

NIELOKALNA METODA WYZNACZANIA GRANICZNEJ TRWAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ MATERIAŁU Z DEFECTAMI GEOMETRYCZNYMI

Aleksander KAROLCZUK*, Yves NADOT**, Andre DRAGON**

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

**Laboratoire de Mecanique et de Physique des Materiaux, UMR CNRS no. 6617, ENSMA, Teleport 2, BP 40 109, 86961 Futuroscope Cedex, France

karol@po.opole.pl, andre.dragon@lmpm.ensma.fr

Streszczenie: W pracy zaprezentowano nową metodę analizy wpływu nierównomiernych rozkładów naprężeń w płaszczyźnie krytycznej na trwałość zmęczeniową materiałów konstrukcyjnych. Metoda wyróżnia odmienny wpływ gradientów naprężeń stycznych i normalnych na procesy zmęczeniowe. Nielokalne naprężenia styczne i normalne w płaszczyźnie materiału o stałej orientacji (płaszczyzna krytyczna) są uśredniane do naprężeń lokalnych. Proces uśredniania jest przeprowadzany na dwóch różniących się wielkością powierzchniach, odpowiednio dla naprężeń stycznych i normalnych. Wyznaczone w ten sposób lokalne naprężenia w płaszczyźnie krytycznej są wprowadzane do kryterium wieloosiowego zmęczenia materiału w celu oszacowania granicy zmęczenia. Zaproponowana metoda została zweryfikowana na podstawie badań zmęczeniowych próbek wykonanych ze stali C36 ze sztucznie wprowadzonymi defektami geometrycznymi.

1. WPROWADZENIE

Wiele elementów maszyn i konstrukcji takich jak: części zawieszenia samochodów (Carboni et al., 2003; Nadot i Denier, 2004), połączenia spawane (Bullough et al., 2001), korbwoody (Baretta et al., 1997), stalowe druty (Baretta i Boniardi, 1999), fragmenty zawieszenia pociągów (Baretta, 2003) zawiera różnego rodzaju defekty (jamy skurczowe, wtrącenia, tlenki, itp.) o różnej wielkości i kształcie. Elementy takie często pracują w warunkach zmiennych naprężeń w czasie, a w wyniku działania defektu również zmiennych w objętości materiału. Problem oceny wpływu zmiennych naprężeń/odkształceń w czasie jak i w objętości materiału nie dotyczy tylko materiałów z defektami, ale również elementów z różnego rodzaju korbami jak i elementów zginanych, czy też skręcanych.

Na podstawie wyników badań eksperymentalnych wyodrębniono następujące efekty towarzyszące nierównomiernym rozkładom naprężeń, które mają wpływ na trwałość zmęczeniową:

(i) Przy takich samych maksymalnych wartościach naprężeń nominalnych trwałość zmęczeniowa próbek cylindrycznych poddanych wahadłowemu zginaniu jest wyższa od trwałości takich samych próbek przy wahadłowym rozciąganiu-ściskaniu (Papadopoulos i Panoskaltsis, 1996; Morel i Palin-Luc, 2002).

(ii) Występowanie nie rozwijających się pęknięć zmęczeniowych (nie prowadzących do zniszczenia elementu) przy obciążeniach na granicy zmęczenia w przypadku materiałów zawierających defekty (Murakami i Endo, 1994; Endo i Ishimoto, 2006).

(iii) Brak istotnego wpływu gradientu naprężeń stycznych na granicy zmęczenia w próbkach cylindrycznych poddanych wahadłowemu skręcaniu (Papadopoulos i Panoskaltsis, 1996).

Celem pracy jest przedstawienie i weryfikacja modelu redukcji nierównomiernych rozkładów naprężeń w materiale, do naprężeń lokalnych, uwzględniających wymienione powyżej efekty. Efekt (i) jest uwzględniony poprzez uśrednianie naprężeń w wybranym obszarze materiału, uzyskując w ten sposób wartość naprężenia mniejszą od wartości maksymalnej. Istotną kwestią jest określenie obszaru uśredniania: jego kształtu i wielkości. Parametry te są podyktowane efektami (ii) i (iii). Efekt (ii) tłumaczy się zbyt małymi wartościami naprężeń rozwierających pęknięcie (wartość progowa ΔK_{th}), działających w niewielkiej odległości od koncentratora naprężeń (gwałtowny spadek naprężeń). W związku z tym postuluje się, że uśredniona wartość naprężeń normalnych (rozwierających) w płaszczyźnie potencjalnego rozwoju pęknięcia o określonym polu, gwarantującej rozwój pęknięcia, musi przekroczyć wartość krytyczną. Efekt (iii) dotyczy tylko makroskopowych naprężeń stycznych, czyli wynikających np. ze skręcania próbek cylindrycznych. W skali obserwacji kilku ziaren, makroskopowy gradient naprężeń stycznych jest nieznaczny i nie ma wpływu na inicjację pęknięć a tym bardziej na rozwój pęknięcia w dalszym etapie. Natomiast, w przypadku znacznego gradientu naprężeń stycznych w skali mezoskopowej (wynikający np. z korbów, defektów o wielkości zbliżonej do wielkości kilku ziaren) należy uwzględnić jego wpływ na powstawanie pęknięć zmęczeniowych, ale wpływ ten należy rozpatrywać w stosunkowo małym obszarze w porównaniu do obszaru wpływu naprężeń normalnych.

W pracy przedstawiono zarys metody redukcji naprężeń stycznych i normalnych dla ujęcia wpływu spiętrzenia naprężeń na trwałość zmęczeniową bez względu na przyczynę ich powstania. Proponowana metoda została zweryfikowana na podstawie badań próbek cylindrycznych wykonanych ze stali C36 ze sztucznie wprowadzonymi defektami o różnym kształcie i wielkości.

2. BADANIA EKSPERYMENTALNE

Wyniki eksperymentu oraz jego dokładny opis można znaleźć w pracy Billaudeau et al. (2004). W niniejszym rozdziale przedstawiono tylko najważniejsze informacje dotyczące przeprowadzonych testów. Cylindryczne próbki wykonane ze stali niskowęglowej C36 (Tab.1) ze sztucznie wprowadzonymi defektami o trzech kształtach (Tab. 2, Rys. 1) poddano wahadłowemu rozciąganiu-ściskaniu, skręcaniu i kombinacji rozciągania-ściskania ze skręcaniem. Poziomy obciążenie tj. amplitudę naprężeń od rozciągania-ściskania, σ_a oraz amplitudę naprężeń od skręcania τ_a dobrano eksperymentalnie w celu uzyskania trwałości odpowiadającej granicy zmęczenia.

Tab. 1. Własności mechaniczne stali C36

Moduł Younga: E	212 GPa
Styczna granica plastyczności: $R_{e0.2}$	353 MPa
Granica wytrzymałości: R_m	582 MPa
Wydłużenie: A	31%
Cykliczna granica plastyczności: $R_{e0.02cy}$	278 MPa
Granica zmęczenia dla wahadłowego rozciągania-ściskania, $R=-1: \sigma_{af}$	236±12 MPa
Granica zmęczenia dla wahadłowego skręcania, $R=-1: \tau_{af}$	169±9 MPa
Współczynnik cyklicznego umocnienia: K'	1232 MPa
Wykładnik cyklicznego umocnienia: n'	0.214

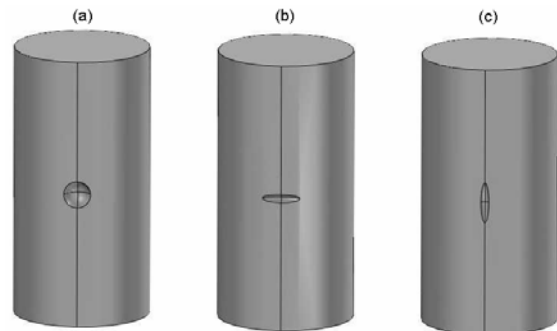
Tab. 2. Dane dotyczące typów wprowadzonych defektów oraz obciążenia

Lp.	Obciążenie	Typ defektu	Rozmiar defektu \sqrt{area} , μm	σ_a MPa	τ_a MPa
1	Roz-ścis.	Eliptyczny-poziomy	170	200	0
2	Roz-ścis.	Eliptyczny-poziomy	400	157	0
3	Roz-ścis.	Eliptyczny-pionowy	170	235	0
4	Roz-ścis.	Sferyczny	95	230	0
5	Roz-ścis.	Sferyczny	170	195	0
6	Roz-ścis.	Sferyczny	400	150	0
7	Roz-ścis.	Sferyczny	880	135	0
8	Skręcanie	Sferyczny	170	0	160
9	Skręcanie	Sferyczny	380	0	145
10	Skręcanie	Sferyczny	950	0	125
11	Roz-ścis.-skręcanie	Sferyczny	360	128	72

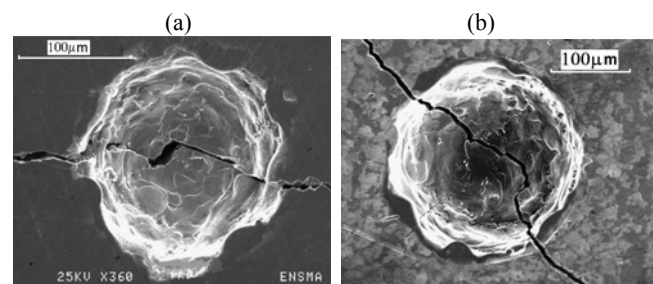
Szczegółowa analiza eksperymentalna została przeprowadzona w celu obserwacji i zrozumienia mechanizmów zmęczenia. Analiza przeprowadzona za pomocą obserwacji elektronowym mikroskopem skaningowym oraz symulacje rozkładów naprężeń wokół defektów pozwoliła na wysunięcie następujących wniosków:

- Pierwszy etap pęknięcia następował na płaszczyźnie maksymalnego naprężenia stycznego (Rys. 2). Etap ten jest zazwyczaj pomijany w materiałach zawierających defekty.
- Makroskopowe pęknięcia pokrywają się z płaszczyzną maksymalnych naprężeń normalnych (Rys.2).

- Wpływ defektu na granicę zmęczenia nie może być uwzględniany tylko przez naprężenia w punkcie najbardziej obciążonym. Wpływ gradientu naprężeń/odkształceń musi być brany pod uwagę.



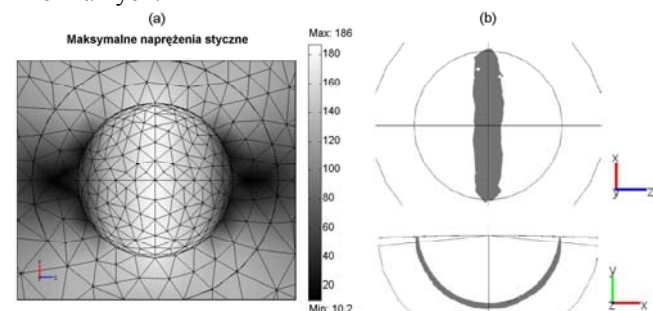
Rys. 1. Geometria defektów: (a) defekt sferyczny, (b) defekt eliptyczny poziomy, (c) defekt eliptyczny pionowy



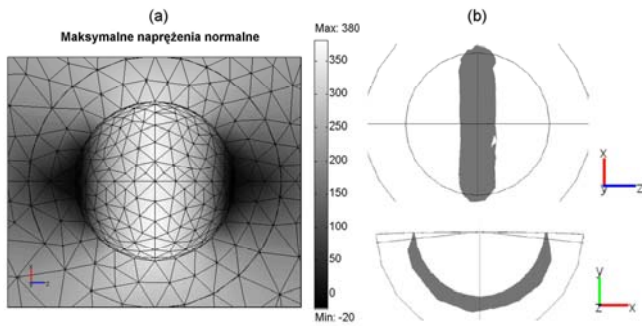
Rys. 2. Przykładowe zdjęcia pęknięć dla defektu sferycznego (a) rozciąganie-ściskanie, (b) skręcanie

3. ROZKŁAD NAPRĘŻEŃ WOKÓŁ DEFEKTU

Metoda elementów skończonych (COMSOL, 2005) została wykorzystana do wyznaczania przestrzennych rozkładów naprężeń wokół defektu. Symulacje numeryczne zostały wykonane dla każdego typu defektu i obciążenia. Maksymalna wartość efektywnego naprężenia według kryterium Hubera-Misesa-Hencky'ego przekracza cykliczną granicę plastyczności (Tab. 1) prawie dla wszystkich próbek, w związku z tym symulację przeprowadzono w zakresie sprężysto-plastycznym. Z uwagi na obciążenia proporcjonalne, bez udziału wartości średniej, w obliczeniach zastosowano model izotropowego umocnienia materiału z symulacją jednej ćwiartki cyklu obciążenia. Rysunki 3 i 4 przedstawiają przykładowe mapy rozkładów maksymalnych naprężeń stycznych i normalnych.

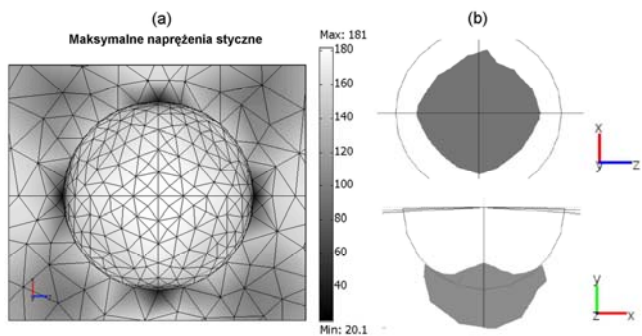


Rys. 3. Przypadek 4 wg tabeli 2: (a) rozkład maksymalnych naprężeń stycznych, (b) obszar zawierający 10% największych naprężeń stycznych

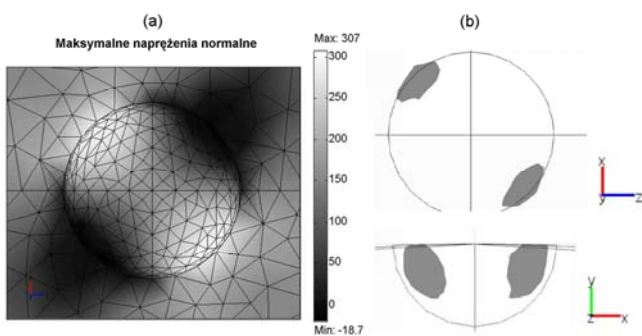


Rys. 4. Przypadek 4 wg tabeli 2: (a) rozkład maksymalnych naprężeń normalnych, (b) obszar zawierający 10% największych naprężeń normalnych

W przypadku rozciągania-ściskania obszary zawierające 10% maksymalnych naprężeń stycznych i normalnych pokrywają się. W związku z tym lokalizacja wystąpienia inicjacji pęknięcia zmęczeniowego nie budzi większych wątpliwości. Natomiast w przypadku skręcania (Rys. 5 i 6) położenia obszarów zawierających 10% maksymalnych naprężeń stycznych i normalnych nie pokrywają się. Efekt ten znacznie utrudnia lokalizację inicjacji pęknięcia zmęczeniowego i związku z tym prawidłowego oszacowania trwałości zmęczeniowej.



Rys. 5. Przypadek 8 wg tabeli 2: (a) rozkład maksymalnych naprężeń stycznych, (b) obszar zawierający 10% największych naprężeń stycznych



Rys. 6. Przypadek 8 wg tabeli 2: (a) rozkład maksymalnych naprężeń normalnych, (b) obszar zawierający 10% największych naprężeń normalnych

Tabela 3 przedstawia lokalne maksymalne naprężenia styczne i normalne dla dwóch obszarów 10% o największych naprężeniach. W obszarze zawierającym 10% największych naprężeń stycznych wyróżniono dwie płaszczyzny: płaszczyznę maksymalnych naprężeń stycznych, na której określono naprężenia styczne i normalne oraz płaszczyznę maksymalnych naprężeń

normalnych, na której naprężenia styczne są zerowe. Z porównania danych zawartych w Tabeli 3 z granicami zmęczenia próbek bez defektów przy rozciąganiu-ściskaniu, $\sigma_{af} = 240$ MPa oraz przy skręcaniu $\tau_{af} = 169$ MPa wynika, że lokalne naprężenia styczne, normalne czy też ich kombinacje nie mogą być użyte do wyznaczenia granicy zmęczenia.

Tab. 3. Lokalne maksymalne naprężenia styczne i normalne

Lp.	Obszar krytyczny: 10% największych:			
	naprężeń stycznych		Płaszczyzna maksymalnych naprężeń normalnych	naprężeń normalnych
	Płaszczyzna maksymalnych naprężeń stycznych	Płaszczyzna maksymalnych naprężeń stycznych		
τ_{ns} MPa	σ_n MPa	σ_n MPa	σ_n MPa	
1	235	227	491	491
2	209	316	470	470
3	128	128	287	287
4	186	201	381	382
5	171	178	345	355
6	155	155	303	303
7	152	152	301	301
8	187	1	184	307
9	176	1	173	290
10	170	1	170	264
11	167	117	287	317

4. REDUKCJA GRADIENTÓW NAPRĘŻEŃ W PŁASZCZYŹNIE KRYTYCZNEJ

Podstawą proponowanej koncepcji szacowania wpływu gradientów naprężeń na trwałość zmęczeniową elementów maszyn i konstrukcji jest powiązanie idei płaszczyzny krytycznej (Karolczuk i Macha, 2005) z metodami nielokalnymi opisującymi stan wyężenia materiału. Metody nielokalne w obliczeniach zmęczeniowych uwzględniają stany naprężenia, odkształcenia lub energetyczne panujące nie w jednym, lokalnym punkcie materiału, ale w pewnym jego obszarze. Natomiast idea płaszczyzny krytycznej zakłada, że za zniszczenie materiału odpowiadają pewne składowe tensora naprężenia, czy też odkształcenia występujące w jednej płaszczyźnie. Zastosowanie idei płaszczyzny krytycznej w metodach nielokalnych jest jak dotychczas znikome (Qyłaflu et al, 1999; Seweryn i Mróz, 1998).

Z przeprowadzonych analiz wynika, że naprężenia normalne oraz naprężenia styczne działające w określonej płaszczyźnie muszą być rozpatrywane oddzielnie. W proponowanej metodzie, rozkłady naprężeń stycznych i normalnych są rozpatrywane osobno poprzez wyznaczenie uśrednionych przebiegów naprężeń stycznych i normalnych w płaszczyźnie krytycznej

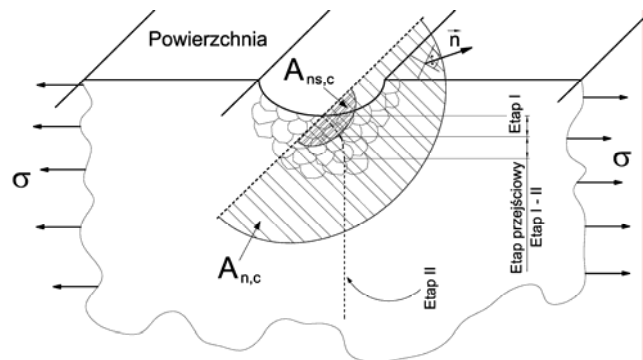
$$\hat{\tau}_{ns}(t, \vec{n}, \vec{s}) = \frac{1}{A_{ns,c} A_{ns}} \int \tau_{ns}(t, \vec{n}, \vec{s}, x, y, z) dA_{ns} \quad (1)$$

$$\hat{\sigma}_n(t, \vec{n}) = \frac{1}{A_{n,c} A_n} \int \sigma_n(t, \vec{n}, x, y, z) dA_n$$

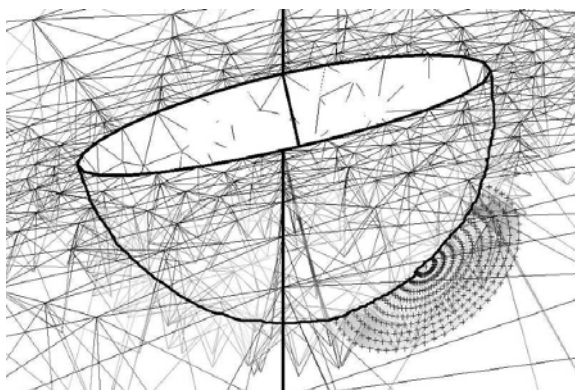
gdzie τ_{ns} to naprężenia styczne w kierunku \vec{s} w płaszczyźnie krytycznej o normalnej \vec{n} ; σ_n to naprężenia normalne w tej samej płaszczyźnie; t - czas, x, y, z - położenie analizowanych punktów w globalnym układzie

współrzędnych, $A_{ns,c}$ – wielkość wyodrębnionego pola powierzchni uśredniania naprężeń stycznych (Rys. 7, 8), $A_{n,c}$ – wielkość wyodrębnionego pola powierzchni uśredniania naprężeń normalnych. Tak wyznaczone przebiegi naprężeń stycznych $\hat{\tau}_{ns}$ i normalnych $\hat{\sigma}_n$ są następnie użyte w kryterium wieloosiowego zmęczenia do oszacowania trwałości zmęczeniowej. Uśrednione naprężenia normalne $\hat{\sigma}_n$ i styczne $\hat{\tau}_{ns}$ są wprowadzane na miejsce naprężeń lokalnych do wybranego kryterium wieloosiowego zmęczeniowego, według którego obliczany jest ekwiwalentny (zredukowany do stanu jednoosiowego) parametr naprężenia, odkształcenia lub energii odkształcenia.

Postuluje się, że wielkość pola powierzchni $A_{ns,c}$, gdzie analizowane są naprężenia styczne dotyczy skali mezoskopowej, czyli obszaru kilku ziaren. Natomiast, wpływ naprężeń normalnych jest rozpatrywany w skali makroskopowej na polu o wielkości $A_{n,c}$. Dla uproszczenia obliczeń założono kształt kołowy obydwu pól $A_{ns,c}$ i $A_{n,c}$ (Rys. 7, 8).



Rys. 7. Schematyczny obraz kształtu i położenia pól $A_{ns,c}$ i $A_{n,c}$, w których uśredniane są odpowiednio naprężenia styczne i normalne



Rys. 8. Kształt i położenie pola $A_{n,c}$, użyte w metodzie elementów skończonych na przykładzie defektu sferycznego

5. KRYTERIUM WIELOOSIOWEGO ZMĘCZENIA MATERIAŁÓW

Do wyznaczania granicy zmęczenia na podstawie obliczonych amplitud uśrednionych naprężeń normalnych i stycznych posłużono się kryterium Matake (Karolczuk i Macha, 2005; Matake, 1977). Kryterium to zakłada, że za zmęczenie materiału odpowiada liniowa kombinacja

amplitud naprężenia stycznego i normalnego w płaszczyźnie o maksymalnej amplitudzie naprężeń stycznych. W analizowanym przypadku kryterium to przybiera postać

$$\hat{\tau}_{ns,a} + \left(2 \frac{\tau_{af}}{\sigma_{af}} - 1 \right) \hat{\sigma}_{n,a} = \tau_{af}^{cal} \quad (2)$$

gdzie τ_{af}^{cal} jest obliczoną granicą zmęczenia przy wieloosiowym stanie obciążenia.

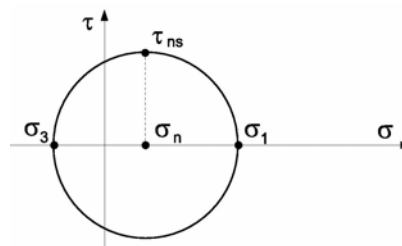
Matake zaproponował swoje kryterium do analizy lokalnej, w którym zachowana jest następująca zależność (Rys. 9)

$$\sigma_n = \sigma_1 - \tau_{ns} \quad (3)$$

W przypadku naprężeń uśrednianych na pewnych powierzchniach zależność (3) nie musi być zachowana. W związku z tym proponuje się uogólnić kryterium Matake do następującej formy

$$\hat{\tau}_{ns,a} + \left(2 \frac{\tau_{af}}{\sigma_{af}} - 1 \right) (\hat{\sigma}_1 - \hat{\tau}_{ns,a}) = \tau_{af}^{cal} \quad (4)$$

gdzie $\hat{\sigma}_1$ jest uśrednioną wartością maksymalnym naprężeń głównych w płaszczyźnie gdzie wartość $\hat{\sigma}_1$ osiąga maksimum i w czasie t dla $\hat{\tau}_{ns}(t) = \hat{\tau}_{ns,a}$.



Rys. 9. Koło Mohra

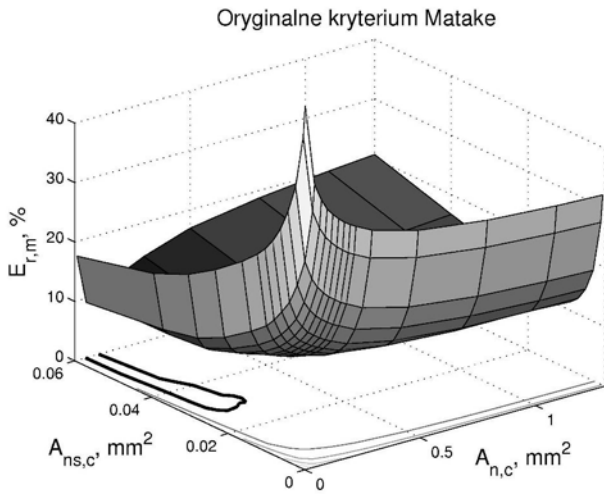
6. ANALIZA WYNIKÓW OBLICZEŃ

Wielkości pól $A_{ns,c}$ i $A_{n,c}$ zostały dobrane na podstawie eksperymentu na podstawie prób rozciągania-ściskania z defektami sferycznymi o różnej wielkości (przypadki 4-7, tab. 2). Wpływ wielkości pól $A_{ns,c}$ i $A_{n,c}$ na obliczoną granicę zmęczenia τ_{af}^{cal} został przeanalizowany dla dwóch kryteriów przedstawionych za pomocą równań (2) i (4). W analizach posłużono się następującym parametrami błędów:

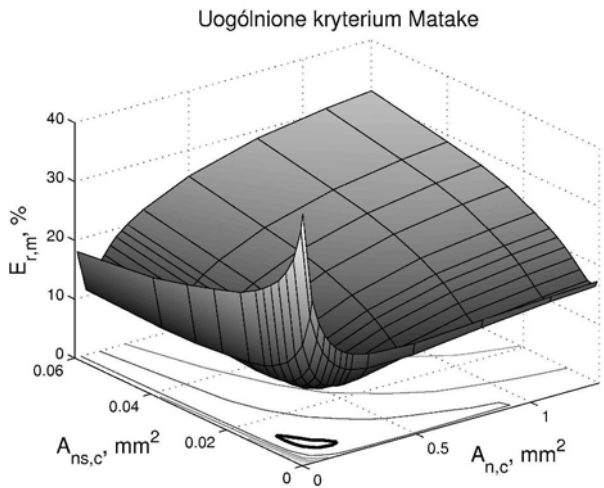
$$E_r(i) = \frac{\tau_{af}^{cal}(i) - \tau_{af}}{\tau_{af}} 100\%, \quad E_{r,m} = \sqrt{\sum_{i=1}^4 E_r(i)^2} \quad (5)$$

Rysunki 10 i 11 przedstawiają otrzymane wyniki dla dwóch analizowanych kryteriów. Dla podejścia lokalnego tj. $A_{ns,c} \rightarrow 0$ i $A_{n,c} \rightarrow 0$ otrzymane błędy osiągają wartość maksymalną, co potwierdza, że maksymalne lokalne naprężenia nie mogą być użyte do określenia granicy zmęczenia materiału zawierającego defekty. Najmniejszy błąd ($E_{r,m} = 9,1\%$) dla oryginalnego kryterium Matake został osiągnięty dla $A_{ns,c} = 0,06 \text{ mm}^2$ (25-100 ziaren) i $A_{n,c} = 0,06 \text{ mm}^2$. Wyznaczone wielkości pól są jednakowe, co nie jest zgodne z postawionym postulatem, że pole $A_{ns,c} < A_{n,c}$ a wielkość pola $A_{ns,c}$ powinna osiągnąć obszar co najwyżej

kilkunastu ziaren. Warunki te spełnia uogólnione kryterium Matake, dla którego najmniejszy błąd, osiągnięty dla pól: $A_{ns,c} = 0.0073 \text{ mm}^2$ (4-9 ziaren) i $A_{n,c} = 0.14 \text{ mm}^2$, wynosi 9.5%.



Rys. 10. Parametr $E_{r,m}$ w funkcji różnych wielkości pól $A_{ns,c}$ i $A_{n,c}$ wyznaczonego według zależności (2)



Rys. 11. Parametr $E_{r,m}$ w funkcji różnych wielkości pól $A_{ns,c}$ i $A_{n,c}$ wyznaczonego według zależności (4)

Rozmiary pól $A_{ns,c}$ i $A_{n,c}$ są kwestią otwartą. W pewnych zakresach tych pól wartość błędu $E_{r,m}$ zmienia się nieznacznie dla obydwu analizowanych kryteriów. Wyznaczanie uśrednianych wielkości naprężeń na dwóch polach jest pewnym uproszczeniem pozwalającym na uwzględnienie różnego wpływu gradientów naprężeń stycznych i normalnych na trwałość zmęczeniową. Uśredniane wielkości nie zależą od wybranego kryterium wieloosiowego zmęczenia, co pozwala na zastosowanie tych wielkości w analizie różnych kryteriów.

Ustalone wielkości pól dla obydwu analizowanych kryteriów zostały użyte do wyznaczenia błędów E_r dla pozostałych przypadków obciążeń i defektów. Otrzymane wyniki są przedstawione w tabelach 4 i 5 oraz na rysunkach 12 i 13. Tabele 4 i 5 zawierają również informację o lokalizacji punktu krytycznego ('hot spot'), tj. punktu gdzie parametr uszkodzenia (2) lub (4) jest największy. Położenie tego punktu jest opisane przez promień r_0 , który określa odległość między wyznaczonym punktem a środkiem defektu (rys. 14). Położenie punktu krytycznego zmienia się w zależności

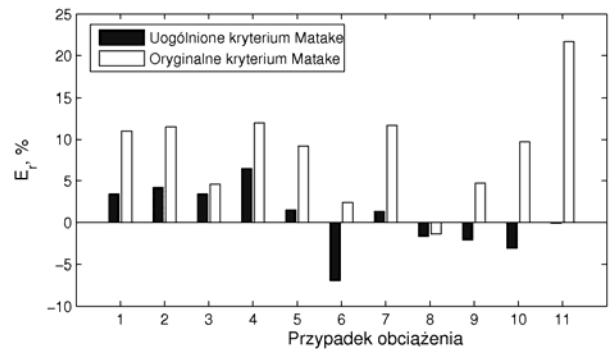
od kształtu i wielkości defektu. Natomiast, w przypadku testów przy wahadłowym rozciąganiu-ściskaniu (lp. 1-7, tab. 4 i 5) położenie punktu krytycznego jest identyczne dla obydwu analizowanych kryteriów bez względu na kształt i wielkość defektu. Odmienna sytuacja jest w przypadku skręcania (lp. 8-10, tab. 4 i 5) i kombinacji skręcania z rozciąganiem-ściskaniem (lp. 11, tab. 4 i b), gdzie położenie punktu krytycznego zmienia się w zależności od wybranego kryterium.

Tab. 4. Parametr błędu E_r dla $A_{ns,c} = 0,0073 \text{ mm}^2$, $A_{n,c} = 0,14 \text{ mm}^2$ oraz położenie punktu krytycznego

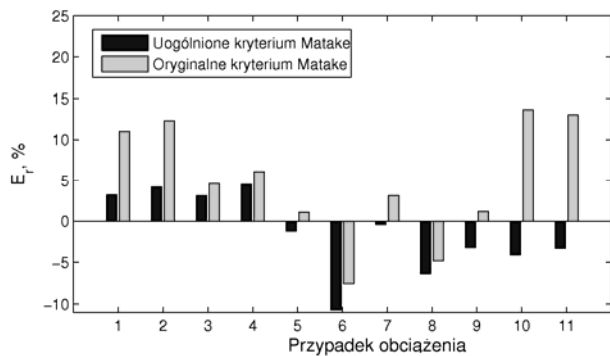
Lp.	$A_{ns,c} = 0,0073 \text{ mm}^2$ $A_{n,c} = 0,14 \text{ mm}^2$			
	Uogólnione kryterium Matake		Oryginalne kryterium Matake	
	$E_r, \%$	r_0, mm	$E_r, \%$	r_0, mm
1	3,4	0,012	11,0	0,000
2	4,2	0,054	11,5	0,054
3	3,4	0,000	4,6	0,000
4	6,5	0,046	12,0	0,046
5	1,5	0,067	9,2	0,067
6	-6,9	0,096	2,4	0,096
7	1,3	0,620	11,7	0,620
8	-1,7	0,010	-1,4	0,090
9	-2,1	0,037	4,7	0,292
10	-3,1	0,181	9,7	0,616
11	-0,1	0,236	21,7	0,286
	12,31		35,14	

Tab. 5. Parametr błędu E_r dla $A_{ns,c} = 0,06 \text{ mm}^2$, $A_{n,c} = 0,06 \text{ mm}^2$ oraz położenie punktu krytycznego

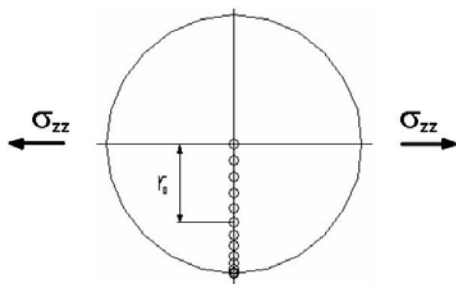
Lp.	$A_{ns,c} = 0,06 \text{ mm}^2$ $A_{n,c} = 0,06 \text{ mm}^2$			
	Uogólnione kryterium Matake		Oryginalne kryterium Matake	
	$E_r, \%$	r_0, mm	$E_r, \%$	r_0, mm
1	3,2	0,000	11,0	0,000
2	4,2	0,054	12,3	0,054
3	3,1	0,135	4,6	0,000
4	4,5	0,076	6,1	0,076
5	-1,2	0,035	1,1	0,067
6	-10,7	0,252	-7,5	0,252
7	-0,4	0,620	3,1	0,577
8	-6,3	0,021	-4,8	0,069
9	-3,2	0,037	1,2	0,292
10	-4,1	0,090	13,6	0,614
11	-3,3	0,180	13,0	0,276
	15,85		27,86	



Rys. 12. Parametr E_r dla wszystkich przypadków obciążenia (Tab. 2) ustalone dla $A_{ns,c} = 0,0073 \text{ mm}^2$, $A_{n,c} = 0,14 \text{ mm}^2$



Rys. 13. Parametr E_r dla wszystkich przypadków obciążenia (Tab. 2) ustalone dla $A_{ns,c} = 0,06 \text{ mm}^2$, $A_{n,c} = 0,06 \text{ mm}^2$



Rys. 14. Określenie położenia punktu krytycznego na przykładzie defektu sferycznego (przypadki 4-7, tab.2)

5. WNIOSKI

Zaproponowana metoda redukcji gradientów naprężeń stycznych i normalnych i zastosowanie jej do wyznaczenia granicy zmęczenia przy użyciu uogólnionego kryterium Mataka okazała się efektywna dla analizowanych wyników badań. Proces uśredniania może być przeprowadzany w każdej dyskretnej chwili czasu, co umożliwi wyznaczenie uśrednionych przebiegów naprężeń stycznych i normalnych. W związku z tym przebiegi o charakterze losowym również mogą być analizowane proponowaną metodą. Przedstawiona nielokalna metoda uwzględnia odmienny wpływ gradientów naprężeń stycznych i normalnych na trwałość zmęczeniową poprzez analizę tych naprężeń na dwóch różniących się wielkością polach. W przypadku braku wystarczających danych eksperymentalnych wielkości pól $A_{ns,c}$ i $A_{n,c}$ mogą być określone na podstawie średniej wielkości ziaren.

Zarodkowanie pęknięć zmęczeniowych oraz ich prędkość propagacji w skali mezoskopowej jak i makroskopowej zależy od wielkości naprężeń rozwierających pęknięcia i naprężeń stycznych wpływających na powstawanie pęknięć. W związku z tym w prawidłowej procedurze wyznaczania pojedynczych parametrów odpowiadających za te zjawiska powinno się wziąć pod uwagę wielkości tych parametrów zmieniających się w płaszczyźnie krytycznej. Kolejne prace będą podejmowane w celu określenia funkcji wagowych do wyznaczania uśrednionych wartości naprężeń stycznych i normalnych. Funkcje te będą zależne od lokalnych wartości naprężeń normalnych i stycznych występujących w płaszczyźnie krytycznej o polach $A_{n,c}$ i $A_{ns,c}$.

LITERATURA

1. Carboni M., Beretta S., Finzi A. (2003), Defects and in-service fatigue life of truck wheels, *Engng Fract. Anal.* 10, 45–57.
2. Nadot Y., Denier V. (2004), Fatigue failure of suspension arm: experimental analysis and multiaxial criterion, *Engng Fract. Anal.* 11, 485–499.
3. Bullough R., Burdekin F.M., Chapman O.V.J., Green V.R., Lidbury D.P.G. Pisarski H., Warwick R.G., Wintle J.B. (2001), The probability of “large” defects in thick-section butt welds in nuclear components, *Int. J. of Pressure Vessels and Piping*, 78, 553–565.
4. Beretta S., Blarasin A., Endo M., Giunti T., Murakami Y. (1997), Defect tolerant design of automotive components, *Int. J. Fatigue* 19, 319–333.
5. Beretta S. Boniardi M. (1999), Fatigue strength and surface quality of eutectoid steel wires, *Int. J. Fatigue* 21, 329–335.
6. Beretta S. (2003), Application of multiaxial fatigue criteria to materials containing defects, *Fatigue Fract. Engng Mater. Struct.* 26, 551–559.
7. Papadopoulos I.V., Panoskaltsis V.P. (1996), Invariant formulation of a gradient dependent multiaxial high-cycle fatigue criterion, *Engng Fract. Mech.* 55(4), 513–528.
8. Morel F., Palin-Luc T. (2002), A non-local theory applied to high cycle multiaxial fatigue, *Fatigue Fract. Engng Mater. Struct.* 25, 649–665.
9. Murakami Y., Endo M. (1994), Effect of defect, inclusions and inhomogeneities on fatigue strength, *Int. J. of Fatigue* 16, 163–182.
10. Endo M., Ishimoto I. (2006), The fatigue strength of steels containing small holes under out-of-phase combined loading, *Int. J. of Fatigue* 28, 592–597.
11. Billaudeau T., Nadot Y. Bezine G. (2004), Multiaxial fatigue limit for defective materials: mechanisms and experiments, *Acta Mater.* 52, 3911–3920.
12. COMSOL (2005), Structural Mechanics Module User’s Guide, version 3.2.
13. Karolczuk A., Macha E. (2005), A review of critical plane orientations in multiaxial fatigue failure criteria of metallic materials, *Int. J. of Fracture* 134, 267–304.
14. Qylafku G., Azari Z., Kadi N., Gjonaj M, Pluinage G. (1999), Application of a new model proposal for fatigue life prediction on notches and key-seats, *Int. J. Fatigue* 21, 753–760.
15. Seweryn A, Mróz Z. (1998), On the criterion of damage evolution for variable multiaxial stress states, *Int. J. Solids Structures* Vol. 35, No. 14, 1589–1616.
16. Matak T., (1977), An explanation on fatigue limit under combined stress, *Bulletin of the JSME* 20(141), 257–263.

NONLOCAL METHOD FOR FATIGUE LIMIT DETERMINATION OF DEFECTIVE MATERIAL

Abstract: The paper presents a new way to reduce the non-uniform shear and normal stress distribution to the uniform ones. The reduction is performed by averaging process of shear and normal stresses over two overlapping characteristic areas. Using this concept various multiaxial critical plane fatigue failure criteria could be used to estimate fatigue life. In the present paper, the Matak multiaxial fatigue failure criterion was verified on defective material subjected to proportional loading.