

SOŁTYSIAK Robert<sup>1</sup>

### **CYKLICZNE WŁASNOŚCI MATERIAŁOWE W WYZNACZANIU LOKALNYCH ODKSZTAŁCEŃ POŁĄCZEŃ SPAJANYCH**

*Metoda FSW (zgrzewanie z wymieszaniem materiału zgrzeiny, ang. Friction Stir Welding) jest stosunkowo nową metodą, wywodzącą się z konwencjonalnej metody zgrzewania, która ze względu na ekonomiczność samego procesu, cieszy się coraz większym zainteresowaniem w różnych dziedzinach przemysłu. Jednak na dzień dzisiejszy brakuje jednoznacznie określonych procedur obliczeń zmęczeniowych tego typu połączeń. Możliwość wyznaczenia rozkładu odkształceń/naprężeń w miejscach ich koncentracji jest nieodłącznym etapem poprawności obliczenia trwałości zmęczeniowej w ujęciu lokalnym.*

*Każde połączenie spajane charakteryzuje się różnego rodzaju niejednorodnościami. Jedną z nich jest lokalne zróżnicowanie własności materiałowych w miejscu połączenia. W niniejszej pracy przedstawiono możliwość zastosowania lokalnych własności materiałowych wyznaczonych dla poszczególnych stref niejednorodności strukturalnej połączenia wykonanego ze stopu aluminium 2024-T3 metodą FSW w analizie numerycznej odkształceń/naprężeń. Obliczenia przeprowadzono z zastosowaniem metody elementów skończonych w programie ABAQUS. Wyniki badań przedstawiono w postaci map odkształceń i naprężeń.*

### **THE STRAIN ANALYSIS OF WELDED JOINTS WITH USING THE LOCAL MATERIAL PROPERTIES**

*Friction stir welding (FSW) is a relatively new joining method derived from conventional friction welding. This method of joining materials, with regard to environmentally friendly and economical process, is finding a wider interest in the various industry fields. However, actually there is a lack of formalized fatigue life assessment methods for this kind of joints, therefore the possibility of marking the stain and stress in the concentration place are the object of ongoing research.*

*In this paper, the local material properties from the individual zones of a friction stir-welded sample of 2024-T3 aluminum alloy were taken into account in the strain and stress analysis. This analysis was carried out using the finite element method with ABAQUS program. The results in the form of strain and stress maps were presented.*

---

<sup>1</sup> Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Instytut Mechaniki i Konstrukcji Maszyn,  
Zakład Podstaw Konstrukcji Maszyn; 85-789 Bydgoszcz; al. Prof. S. Kaliskiego 7.  
tel: : + 48 340-82-78, 340-82-12, fax: + 48 340-82-71, e-mail: Robert.Soltysiak@utp.edu.pl

## 1. WSTĘP

Postęp w zakresie inżynierii materiałowej oraz inżynierii spajania prowadzi do powstawania nowych materiałów oraz technik ich łączenia [1,3,9]. Coraz to nowsze technologie łączenia materiałów stosowane w praktyce inżynierskiej powodują, że trwałość zmęczeniowa połączeń spajanych zbliżona jest do trwałości zmęczeniowej materiału rodzimego. Na powstałą różnicę składają się między innymi różnego rodzaju niejednorodności materiałowe związane z karami geometrycznymi oraz strukturalnymi (wywołane między innymi procesami temperaturowymi podczas spawania), które często prowadzą do lokalnego zróżnicowania odkształceń, a tym samym do pęknięć zmęczeniowych.

W praktyce inżynierskiej stosuje się różne metody projektowe mające za zadanie przeciwdziałać zmęczeniowemu pękaniu. Ogólnie można je podzielić na trzy podstawowe grupy: metody o podejściu globalnym, podejściu lokalnym oraz metody mechaniki pękania. Biorąc pod uwagę fakt, że inicjacja pęknięcia zmęczeniowego następuje w miejscu spiętrzenia odkształceń, na szczególną uwagę zasługują metody obliczeniowe w których uwzględnia się wartości lokalnych odkształceń. Takimi metodami są właśnie metody o podejściu lokalnym. Priorytetową sprawą staje się więc poznanie charakteru rozkładu odkształceń, szczególnie w złączach wykonanych nowymi technikami spajania.

Dotychczasowe metody projektowania [2,7] oparte na podejściu lokalnym, stosowane głównie do obliczeń połączeń wykonanych tradycyjnymi technikami spajania, nie uwzględniają zróżnicowania lokalnych własności materiałowych w poszczególnych strefach złączy spajanych. Opierają się one na własnościach materiału rodzimego lub własnościach konkretnych połączeń. Modyfikacja istniejących procedur projektowania polegająca na uwzględnieniu lokalnych cyklicznych własności materiałowych w analizie odkształceń/naprężeń może doprowadzić do utworzenia odpowiedniego narzędzia do szacowania trwałości zmęczeniowej, szczególnie jeżeli chodzi o połączenia wykonane nowymi technikami spajania, dla których na dzień dzisiejszy brakuje jednoznacznie określonych metod obliczeniowych.

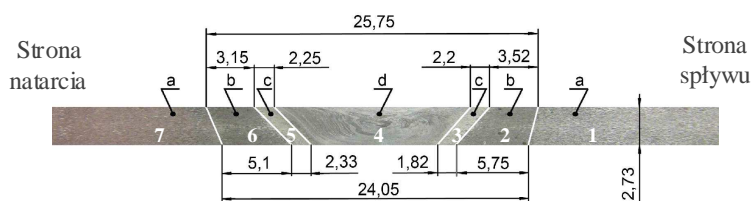
Jedną z takich metod spajania jest metoda zgrzewania z przemieszaniem materiału zgrzeiny - FSW (ang. Friction Stir Welding), wynaleziona i opatentowana w 1991 roku przez Instytut Spawalnictwa w Cambridge [9]. Metoda ta początkowo miała zastosowanie do łączenia stopów aluminium, jednak szybki jej rozwój oraz bardzo duże nią zainteresowanie (o czym świadczy między innymi cyklicznie odbywające się międzynarodowe sympozjum na temat metody FSW ang. International Symposium on Friction Stir Welding) przyczyniły się do zaadaptowania jej do łączenia obiektów z miedzi, stopów miedzi, stopów magnezu, tytanu, niklu, mosiądzu, tworzyw termoplastycznych, stali niskowęglowych oraz stopowych [5,6,10].

Niniejsza publikacja przedstawia analizę porównawczą odkształceń wyznaczonych metodą elementów skończonych z uwzględnieniem lokalnych własności materiałowych z poszczególnych stref [8] oraz z zastosowaniem własności normatywnych wyznaczonych zgodnie z polską normą [11].

## 2. OBIEKT BADAŃ

### 2.1 Charakterystyka obiektu badań

Połączenie wykonano ze stopu aluminium 2024T3 za pomocą metody FSW. W celu opracowania modelu numerycznego wykonano zdjęcie makrostruktury (rys. 1), na podstawie którego wyszczególniono strefy charakteryzujące się odmiennymi własnościami materiałowymi oraz określono poszczególne wymiary.



Rys. 1. Zdjęcie makrostruktury próbki wykonanej metodą FSW z aluminium 2024T3 z wymiarami oraz z wyszczególnionymi strefami niejednorodności: a) materiał rodzimy (MR), b) strefa wpływu ciepła (SWC) - bez odkształceń plastycznych, poddana wpływie ciepła, c) strefa uplastycznień termo-mechanicznych (SUTM) – poddana odkształceniom plastycznym poprzez narzędzie i znacznym wpływem ciepła, d) strefa jądra zgrzeiny (JZ) – strefa rekrytalizacji.

### 2.2 Model materiałowy

W analizie numerycznej zastosowano osiem odrębnych modeli materiałowych opisanych za pomocą wykresów cyklicznego odkształcenia. Użyto cykliczne, normatywne własności materiałowe (MR\_N) oraz cykliczne, lokalne własności wyznaczone metodą stopniowego wzrostu [4] przy użyciu tensometrów oporowych (MR\_L, SWC\_L, SUTM\_L, JZ\_L) – tab. 1 [8]. Własności materiałowe opisano tzw. zdwojonym wykresem cyklicznego odkształcenia w postaci:

$$\Delta \varepsilon = \Delta \varepsilon_s + \Delta \varepsilon_{pl} = \frac{\Delta \sigma}{E} + 2 \left( \frac{\Delta \sigma}{2K'} \right)^{\frac{1}{n}}$$

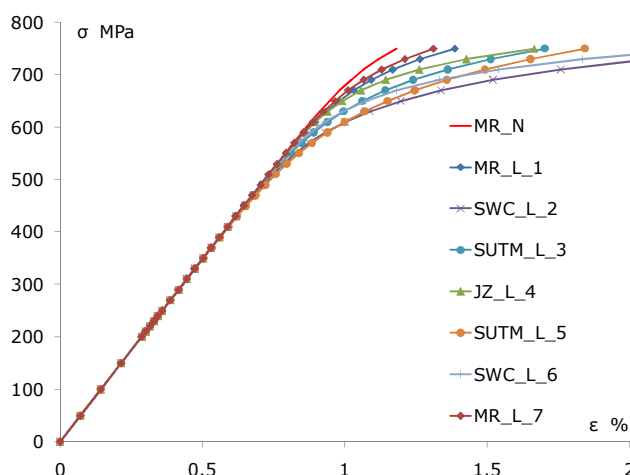
gdzie:

- $\Delta \varepsilon$  - zakres odkształcenia całkowitego,
- $\Delta \varepsilon_s$  - zakres odkształcenia sprężystego,
- $\Delta \varepsilon_{pl}$  - zakres odkształcenia plastycznego,
- $\Delta \sigma$  - zakres naprężenia,
- $n$  - wykładnik cyklicznego umocnienia,
- $K'$  - cykliczny współczynnik wytrzymałości,
- $E$  - moduł Younga.

Graficznie własności materiałowe przedstawiono na rysunku 2.

Tab. 1. Cykliczne własności materiałowe złącza zgrzewanego metodą FSW wykonanego ze stopu aluminium 2024-T3[8]

Strefa złącza	n	K	E
	-	MPa	MPa
MR_N	0,069	629,600	69 676
MR_L_1	0,076	613,386	
SWC_L_2	0,086	573,610	
SUTM_L_3	0,091	632,861	
JZ_L_4	0,062	538,172	
SUTM_L_5	0,113	704,294	
SWC_L_6	0,068	530,558	
MR_L_7	0,073	613,884	



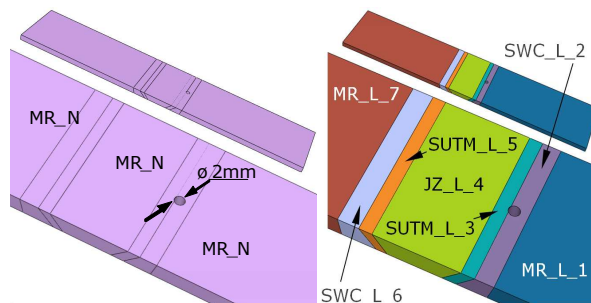
Rys. 2. Wykresy cyklicznych własności materiałowych

### 2.3 Model bryłowy

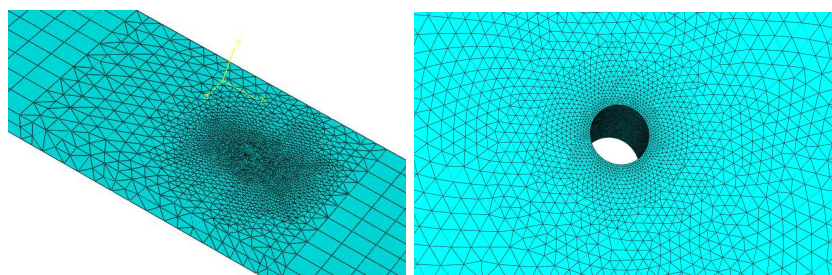
W modelu bryłowym pominięto karby geometryczne w postaci lica i grani zgrzeiny natomiast wprowadzono karb w postaci otworu  $\varnothing 2\text{mm}$  mający na celu imitować nieciągłości geometryczne występujące w konstrukcjach. Karb usytuowano w strefie wpływu ciepła (SWC\_L\_2).

Tak jak już wcześniej wspomniano, normatywnymi własnościami materiałowymi „N” (tzn. własnościami wyznaczonymi zgodnie z normą [11], MR\_N) opisano jeden model bryłowy (rys. 3a), natomiast drugi (rys. 3b) lokalnymi własnościami materiałowymi wyznaczonymi metodą tensometrii oporowej (MR\_L\_1, SWC\_L\_2, SUTM\_L\_3, JZ\_L\_4, SUTM\_L\_5, SWC\_L\_6, MR\_L\_7) [8].

W tym celu model bryłowy podzielono na kilka „partycji”. Podstawowe „partycje” umożliwiły utworzenie brył, które odpowiadały wyidealizowanym wymiarom poszczególnych stref, natomiast dodatkowe „partycje” umożliwiły podział na elementy skończone (rys. 4) z zastosowaniem elementów typu „tet” oraz „hex-dominated”.



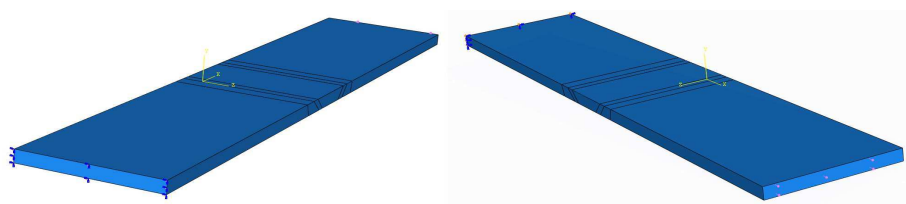
Rys. 3. Modele bryłowe opisane: a) własnościami normalnymi –  $MR_N$  oraz b) lokalnymi własnościami materiałowymi –  $MR_L_1$ ,  $SWC_L_2$ ,  $SUTM_L_3$ ,  $JZ_L_4$ ,  $SUTM_L_5$ ,  $SWC_L_6$ ,  $MR_L_7$



Rys. 4. Model bryłowy z siatką MES

#### 2.4 Warunki brzegowe

Warunki brzegowe przedstawiono na rys. 5. Z jednej strony odebrano możliwość przemieszczeń, natomiast z drugiej wprowadzono obciążenia zewnętrzne zgodnie z wartościami przedstawionymi w tab. 2



Rys. 5. Warunki brzegowe przyjęte w obliczeniach numerycznych

Tab. 2. Wartości obciążeń

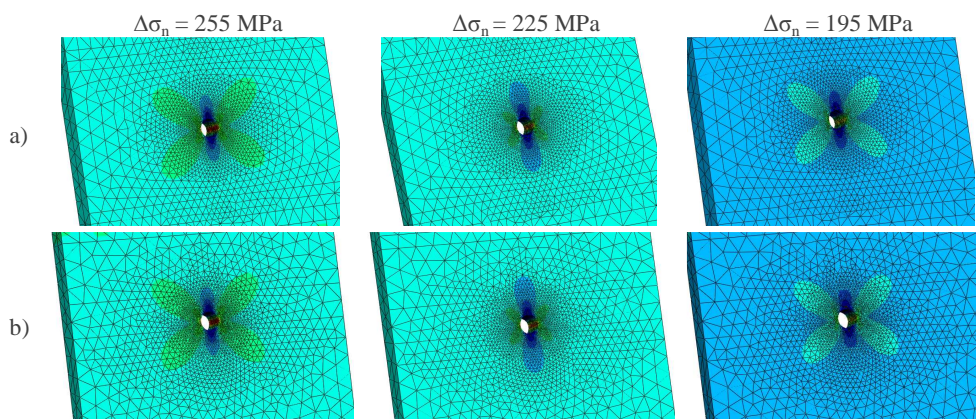
Nr	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
$\Delta\sigma$ MPa	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180	195	210	225	240	255

### 3. WYNIKI BADAŃ NUMERYCZNYCH

Amplitudy odkształceń wyznaczono w obszarze karbu dla wszystkich 17 zakresów naprężeń. W tabelicy 3 zestawiono składowe wartości amplitud odkształceń wyznaczone w kierunku działania obciążenia, gdyż właśnie te mają decydujący wpływ na trwałość zmęczeniową rozważanego obiektu. Wyniki z modelu opisanego własnościami wyznaczonymi zgodnie z polską normą oznaczono  $\Delta\epsilon_{Nx}$ , natomiast własnościami lokalnymi  $\Delta\epsilon_{Lx}$ . Przykładowe mapy rozkładów odkształceń zamieszczono na rys. 6.

Tab. 3. Wyniki amplitud odkształceń

Nr	$\Delta\sigma_{ni}$ MPa	$\Delta\epsilon_{Nx}$	$\Delta\epsilon_{Lx}$
1	15	0,00025434	0,00025456
2	30	0,00050869	0,00050931
3	45	0,00076285	0,00076387
4	60	0,00101719	0,00101843
5	75	0,00127153	0,00127299
6	90	0,00152588	0,00152774
7	105	0,00178022	0,00178230
8	120	0,00203456	0,00203686
9	135	0,00228872	0,00229161
10	150	0,00254307	0,00254617
11	165	0,00279741	0,00280192
12	180	0,00305175	0,00305863
13	195	0,00330610	0,00331769
14	210	0,00356026	0,00358088
15	225	0,00381603	0,00385011
16	240	0,00407239	0,00412768
17	255	0,00433118	0,00441539



Rys. 6. Przykładowe mapy odkształceń dla modelu: a) z własnościami wyznaczonymi zgodnie z polską normą oraz b) z własnościami lokalnymi

#### 4. WNIOSKI

Na wyznaczone wartości odkształceń lokalnych w analizach numerycznych duży wpływ ma zastosowanie odpowiedniego modelu materiałowego oraz odpowiednich własności materiałowych. Logicznym wydaje się stwierdzenie, że w przypadku wyznaczania odkształceń w miejscu występowania karbu geometrycznego powinno się uwzględniać własności materiałowe dla obszaru, w którym owy karb występuje.

W połączeniach spajanych karby geometryczne, które powstają podczas procesu łączenia, bardzo często występują nie w miejscu materiału rodzimego a np. w strefie wpływu ciepła. Jednak procedury obliczeniowe trwałości zmęczeniowej dna karbu w ujęciu odkształceniowym (ang. notch strain approach) nie uwzględniają własności materiałowych w miejscu występowania karbu geometrycznego lecz własności materiału rodzimego, co może powodować błędy w trakcie obliczania trwałości zmęczeniowej.

Przeprowadzone obliczenia odkształceń wskazują jednak, że im większe obciążenia, tym różnica otrzymanych wartości odkształceń dla przyjętych modeli materiałowych zwiększa się. Przy największym przyjętym zakresie obciążenia różnica wartości otrzymanych odkształceń wynosi prawie 2 %.

W zakresie obciążeń przy zastosowanych modelach materiałowych, gdzie początek wykresu jest praktycznie liniowy różnice w wartościach odkształceń pomiędzy zastosowanymi modelami materiałowymi będą nieznaczne, a w przypadku zastosowania w jednym i drugim przypadku modelu liniowego opierającego się na prawie Hooke'a otrzymane numerycznie wartości odkształceń będą takie same (pod warunkiem że poszczególne strefy połączenia charakteryzują się tym samym modułem Younga).

Więc uproszczenie polegające na uwzględnieniu własności materiału rodzimego w metodach obliczeniowych bazujących na kryterium naprężeniowym nie budzi zastrzeżeń pod warunkiem, że moduł Younga dla materiału rodzimego jest porównywalny z modułem Younga lokalnych stref połączenia. Natomiast zastosowanie takiego uproszczenia w metodach obliczeniowych trwałości zmęczeniowej bazujących na kryterium odkształceniowym (trwałość niskocyklowa) może prowadzić do znaczących różnic pomiędzy obliczeniową trwałością a trwałością eksperymentalną. Zagadnienie to planuje się przeanalizować w najbliższym badaniach.

#### 5. BIBLIOGRAFIA

- [1] Boehm L.: *New Engineering Processes in Aircraft Construction: Application of Laser-Beam and Friction Stir Welding*. Glass Physics and Chemistry, Vol. 31, No. 1, 2005, 27–29
- [2] Hobbacher A.: *Fatigue design of welds joints and components*. Recommendations of IIW Joint Working Group XIII-XV, XII-1539-96/XV-845-96
- [3] Hobbacher A.: *Kierunki rozwoju techniki spawania i łączenia w wykonawstwie wyrobów niezawodnych i ekonomicznych*. Biuletyn Instytutu Spawalnictwa, Nr 2/2004, 22-33
- [4] Jones A., Hudd R. C.: *Cyclic stress-strain curves generated from random cyclic strain amplitude tests*. International Journal of Fatigue 21 (1999) 521–530
- [5] Meran C.: *The joint properties of brass plates by friction stir welding*. Materials and Design 27 (2006) 719–726

- 
- [6] Pietras A., Adamiec J.: *Zgrzewanie aluminium z miedzią metodą FSW*. Biuletyn Instytutu Spawalnictwa. Nr 5/2005, 133-137
- [7] Radaj D., Sonsino C. M., Fricke W.: *Fatigue assessment of welded joints by local approaches*. Cambridge: Abington Publishing Limited; 2006
- [8] Sołtysiak R.: Wyznaczenie cyklicznych własności materiałowych w poszczególnych strefach złącza wykonanego metodą FSW, *Logistyka* 6/2010
- [9] Thomas W. M.: *Friction stir butt welding*. GB patent 9125978, 6.12.1991. International patent application PCT/GB92/02203
- [10] Thomas W., M., Woollin P. L., Johnson K. I.: *Friction Stir Welding of Steel. Welding: a novel technique for steel*. Steel World, vol. 4, nr 2
- [11] PN-84 H-04334 *Badania niskocyklowego zmęczenia metali*