

## EKSPERYMENTALNA ANALIZA TRWAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ KRZYŻOWYCH ZŁĄCZY SPAWANYCH W ODNIESIENIU DO WIELKOŚCI ELEMENTU

Lukasz BLACHA\*, Aleksander KAROLCZUK\*, Robert BAŃSKI\*\*, Przemysław STASIUK\*\*\*

\*Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn, Wydział Mechaniczny,  
Politechnika Opolska, ul. Mikołajczyka 5, 45-271 Opole,

\*\*Katedra Materiałoznawstwa i Technologii Bezwiórowych, Wydział Mechaniczny,  
Politechnika Opolska, ul. Mikołajczyka 5, 45-271 Opole

\*\*\*Firma KAES, ul. Bukowa 4, 46-040 Ozimek

[l.blacha@doktorant.po.opole.pl](mailto:l.blacha@doktorant.po.opole.pl), [a.karolczuk@po.opole.pl](mailto:a.karolczuk@po.opole.pl), [r.banski@po.opole.pl](mailto:r.banski@po.opole.pl), [przemyslaw.stasiuk@wp.pl](mailto:przemyslaw.stasiuk@wp.pl)

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono wyniki eksperymentalnych badań zmęczeniowych krzyżowych złączy spawanych. Badane elementy obciążano jednoosiową siłą zmienną: rozciąganie-ściskanie o cyklu wahadłowym. Kształt i wymiary badanych próbek dobrano tak, aby możliwe było porównanie dwóch charakterystyk zmęczeniowych typu  $\sigma_{mn}-N_f$  w celu określenia efektu skali. Jedną z charakterystyk otrzymano na podstawie badań własnych. Drugą charakterystykę zmęczeniową, dotyczącą elementów spawanych o kilkukrotnie większych rozmiarach, otrzymano na podstawie wyników zamieszczonych w opublikowanych pracach innych autorów. Na podstawie analiz wyznaczono parametr symulujący efekt skali.

### 1. WPROWADZENIE

Wpływ wielkości elementu na trwałość zmęczeniową może być wyjaśniany większym prawdopodobieństwem wystąpienia krytycznej wady materiałowej, wpływającej na trwałość danego elementu, wraz ze zwiększaniem się objętości materiału i nazywany jest efektem skali (Kocańda i Szala, 1997). Szczególnie istotnym jest badanie efektu skali w złączach spawanych, charakteryzujących się znaczną niejednorodnością struktury. Wpływ wielkości złącza spawanego wyrażony długością spoiny widoczny jest w badaniach wielu autorów (Chiofalo i inni, 2007; Kihl i Sarkani, 1997; Park i Miki, 2007; Xiao i Yamada, 2004).

Do celów niniejszej pracy należy przedstawienie wyników badań przeprowadzonych dla elementów spawanych w postaci płyty stalowej z przyspawanymi dwoma poprzecznymi żebrami. Tak wykonane próbki poddano obciążeniom cyklicznym o charakterze wahadłowego rozciągania-ściskania. Przeprowadzone badania pozwoliły na otrzymanie charakterystyki zmęczeniowej i porównanie jej z dotychczas opublikowanymi wynikami badań zmęczeniowych przeprowadzonych dla złączy o zbliżonej geometrii, ale różniących się wymiarami. Porównanie umożliwiło zaobserwowanie wpływu efektu skali na trwałość zmęczeniową w przypadku elementów spawanych z żebrami poprzecznymi.

### 2. PRÓBKI WYKORZYSTANE DO BADAŃ

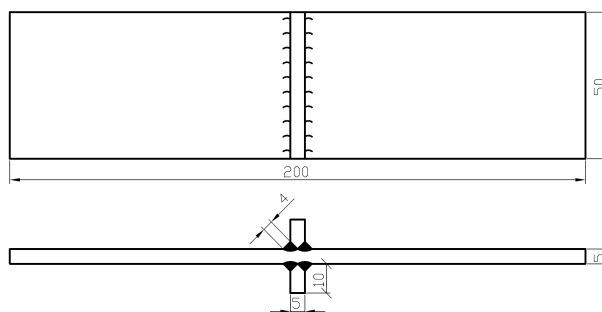
#### 2.1. Wykonanie próbek

Badane próbki wykonane zostały ze stali S355J2 w stanie normalizowanym o składzie chemicznym przedstawionym w tabeli 1 przez wstępne cięcie plazmowe płyty

(wzdłuż kierunku walcowania) o grubości 5 mm na długość 1300 mm i szerokość 60 mm a następnie cięte na wymaganą długość. Kształt i wymiary próbki przedstawiono na Rys. 1. Spawanie wykonano metodą MAG w osłonie mieszanki Ar (92%) i CO<sub>2</sub> (8%), przez jedną osobę, w jednym procesie. Po spawaniu powierzchnie boczne poddano frezowaniu na wymiar 50 mm. Złącze spawane charakteryzowało się pełnym przetopem żeber. Do badań wykorzystano próbki bez obróbki ujednorodniającej. Kształt próbki oraz materiał rodzimy dobrano identycznie jak próbki zastosowane w badaniach Sonsino (Sonsino i inni, 1999).

Tab. 1. Skład chemiczny stali S355J2 (EN 10025-2: 2004)

Pierwiastek chem.:	C	Si	Mn	P	S	Cu
Maks. zawartość, %:	0,22	0,55	1,60	0,03	0,03	0,55

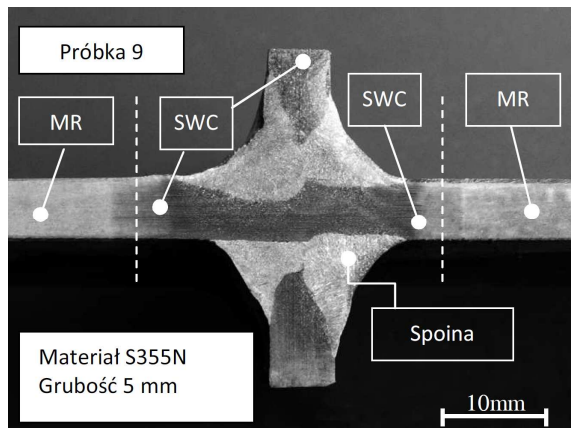


Rys. 1. Kształt i wymiary badanych próbek

#### 2.2. Badania strukturalne

Dla wybranej próbki przeprowadzono metalograficzne badania makro- oraz mikroskopowe, a także określono

rozkład umocnienia złącza przy pomocy pomiarów mikro-twardości w strefie wpływu ciepła (SWC), w złączu oraz materiale rodzimym (MR).



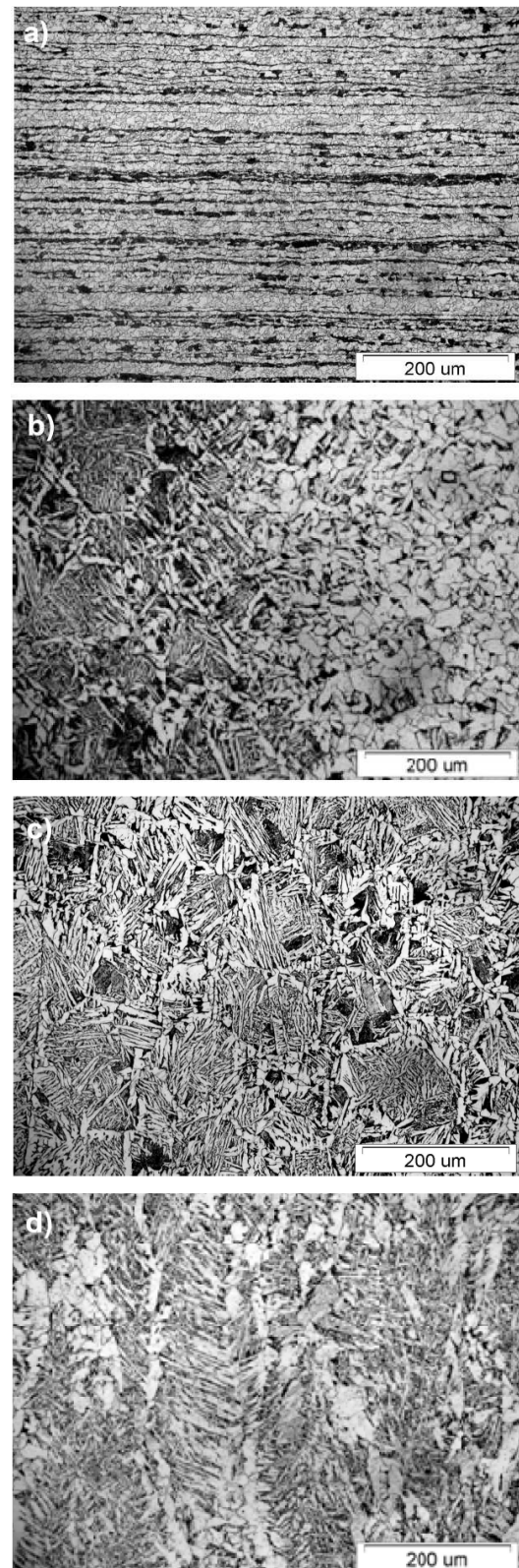
Rys. 2. Makrostruktura materiałowa w otoczeniu spoiny, gdzie: MR – materiał rodzimy, SWC – strefa wpływu ciepła

Na Rys. 2 przedstawiono makrostrukturę złącza, uwi-  
doczną po trawieniu odczynnikami Adlera. Na rysunku  
zaznaczono zakres występowania strefy wpływu ciepła  
i materiału o niezmienionej strukturze, a tym samym i w-  
łaściwościach. W złączu nie ujawniono wad w skali makro,  
a w grani uzyskano pełny przetop. Ze względu na niewielką  
grubość spawanego materiału strefa wpływu ciepła obser-  
wowana jest na całym przekroju spawanej blachy.

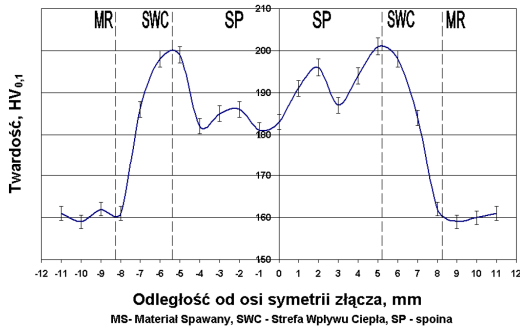
Ocenę wewnętrznej budowy złącza na podstawie badań  
makroskopowych przeprowadzono zgodnie z normą PN-  
EN 1321. Badania mikrostrukturalne złącza prowadzono  
na mikroskopie optycznym Olympus IX70. Obserwacje  
obejmowały zarówno strefę wpływu ciepła jak i materiał  
rodzimy oraz spoinę, co przedstawiono na Rys. 3. Spawany  
materiał to stal niskowęglowa o strukturze ferrytyczno-  
perlitycznej z charakterystycznym pasmowym ułożeniem  
dla obróbki plastycznej na zimno (Rys. 3a). Dla złącza  
wykonanego z takiego materiału w strefie wpływu ciepła  
wystąpiły typowe obszary tj. strefa rekrytalizacji ( $500^{\circ}\text{C}$ -  
 $\text{Ac}_1$ ), strefa normalizowania ( $\text{Ac}_1$ - $\text{Ac}_3$ ), strefa przegrzania  
(powyżej  $1100^{\circ}\text{C}$ ) oraz strefa wtopienia. W obszarze  
przegrzania nastąpił znaczny rozrost ziarna. Obszar ten  
posiada budowę w układzie Widmannstättena z iglastymi  
wydzieleniami ferrytu (Rys. 3c). Spoina ze względu  
na ułożenie w jednym przejściu posiada budowę grubokry-  
staliczną – dendrytyczną (Rys. 3d). Przejście ze strefy nor-  
malizowania do strefy przegrzania oraz proporcje zmiany  
wielkości ziarna przedstawiono na Rys. 3b.

Pomiary umocnienia złącza wykonano przy zastosowa-  
niu metody Vickersa na mikrotwardościomierzu Leco AHT  
2100 przy obciążeniu 100g. Badania mikrotwardości prze-  
prowadzono zgodnie z normą PN-EN ISO 6507-1. Zbadany  
rozkład umocnienia złącza pokrywa się z obserwacjami  
struktury. Największy wzrost twardości występuje w obsza-  
rze przegrzanym, a jej wartość wynosi ponad  $200\text{HV}_{0,1}$   
i jest znacznie większa niż materiału rodzimego, dla którego  
twardość wynosi  $160\text{HV}_{0,1}$ . Twardość spoiny jest nie-  
jednorodna a jej wartość waha się w granicach  
od  $181\text{HV}_{0,1}$  do  $196\text{HV}_{0,1}$  co jest charakterystyczne  
dla materiałów lanych nie poddanych obróbce cieplnej

i również potwierdzone obserwacjami mikrostruktury.  
Strefa rekrytalizacji nie wykazała znacznego spadku  
umocnienia materiału rodzimego spowodowanego obróbką  
plastyczną na zimno i jej twardość była zbliżona do warto-  
ści dla materiału rodzimego.



Rys. 3. Mikrostruktura złącza, mikroskop optyczny pow. 200x,  
a) materiał rodzimy w układzie pasmowym ferrytu  
i perlitu, b) SWC – obszar normalizowania i przegrzania,  
c) strefa przegrzania ze strukturą Widmannstättena,  
d) spoina o strukturze dendrytycznej



**Rys. 4.** Rozkład mikrotwardości (umocnienia) złącza na przekroju poprzecznym złącza. Metoda Vickersa, obciążenie węgelnika 100g

### 2.3. Promień zaokrąglenia w linii wtopienia

Obecność spoiny w danej konstrukcji jest źródłem koncentracji naprężeń wynikającej między innymi z jej złożonego kształtu, w szczególności promienia zaokrąglenia  $\rho$  w linii wtopienia oraz kąta przejścia  $\alpha$ . Ze względu na technikę spawania, wartości promienia  $\rho$  cechują się pewnym rozrzutem statystycznym. W niniejszej pracy promień  $\rho$  oraz kąt  $\alpha$  zawarty między linią styczną do lica spoiny a linią styczną do powierzchni blachy wyznaczono przy zastosowaniu metod analizy obrazu cyfrowego. Skrócony tok postępowania dla oszacowania parametrów  $\rho$  i  $\alpha$  był następujący:

1. wykonanie odlewu lica spoiny przy zastosowaniu kleju silikonowego;
2. pocięcie odlewu w płaszczyznach prostopadłych do linii wtopienia (podziałka cięcia  $\sim 1$ mm);
3. skanowanie uzyskanych fragmentów w odcieniach szarości (0-255), z rozdzielczością 4800 dpi co daje maksymalną dokładność: 0,0053 mm/piksel;
4. filtracja obrazu w celu uzyskania krawędzi spoiny (Rys. 5);
5. identyfikacja linii stycznych do lica spoiny i blachy na podstawie regresji liniowej skrajnych 400 punktów obrazu (Rys. 5);
6. poszukiwanie okręgu stycznego do uzyskanych linii metodą najmniejszych kwadratów na podstawie estymatora  $E_r$ :

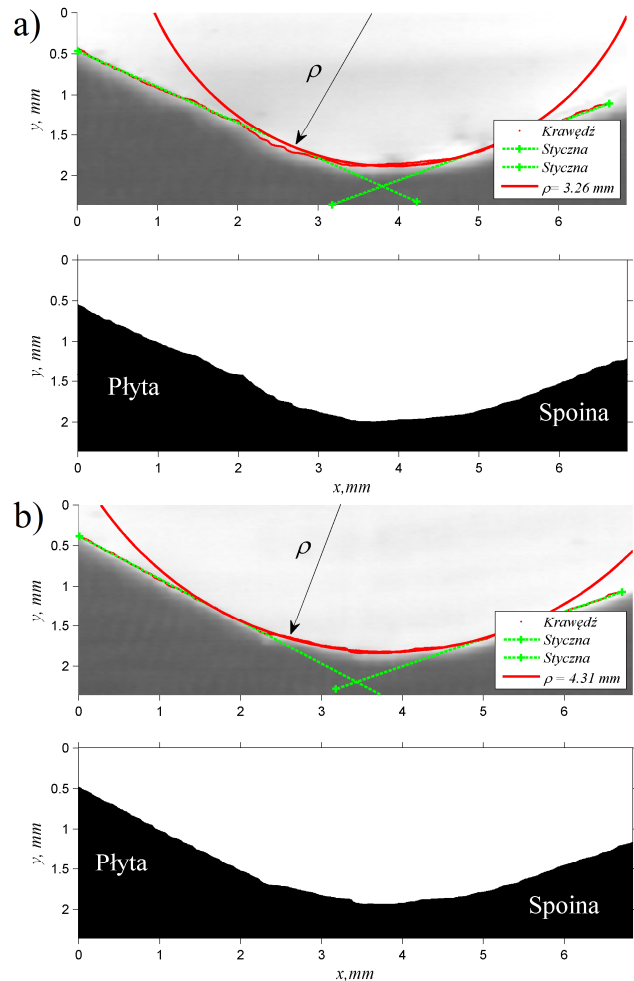
$$E_r = \sum_{i=1}^n (y_i^r - y_i^e)^2, \quad (1)$$

gdzie:  $y_i^r$  – zmierzona współrzędna  $y$  dla  $i$ -tego punktu,  $y_i^e$  – estymowana współrzędna  $y$  okręgu dla  $i$ -tego punktu,  $n$  – liczba punktów;

7. obliczenie promienia  $\rho$  oraz kąta  $\alpha$  zawartego między liniami stycznymi;
8. wyznaczenie estymatora jakości  $P$  średniego dopasowania według zależności;

$$P = \sqrt{\frac{E_r}{n}}, \quad (2)$$

9. obliczenie wartości średniej dla parametrów  $R$ ,  $\alpha$ ,  $P$  wraz z rozrzutem liczonym, jako jednokrotność odchylenia standardowego.



**Rys. 5.** Przykładowe zidentyfikowane zarysy krawędzi wokół linii wtopienia: a)  $\rho=3,26$  mm, b)  $\rho=4,31$  mm

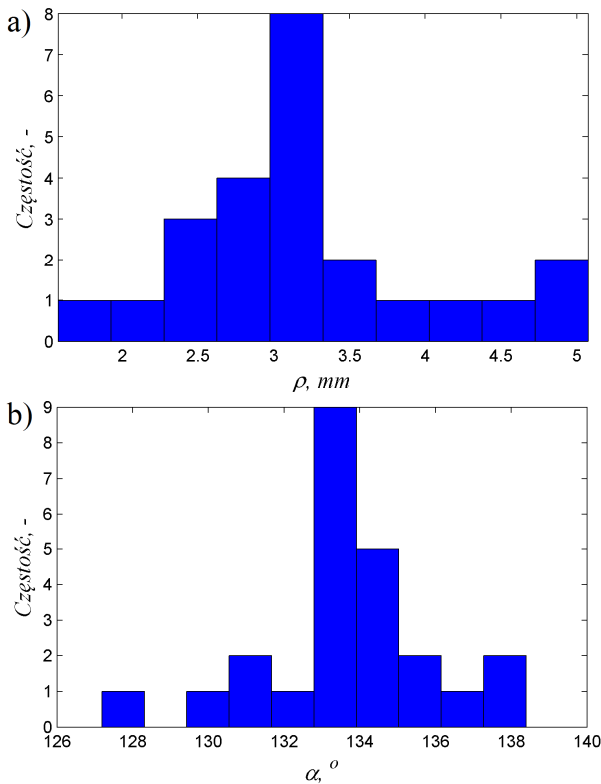
**Tab. 2.** Wyniki pomiarów kształtu linii wtopienia spoin, gdzie:  $\rho_{min}$  – minimalna wartość promienia  $\rho$

$\bar{\rho}$ , mm	$\rho_{min}$ , mm	$\bar{\alpha}$ , °	$\bar{P}$ , mm	Liczba pomiarów
$3,2 \pm 0,82$	1,6	$133,5 \pm 2,3$	$0,026 \pm 0,015$	24

Wyniki pomiarów zamieszczono w Tab. 2. Przykładowe obrazy cyfrowe wraz z ustalonymi krawędziami zarysu linii wtopienia przedstawiono na Rys. 5.

W celu oszacowania błędu pomiaru z otrzymanych odlewów wycięto trzy prostopadłościennne płytki. Wymiary płytek zmierzono suwmiarką z dokładnością 0,02 mm. Następnie, przeprowadzono podobną analizę jak dla odlewów linii wtopienia spoiny. Na podstawie porównania otrzymanych wyników ustalono, że błąd bezwzględny pomiarów metodą analizy obrazu liczony jako pierwiastek z wartości średniokwadratowej odchyżeń wynosi 0,10 mm.





Rys. 6. Histogramy: (a) promienia zaokrąglenia ρ, (b) kąta α

### 3. BADANIA EKSPERYMENTALNE

#### 3.1. Opis badań

Badania zostały przeprowadzone na próbkach wykonanych ze stali S355J2, znajdującej szerokie zastosowanie we wszelkich konstrukcjach spawanych pracujących w ośrodkach atmosferycznych. Geometria próbek została przedstawiona na Rys. 1. Tego typu elementy spawane z zębem wzmacniającym spotkać można w literaturze anglojęzycznej pod nazwą "transverse stiffener".

Opisywane badania przeprowadzono z wykorzystaniem zmęczeniowej maszyny wytrzymałościowej SHM 250 produkcji VEB Leipzig, pracującej pod kontrolą systemu mechatronicznego zaprojektowanego na Politechnice Opolskiej (Kasprzyczak i Macha, 2007). Do każdej z badanych próbek przyłożono cykliczne obciążenie osiowe o wartości amplitudy naprężeń nominalnych  $\sigma_{an}$  niezmiennej przez cały okres trwania testów zmęczeniowych. Przyłożone obciążenie charakteryzowało się współczynnikiem asymetrii cyklu  $R$  równym  $-1$  (wahadłowe rozciąganie-ściskanie) i realizowane było na kilku różnych poziomach  $\sigma_{an}$  w celu opracowania charakterystyki zmęczeniowej. Przebiegi te miały wartość  $\sigma_{an}$  równą 80, 100 oraz 150 MPa przy częstotliwości  $f$  równej 20 Hz, za wyjątkiem poziomu  $\sigma_{an} = 80$  MPa; w tym przypadku  $f = 25$  Hz.

#### 3.2. Wyniki badań

Inicjacja pęknięcia zmęczeniowego wystąpiła na brzegu spoiny w strefie wpływu ciepła (Rys. 7). Propagacja pęknięcia miała miejsce wzdłuż brzegu spoiny, aż do osiągnię-

cia długości krytycznej i uzyskania przełomu doraźnego (Rys. 7).

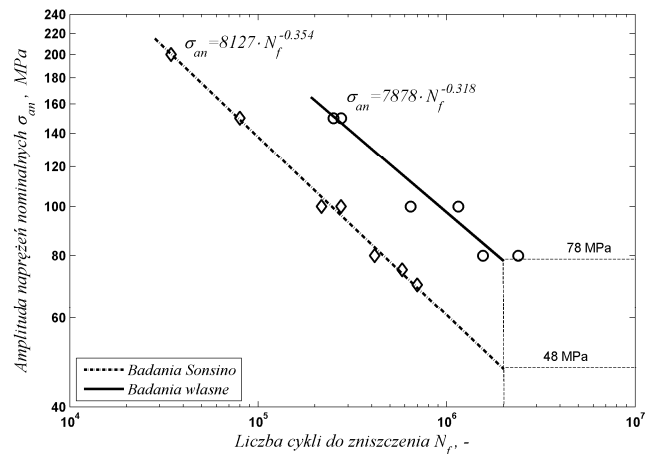
Lokalizacja pęknięcia jest uzasadniona ze względu na wysokie wartości rzeczywistego współczynnika koncentracji naprężeń (opisanego od strony teoretycznej między innymi przez Xiao i Yamadę, 2004), wyznaczonego między innymi przez Sonsino i innych (1999).



Rys. 7. Zdjęcia przełomu zmęczeniowego

Tab. 3. Wyniki badań zmęczeniowych

Nr próbki	$\sigma_{an}$ , MPa	$f$ , Hz	$N_f$ , cykli
1	80	25	2395820
2	80	25	1557420
3	100	20	1150270
4	100	20	644170
5	150	20	275410
6	150	20	250450



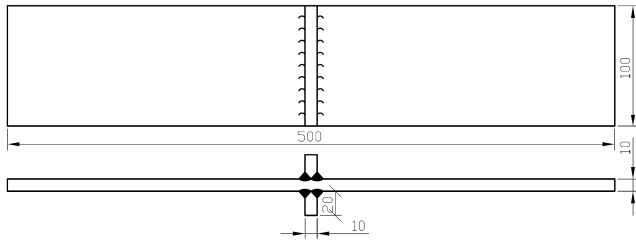
Rys. 8. Wyniki badań własnych oraz badań zespołu Sonsino (Sonsino i inni, 1999)

Eksperymentalne wartości liczby cykli do zniszczenia  $N_f$  przy danej wartości  $\sigma_{an}$  zamieszczone zostały w Tab. 3. Dane eksperymentalne (Tab. 3) zostały użyte do wyznaczenia parametrów charakterystyki zmęczeniowej typu:

$$\sigma_{an} = C \cdot N_f^b \tag{3}$$

gdzie:  $\sigma_{an}$  – amplituda naprężeń nominalnych,  $C$ ,  $b$  – parametry złącza. Otrzymaną charakterystykę zmęczeniową  $N_f - \sigma_{an}$  przedstawiono na Rys. 8. Otrzymana amplituda naprężenia  $\sigma_{an}$  dla  $2 \cdot 10^6$  cykli jest wartością obliczeniową

wyznaczoną w oparciu o równanie (3) i wynosi 78 MPa. Wyznaczone parametry  $C$  i  $b$  metodą najmniejszych kwadratów wynoszą odpowiednio:  $C = 7878$  MPa;  $b = -0,318$ .



Rys. 9. Kształt i wymiary próbek badanych przez zespół Sonsino (Sonsino i inni, 1999)

Wartości eksperymentalne będące wynikiem badań własnych zostały porównane do wyników badań Sonsino (Sonsino i inni, 1999), przeprowadzonych na próbkach różniących się wymiarami w stosunku do próbek z Rys. 1. Wymiary tych próbek przedstawiono na Rys. 9. Stałe równania (3) dla badań złączy o 4-krotnie większej objętości wynoszą odpowiednio:  $C = 8127$  MPa;  $b = -0,354$ . Amplituda naprężenia  $\sigma_{an}$  dla  $2 \cdot 10^6$  cykli wynosi 48 MPa (Rys. 8).

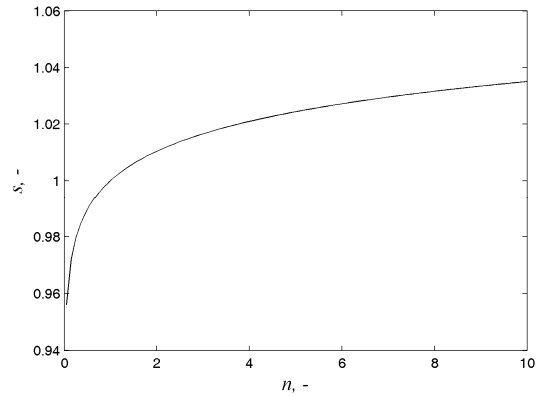
#### 4. WNIOSKI

Wyznaczone parametry  $b$  nachylenia charakterystyk zmęczeniowych (3) dla analizowanych wyników badań różniących się wielkością elementu są do siebie zbliżone. Pozwala to na wyznaczenie parametru wpływu efektu skali zaproponowanego w pracy (Karolczuk i Blacha, 2011):  $p = \log n / \log s$ , gdzie  $n=8$  (8-krotna większa objętość materiału złącza);  $s = \log(N(V)) / \log(N(n \cdot V))$  – iloraz logarytmów trwałości zmęczeniowej  $N$  dla tej samej amplitudy naprężenia  $\sigma_{an}$  ale elementów o różnej objętości. Postać zastosowanej charakterystyki zmęczeniowej (3) pozwala na wyznaczenie parametru  $s$  w postaci  $s = C(n \cdot V) / C(V)$ ; gdzie:  $C(n \cdot V)$  – parametr  $C$  równania (3) dla złącza o objętości  $n \cdot V$ ;  $C(V)$  – parametr  $C$  równania (3) dla złącza o objętości  $V$ . W analizowanym przypadku  $s = 1,0316$ , a parametr  $p = 66,82$  (Rys. 10). Wyznaczona wartość parametru  $p$  pozwoli na oszacowanie parametrów  $C_f$ ,  $m_f$  materiału zastępczego (Karolczuk i Blacha, 2011) – korzystając ze znanych charakterystyk zmęczeniowych uszeregowanych w tzw. klasach FAT. Po identyfikacji wszystkich parametrów rozkładu prawdopodobieństwa przetrwania  $P_s$  elementów spawanych możliwe jest będzie zastosowanie koncepcji najstabszego ogniwa do oceny trwałości  $N$  złączy spawanych dla dowolnego poziomu prawdopodobieństwa zniszczenia  $P_z$  według

$$P_z(N) = 1 - P_s(N) = 1 - e^{-\int_V \left( \frac{\log N}{\log C_f - m_f \log \Delta \sigma(x, y, z)} \right)^p dV} \quad (4)$$

gdzie:  $\Delta \sigma$  - zakres naprężenia,  $V$  - objętość.

Zastosowanie analizy obrazu do wyznaczania promienia zaokrąglenia  $\rho$  linii wtopienia oraz kąta przejścia  $\alpha$  jest efektywną metodą określania parametrów geometrycznych złącza.



Rys. 10. Symulacja efektu skali dla  $p = 66,82$

#### LITERATURA

1. **Chiofalo G., Crupi V., Guglielmino E., Scibilia L.** (2007), Critical analysis of current codes on fatigue design of welded joints, *2<sup>nd</sup> International Conference on Marine Research and Transportation 2007*, Ischia, Naples.
2. **Karolczuk A., Blacha Ł.**, (2011), Koncepcja najstabszego ogniwa w modelowaniu trwałości zmęczeniowej złączy spawanych, *VI Międzynarodowe Sympozjum Mechaniki Materiałów i Konstrukcji*, Augustów 2011.
3. **Kasprzyczak L., Macha E.** (2007) Cyfrowe układy sterowania maszyn wytrzymałościowych, *Problemy Maszyn Robotycznych*, z. 29, 53-62.
4. **Kihl D. P., Sarkani S.** (1997), Thickness effects on the fatigue strength of welded steel cruciforms, *International Journal of Fatigue*, Vol. 19, 311-316.
5. **Kocańda S., Szala J.** (1997), *Podstawy obliczeń zmęczeniowych*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
6. **Park W., Miki Ch.** (2007), Fatigue assessment of large-size welded joints based on the effective notch stress approach, *International Journal of Fatigue*, Vol. 30, 1556-1568.
7. **Sonsino C. M., Kaufmann H., Demofonti G., Rificuli S., Sedlacek G., Müller C., Hanus F., Wegmann H. G.** (1999), *High-Strength steels in welded state for light-weight constructions under high and variable stress peaks*, ESCC Steel Research Programme, CSM – Roma, LBF – Darmstadt, Published by the European Commission, Brussels.
8. **Xiao Z.-G., Yamada K.** (2004), A method of determining geometric stress for fatigue strength evaluation of steel welded joints, *International Journal of Fatigue*, No 26, 1277-1293.

#### EXPERIMENTAL STUDY OF FATIGUE LIFE OF CRUCIFORM WELDED JOINTS WITH REFERENCE TO SCALE EFFECT

**Abstract:** The paper presents results of fatigue tests carried on transverse stiffener welded joints submitted to fully reverse axial loading. Based on the derived results, S-N curve was obtained and compared to published results for specimens differing in dimensions. Purpose of this comparison is analyzing the volume effect in fatigue of welded joints.

Praca współfinansowana ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego



KAPITAŁ LUDZKI  
 NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



UNIA EUROPEJSKA  
 EUROPEJSKI FUNDUSZ SPOŁECZNY

