcie 2.1. Uwzględniając przemianę fazową $\gamma \rightarrow \alpha$ zachodzącą podczas chłodzenia od temperatury 1053 K do temperatury 893 K, obliczone naprężenia zredukowane można zmniejszyć o $23 \cdot 10^6 \text{ kg/(m}\cdot\text{s}^2)$ (23 MPa).

Tab.2. Wielkości użyte do obliczeń kompensacji naprężeń własnych przez przemianę fazową

Wielkość	Wartość
ρ_γ	7600 kg/m ³
ρ_α	7650 kg/m ³
σ	$263 \cdot 10^6 \text{ kg/(m}\cdot\text{s}^2)$ (263 MPa)
R_e	$233 \cdot 10^6 \text{ kg/(m}\cdot\text{s}^2)$ (233 MPa)
E_{893}	$164920 \cdot 10^6 \text{ kg/(m}\cdot\text{s}^2)$ (164920 MPa)
E_{PL}	$1426 \cdot 10^6 \text{ kg/(m}\cdot\text{s}^2)$ (1426 MPa)
σ_{TR}	$23 \cdot 10^6 \text{ kg/(m}\cdot\text{s}^2)$ (23 MPa)

$$\varepsilon = \frac{5}{6} \cdot \left(1 - \frac{\rho_\gamma}{\rho_\alpha} \right) \frac{\sigma}{R_e}, \quad (2)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_E + \varepsilon_{PL}, \quad (3)$$

$$E_{893} \cdot \varepsilon_E = R_e, \quad (4)$$

$$\sigma_{TR} = \sigma - E_{893} \cdot \varepsilon_E - E_{PL} \cdot \varepsilon_{PL}, \quad (5)$$

gdzie: ρ_γ – gęstość fazy γ w temp. 1053 K, ρ_α – gęstość fazy α w temp. 893 K, σ – naprężenia, przy których zachodzi przemiana fazowa, R_e – granica plastyczności w temp. 893 K, E_{893} – moduł Younga w temp. 893 K, E_{PL} – moduł umocnienia, σ_{TR} – wartość naprężeń własnych, które są skompensowane w wyniku przemiany fazowej.

3. ANALIZA ZMĘCZENIOWA ZŁĄCZA NAROŻNEGO

Dla przedstawionego w artykule modelu złącza narożnego przeprowadzona została analiza zmęczeniowa. Sposób obciążenia i zamocowania modelu podczas analizy zmęczeniowej podane zostały w pkt. 1.2. W obliczeniach uwzględnione zostały warianty, w których występują naprężenia własne od spawania z dwiema różnymi prędkościami oraz wariant, w którym naprężenia własne nie występują. Uwzględniona została także kompensacja naprężeń własnych w wyniku przemiany fazowej. Amplituda naprężeń dla każdej wartości obciążenia wyznaczana była ze wzoru (6).

$$\sigma_a = 0.6 \cdot (\sigma_{SPA\dot{W}} + \sigma_{OBC}) - 0.4 \cdot (\sigma_{SPA\dot{W}} - \sigma_{OBC}), \quad (6)$$

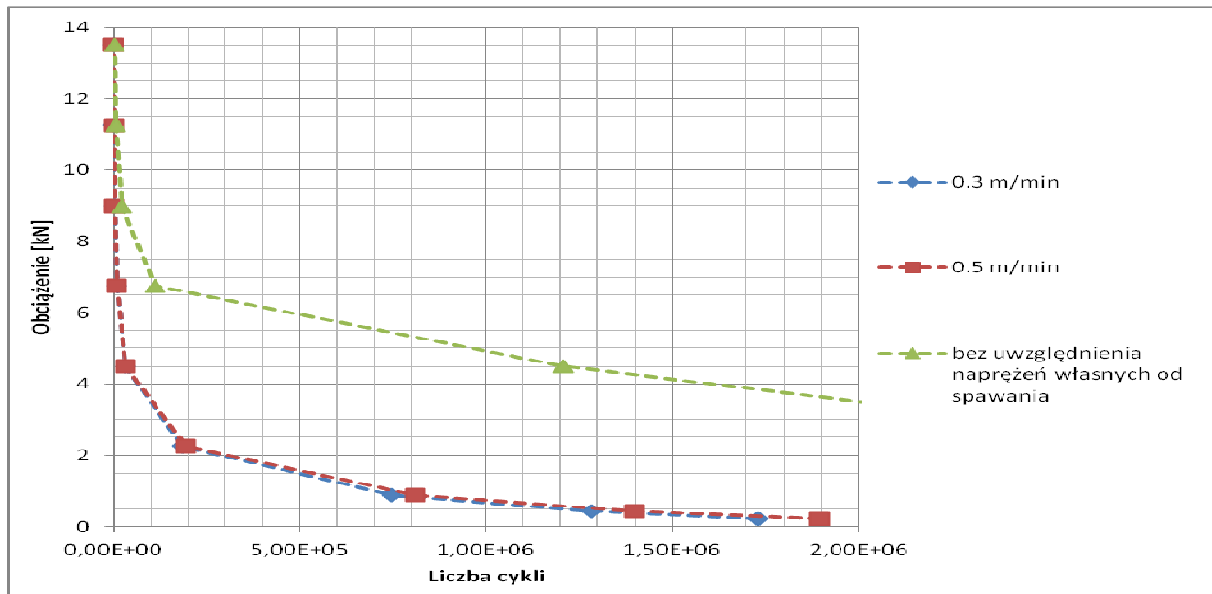
gdzie: $\sigma_{SPA\dot{W}}$ – naprężenia własne po spawaniu, σ_{OBC} – naprężenia od obciążenia siłami zewnętrznymi.

Po wyznaczeniu amplitudy naprężeń σ_A , trwałość zmęczeniowa wyznaczona została ze wzoru (7) uwzględniającego parametry materiałowe stali 15XCHД [6]. Dane te dotyczą próbek gładkich o przekroju okrągłym testowanych na rozciąganie-ściskanie.

$$N = 3 \cdot 10^6 \cdot \left(\frac{80}{\sigma_a} \right)^{5.68}, \quad (7)$$

gdzie: N – liczba cykli (trwałość zmęczeniowa), σ_a – amplituda naprężeń [MPa] wyznaczona ze wzoru (6).

Na rysunku 11 przedstawiona jest trwałość zmęczeniowa spoiny narożnej przy uwzględnionych naprężeniach własnych od spawania z prędkościami 0,005 m/s (0,3 m/min), 0,0083 m/s (0,5 m/min) i dla modelu spoiny bez naprężeń własnych.

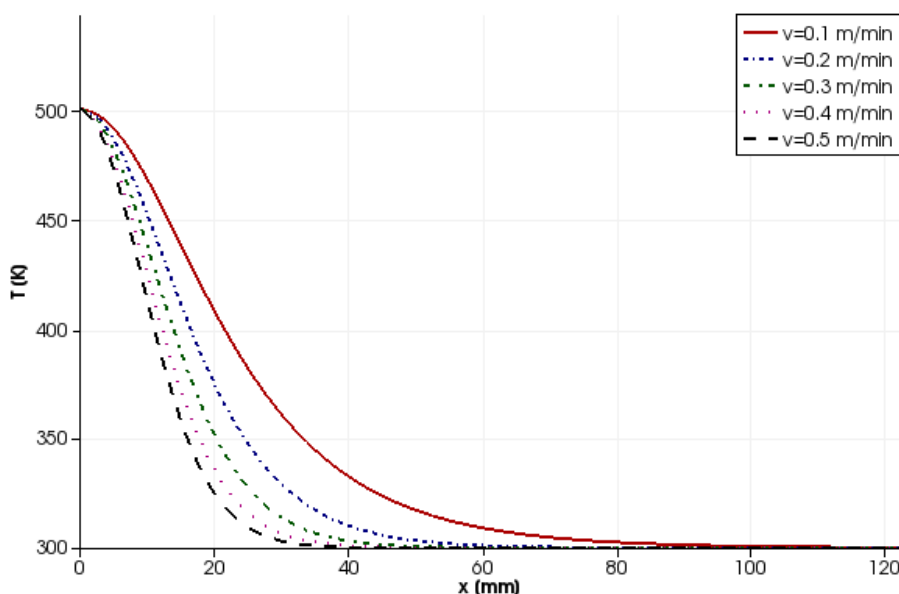


Rys. 11. Trwałość zmęczeniowa po spawaniu z dwiema różnymi prędkościami i bez uwzględnienia naprężeń własnych od spawania

PODSUMOWANIE

Z rezultatów analizy numerycznej procesu spawania, przytoczonych w punkcie 2.1 wynika, że przy spawaniu ze stałą mocą źródła ciepła $3600 \text{ kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^3$ (3600 W) naprężenia własne mają większą wartość przy prędkości spawania 0,005 m/s (0,3 m/min), niż przy prędkości 0,0083 m/s (0,5 m/min). W pierwszym przypadku czas spawania wynosi 10 s, co daje większą ilość oddanej przez źródło ciepła energii, w porównaniu do spawania trwającego 6 s. Tensory YY i ZZ na powierzchni spoiny przedstawione na rysunku 9 i 10 nie różnią się znacznie dla obydwu prędkości spawania. Zredukowane naprężenia własne wzdłuż spoiny (na rys. 7), po spawaniu z prędkością 0,005 m/s (0,3 m/min) mogą być nawet o $30 \cdot 10^6 \text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s}^2)$ (30 MPa) wyższe od naprężeń własnych przy prędkości spawania 0,0083 m/s (0,5 m/min).

Według literatury [1] prędkość spawania oddziałuje także na szerokość strefy wpływu ciepła. Z rysunku 8 widać, że strefy wpływu ciepła w modelach z dwiema różnymi prędkościami spawania prawie pokrywają się. Jest to uzasadnione tym, że przy zadanych prędkościach spawania różnice w rozkładzie temperatur od ruchomych źródeł ciepła są zbyt małe, żeby mogły spowodować istotne zmiany w szerokości strefy wpływu ciepła. Z rysunku 12 widać, że temperatury w pobliżu osi spoiny nie różnią się o więcej niż 10 K pomimo różnych prędkości spawania. Znaczące różnice temperaturowe występują w większych odległościach od osi spoiny.



Rys. 12. Rozkład temperatury w kierunku prostopadłym do osi spoiny dla różnych prędkości spawania. T – temperatura [K], x – odległość od osi spoiny [mm], v – prędkość [m/min] [1]

Na rysunku 11 pokazane zostało jak bardzo obecność spawalniczych naprężeń własnych obniża trwałość zmęczeniową złącza narożnego. Przy obecności naprężeń własnych trwałość zmęczeniowa złącza narożnego może wynosić $5 \cdot 10^5$ cykli przy obciążeniu $1500 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2$ (1.5 kN), podczas gdy taką samą trwałość zmęczeniową będzie mieć złącze, pozbawione naprężeń własnych przy obciążeniu czterokrotnie większym.

W części artykułu związanej z obliczeniami procesu spawania korzystano z krajowej naukowej licencji oprogramowania firmy MSC Software, której operatorem jest Centrum Informatyczne TASK, w ramach grantu obliczeniowego uzyskanego przez Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny im Kazimierza Pułaskiego w Radomiu.

BIBLIOGRAFIA

1. Król R., *Analysis of a moving heat source using open source Getfem++ software*. The 2nd International Science Conference “Computer Simulation of Constructions and Structures: tasks and methods” (Zolotov Public Readings), MGSU, Moscow, 4 April 2013.
2. MSC Marc Documentation, *Marc 2012 Volume A: Theory and user information*, pp. 262
3. Биргер И. А., *Остаточные Напряжения*, Машгиз, Москва, 1963.
4. Bhadeshia H. K. D. H. *Residual Stress: Material factors*. Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel, eds G. Totten, M. Howes, T. Inoue, ASM International, Materials Park, Ohio, 2002, pp. 3-10

5. Винокуров В. А., Николаев Г.А., Стеклов О. И., *Сварка в машиностроении: Справочник* под ред. В. А. Винокурова, Машиностроение, Москва, 1979.
6. Трощенко В. Т., Сосновский Л. А., *Сопротивление усталости металлов и сплавов. Справочник*, Киев, 1987.
7. Greenwood G. W., Johnson R. H., *The deformation of metals under small stresses during phase transformations*. Proceedings of the Royal Society, Vol. 238, 1965, pp. 403-422
8. Thum A., Bautz W., *Ursachen der Steigerung der Dauerhaltbarkeit Forschung Gebiete Ing. Wes.* 1935, N 6, pp. 121

NUMERICAL ANALYSIS OF THE WELDING PROCESS AND ITS INFLUENCE ON THE FATIGUE LIFE OF WELDED JOINT

Abstract

This article presents the results of numerical analysis of arc welding process. The analysis prepared in MSC Marc software is based on the finite element method. The corner joint model, which consists of two plates has been welded at two different speeds with the constant power of the heat source. The residual stresses are higher when the joint is welded at the lower welding speed, but the width of the heat affected zone is equal for both welding speeds.

It was shown that residual stresses after arc welding process can significantly decrease fatigue life of welded construction. For the fatigue life value of 500 000 cycles, the corner joint without residual stresses can resist four times greater load than the joint with the residual stresses after arc welding process.

Autorzy:

mgr inż. **Roman Król** – Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny im. Kazimierza Pułaskiego w Radomiu