Mechanika Pękania

Mieszany rozwój pęknięć zmęczeniowych a lokalność zjawisk przed frontem szczeliny

Paweł Kucharski
opiekun naukowy: Prof. dr hab. inż. Mieczysław Szata
opiekun naukowy pomocniczy: Dr inż. Grzegorz Lesiuk

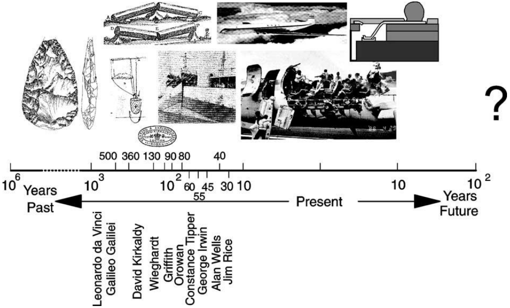
Katedra Mechaniki i Inżynierii Materiałowej
Wydział Mechaniczny

16 czerwca 2016

Plan prezentacji:

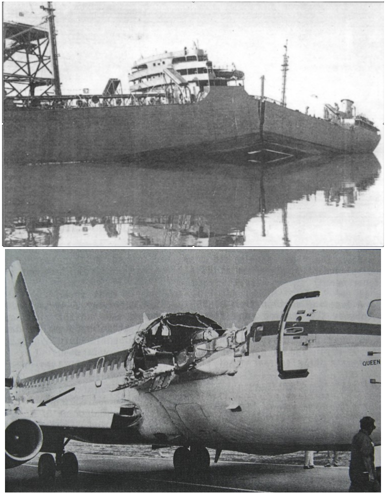
Rys historyczny mechaniki pękania

- Rozwój Mechaniki Pękania to lata czterdzieste XX w
- Istotne nazwiska: Irwin, Barrenblatt, Dugdale, Paris
- Istnienie potrzeby opisu zachowania się materiału z istniejącą wewnątrz imperfekcją (matematycznie - szczeliną)
- Aplikacje głównie w przemyśle lotniczym



Rysunek 1: Rozwój mechaniki pękania (Cotrell)

Przykłady katastrof



Rysunek 2: Przykłady katastrof (Wikimedia Commons)

Uwaga

Klasyczna wytrzymałość materiałów nie odpowiada na zagadnienia związane z rozwojem szczeliny i polem naprężeń w pobliżu jej wierzchołka !

Teoria koncentratorów naprężeń Inglisa

Opis naprężeń w punkcie A (imperfekcja eliptyczna)

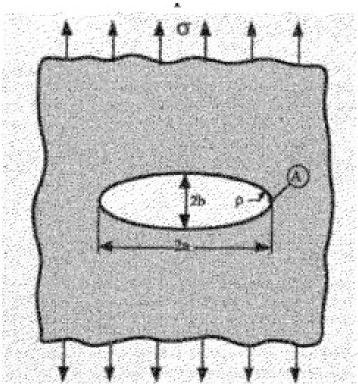
$$\sigma_a = \left(1 + 2\sqrt{\frac{a}{\rho}}\right),$$

Gdzie:

$$\rho = \frac{b^2}{a},$$

Współczynnik Koncentracji Naprężeń:

$$k_t = \frac{\sigma_a}{\sigma}$$



Rysunek 3: Nieskończona płyta ze szczeliną eliptyczną (H.Inglis)

Opis naprężeń w półpłaszczyźnie Westergaard, Mukeshvili

Funkcja naprężeń Airy'ego

$$\nabla^4 \Phi = \nabla^2 (\nabla^2 \Phi) = 0$$

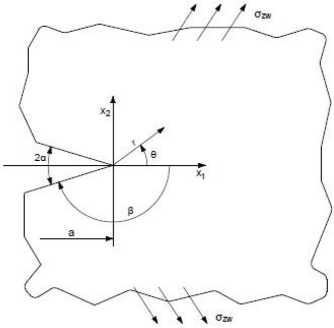
$$\sigma_{11} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\frac{\vartheta}{2}\left(1 - \sin\frac{\vartheta}{2}\sin\frac{3\vartheta}{2}\right)$$

$$\sigma_{22} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\frac{\vartheta}{2}\left(1 + \sin\frac{\vartheta}{2}\sin\frac{3\vartheta}{2}\right)$$

$$\sigma_{12} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \sin\frac{\vartheta}{2}\cos\frac{\vartheta}{2}\cos\frac{3\vartheta}{2}$$

Ogólnie:

$$\sigma_{ij}^m = \frac{K_m}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}^m(\vartheta)$$



Rysunek 4: Opis naprężeń w wierzchołku szczeliny (A.Neimitz)

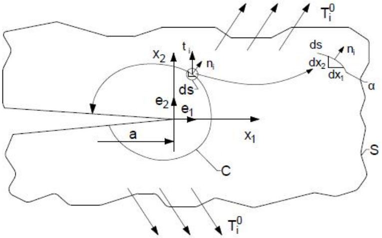
Całka J

$$J = \int_C w\, dx_2 - t_i \frac{\partial u_i}{\partial x_i} ds = \int_C (w n_1 - \sigma_{ij} n_j u_{i1}) ds$$

Gdzie:

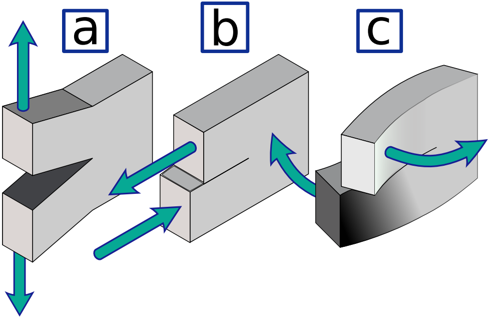
$$w = \int_0^{\varepsilon_{ij}} \sigma_{ij}\, d\varepsilon_{ij}$$

- Wartość całki J jest niezależna od konturu całkowania



Rysunek 5: Opis naprężeń w wierzchołku szczeliny (A.Neimitz)

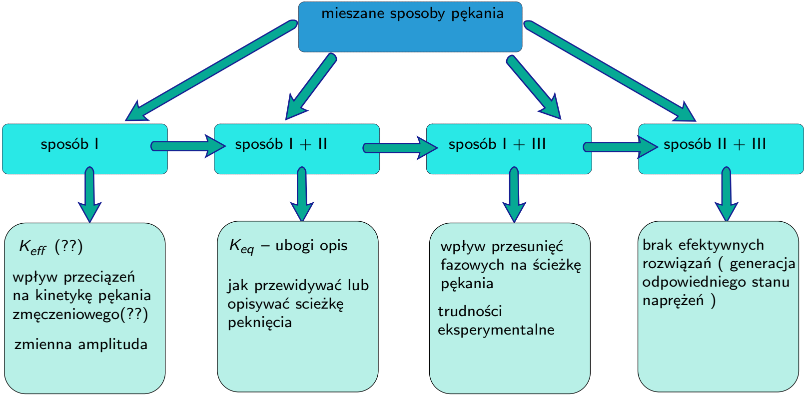
Sposoby pękania



Rysunek 6: sposoby obciążania szczeliny (a)- prostopadle do naprężeń głównych, (b)- techniczne ścinanie (c) - skręcanie

- Oprócz trzech podstawowych sposobów pękania istnieją ich kombinacje, np. (I+II), lub (I+III)
- Narzędzia, które umożliwiałyby badanie tzw. "Mixed Modes" ciągle są rozwijane

Front badań

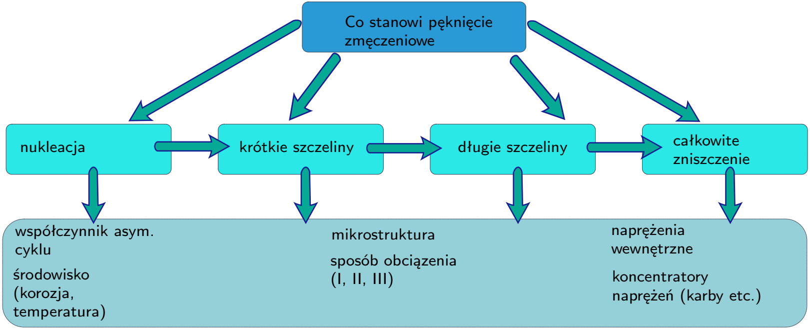


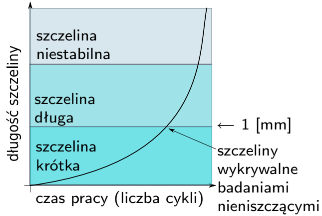
- problemy badawcze zbliżone do zagadnienia sumowania naprężeń (hipotezy wytężeniowe)

Mechanika Pękania a rozwiązania analityczne

- Rozwiązania analityczne pozwalają uzyskać dokładne wyniki, jednak tylko w przypadku nieskomplikowanych geometrii
- Istnieją "katalogi" rozwiązań (np. Murakami, Savruk)
- W przypadku skomplikowanych geometrii i przy złożonych stanach naprężeń, z pomocą przychodzą metody numeryczne

Motywacja do badania szczelin zmęczeniowych





Rysunek 7: czas życia, a wykrywalność szczeliny

Uwaga

Istnieje realna potrzeba odwoływania się do rozwiązań analitycznych lub symulacji zjawisk propagacji szczeliny zmęczeniowej

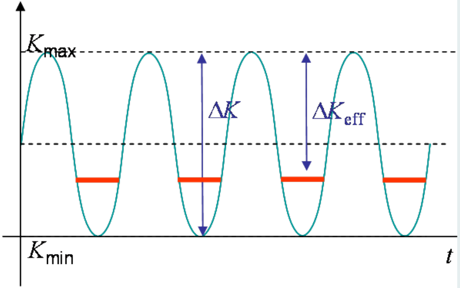
Domykanie się pęknięcia

Elber [1970]

Powierzchnie szczeliny nie zwierają się dopiero w momencie całkowitego odciążenia, lecz podczas występujących (jeszcze) naprężeń rozciągających

- naprężenia pozostające za przemieszczającym się wierzchołkiem pęknięcia
- mechanizm spowodowany szczątkowymi naprężeniami strefy plastycznej
- mechanizm spowodowany nierównością powierzchni pękania (sposób I + II)
- mechanizm tworzenia się na powierzchni pęknięcia cząstek tlenków

Domykanie się pęknięcia – K efektywne



Rysunek 8: Istota K efektywnego

Podstawowe Zależności

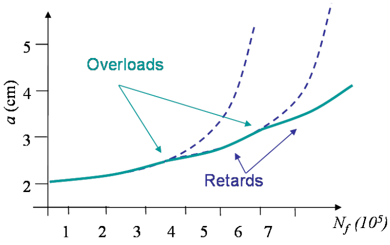
$$K_{min} = \beta\sigma_{min}\sqrt{\pi l}$$
$$K_{max} = \beta\sigma_{max}\sqrt{\pi l}$$
$$\Delta K = \beta\Delta\sigma\sqrt{\pi l}$$

ale,

$$\Delta K_{eff} = K_{max} - K_{op}$$

wg modelu Dugdale'a dla $R = 0$,

$$\frac{K_{op}}{K_{max}} = 0,557$$



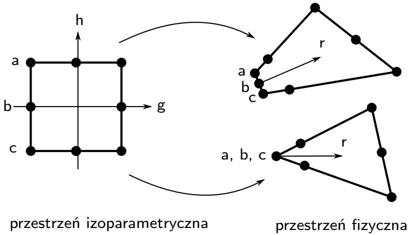
Rysunek 9: Wpływ przeciążeń na liczbę cykli

- mechanizm jest skutkiem szczątkowych naprężeń ściskających w odciążonej za wierzchołkiem szczeliny strefie plastycznej powiększonej przez pojedyńcze przeciążenie
- zjawisko można opisać poprzez model Wheelera

Metody numeryczne - główne wyzwania

- Opis osobliwości naprężeń w pobliżu wierzchołka szczeliny - kowergencja wyników niezależna od liczby elementów skończonych
- Wizualizacja ścieżki i powierzchni pęknięcia w złożonych sposobach pękania (W szczególności I + III)
- Algorytmy remeshingu (lub opracowanie sposobów analiz bez potrzeby adaptowania siatki elementów skończonych)

Quarter points method



Rysunek 10: Mechanizm kontroli funkcji kształtu

Warianty osobliwości dla różnych materiałów

$\varepsilon \propto r^{-1}$ dla mat. liniowo sprężystych

$\varepsilon \propto r^{-1/2}$ dla mat. idealnie plastycznych

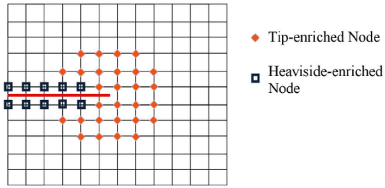
$\varepsilon \propto r^{-\frac{n}{n+1}}$ dla modeli umocnienia

1. "Zapadanie" się jednej strony 8 węzłowego elementu izoparametrycznego tak, że 3 węzły znajdują się w jednym miejscu geometrycznym
2. Przesunięcie węzłów środkowych o tak, aby były w $^1/_4$ długości krawędzi elementu

eXtended finite element method

Równanie f-cji wektorowej przemieszczeń

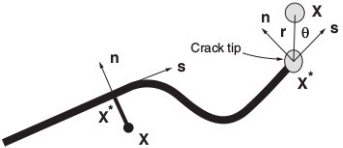
$$\bar{u} = \sum_{I=1}^{N} N_I(x)[\bar{u}_i + H(x)\bar{a}_i + \sum_{\alpha=1}^{4} F_\alpha(x)\bar{b}_I^\alpha]$$



Rysunek 11: graficzne przedstawienie węzłów "wzbogaconych" o dodatkowe stopnie swobody

Funkcja H(x)

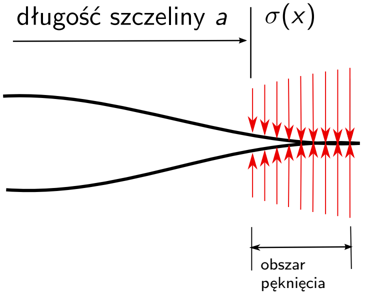
$$H(x) = \begin{cases} 1 & \text{gdy}(x - x^*) \cdot \bar{n} \geqslant 0 \\ -1 & \text{dla pozostałych,} \end{cases}$$



eXtended finite element method (2)

- Do wizualizacji i opisu wzrostu szczeliny stostuje się LSM
- xFem nie wymaga operacji remeshingu, więc jest dużo bardziej wydajny obliczeniowo
- Istnieją ograniczenia jego stosowania
  - elementy pierwszego rzędu
  - elementy typu Hexa, lub Quad
  - nie można symulować efektu branchingu
- Największa zaletą jest brak konieczności zakładania ścieżki szczeliny *a priori*
- W połączeniu z innymi narzędziami, istnieje możliwość badania zarówno inicjacji szczeliny jak i propagacji

Cohesive Zone Modelling



Rysunek 12: Opis osobliwości naprężenia za pomocą długości efektywnej (Barenblatt)

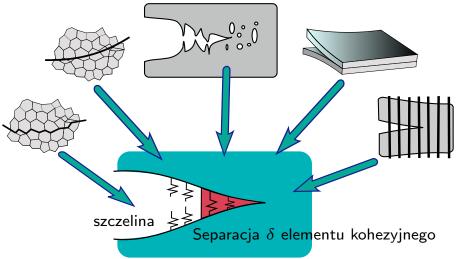
Barenblatt [1962]

Uniknięcie niefizycznej osobliwości przy wierzchołku szczeliny, ale $\sigma(x)$ nie jest znana (w dodatku nie jest mierzalna), zamiast tego:

$\sigma(\delta)$ traction - separation law

$$\begin{aligned}\delta(x) &= [u_y] \\ &= u_y(x, 0^+) - u_y(x, 0^-)\end{aligned}$$

Cohesive Zone Modelling (2)



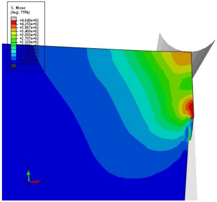
Rysunek 13: Fenomenologiczne przedstawienie różnych mechanizmów pękania przez element kohezyjny (I.Schneider)

Budowa modelu

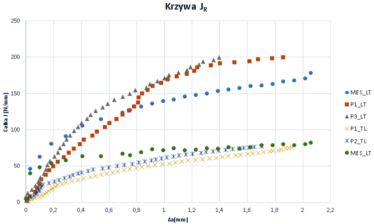
Model jest podzielony na:

- obszar opisujący sprężysto – plastyczny materiał za pomocą "zwykłych" elementów
- obszar opisujący właściwości uszkodzenia / mechaniki pękania (**Cohesive Elements**)

Dotychczasowe działania



Rysunek 14: Warstwice naprężeń zredukowanych podczas propagacji pęknięcia

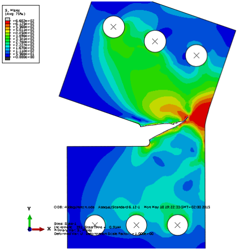


Rysunek 15: Porównanie krzywej R otrzymanej na drodze eksperymentu i analiz numerycznych

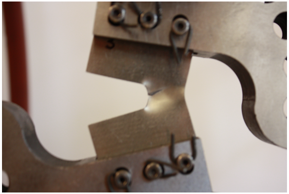
Model belki trójpunktowo zginanej

- określenie krzywej R dla stali zgrzewnej (dla dwóch kierunków walcowania)
- kierunek propagacji założony a prori
- symulacja propagacji jest prowadzona jak analiza kontaktu

Dotychczasowe działania (2)



Rysunek 16: symulacja wzrostu szczeliny dla mieszanych sposobów pękania I + II



Rysunek 17: badania eksperymentalne

Praca Magisterska

- wykorzystanie próbki CTS do zbadania ścieżek pęknięcia dla mieszanego sposobu pękania (I + II) przy różnych kątach
- obciążenie statyczne (od czegoś trzeba zacząć)
- analiza sprężysto – plastyczna (model Ramberga – Osgooda)
- propagacja pęknięcia w oparciu o kryterium MTS
- problem inicjacji pęknięcia w karbie o skończonym promieniu zaokrąglenia (U i V)

Model numeryczny – właściwości materiałowe

Dane materiałowe dla stali 42CrMo4

Skład Chemiczny

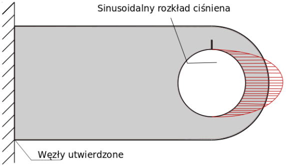
C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	S
0,4	0,2	0,5	0,9	0,2	0,1	0,03

Własności mechaniczne

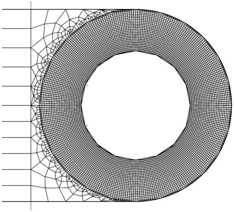
	28HRC	42HRC	54HRC
E [GPa]	210	210	210
ν	0,3	0,3	0,3
σ_{ult} [MPa]	1060	1306	1916

- materiał w modelach szczelin stacjonarnych przedstawiony jako biliniowy
- podczas badania propagacji szczeliny - zachowanie sprężyste
- Wartości G_{Ic} oraz C i m dla prawa Parisa - zmienne w zależności od twardości stali po obróbce

Warunki brzegowe, model dyskretny (model szczeliny stacjonarnej)

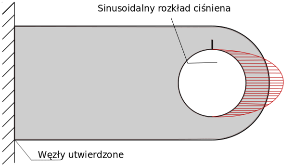


Rysunek 18: Warunki brzegowe i rozkład ciśnienia na powierzchnię otworu

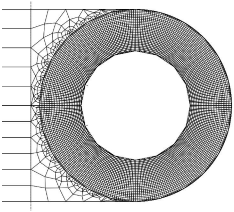


Rysunek 19: Układ elementów skończonych

Warunki brzegowe, model dyskretny (model szczeliny stacjonarnej)



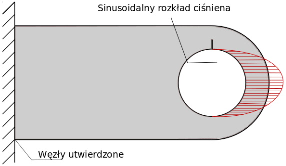
Rysunek 18: Warunki brzegowe i rozkład ciśnienia na powierzchnię otworu



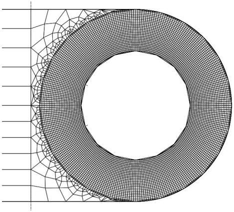
Rysunek 19: Układ elementów skończonych

- Elementy liniowe typu hexa 8 – węzłowe

Warunki brzegowe, model dyskretny (model szczeliny stacjonarnej)



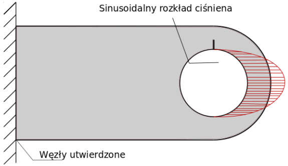
Rysunek 18: Warunki brzegowe i rozkład ciśnienia na powierzchnię otworu



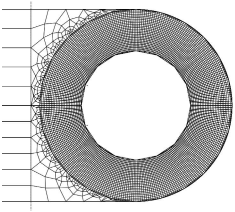
Rysunek 19: Układ elementów skończonych

- Elementy liniowe typu hexa 8 – węzłowe
- Sinusoidalny rozkład cisnienia na powierzchni elementu – wartość tak dobrana, aby w przekroju poprzecznym wywołać naprężenie 50 [MPa]

Warunki brzegowe, model dyskretny (model szczeliny stacjonarnej)



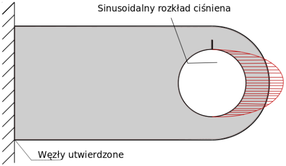
Rysunek 18: Warunki brzegowe i rozkład ciśnienia na powierzchnię otworu



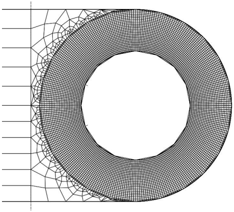
Rysunek 19: Układ elementów skończonych

- Elementy liniowe typu hexa 8 – węzłowe
- Sinusoidalny rozkład cisnienia na powierzchni elementu – wartość tak dobrana, aby w przekroju poprzecznym wywołać naprężenie 50 [MPa]
- Model utwierdzony jak na rysunku 1

Warunki brzegowe, model dyskretny (model szczeliny stacjonarnej)



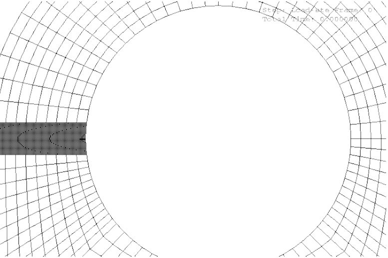
Rysunek 18: Warunki brzegowe i rozkład ciśnienia na powierzchnię otworu



Rysunek 19: Układ elementów skończonych

- Elementy liniowe typu hexa 8 – węzłowe
- Sinusoidalny rozkład cisnienia na powierzchni elementu – wartość tak dobrana, aby w przekroju poprzecznym wywołać naprężenie 50 [MPa]
- Model utwierdzony jak na rysunku 1
- Wartości K_I otrzymywane poprzez iterację długości szczeliny co 0,75 [mm]

Warunki brzegowe, model dyskretny (model propagacji zmęczeniowej)



Rysunek 20: Układ elementów skończonych

	C $\left[\frac{\text{mm/cykl}}{(\text{MPa}\sqrt{\text{mm}})^m}\right]$	m [-]	G_{Ic} [N/mm]
28HRC	5,13e-13	2,82	40,95
42HRC	3,40e-12	2,58	45,29
54HRC	3,40e-14	3,40	9,89

- Obciążenie: R = 0,1, f = 10 [Hz], sinusoidalne
- Utwierdzenie oraz rozkład ciśnienia identyczny jak dla zadania ze szczeliną stacjonarną 3D

Rozwiązanie analityczne

Rozwiązanie Newmana

$$\frac{K_I}{\sigma_n\sqrt{\pi a}} = f_w \cdot f_b \cdot \sqrt{\sec\frac{\pi D}{2W}} \cdot G \quad \text{gdzie}$$

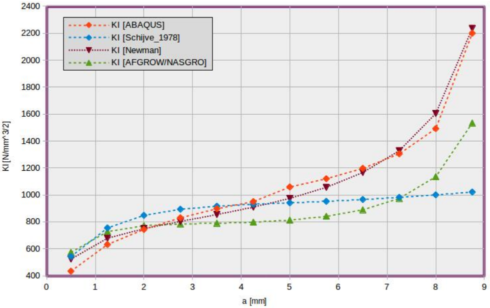
$$f_w = \sqrt{\sec\frac{\pi}{2}\frac{D+a}{W-a}}$$

$$f_b = 0,707 - 0,18\lambda + 6,55\lambda^2 - 10,54\lambda^3 + 6,84\lambda^4$$

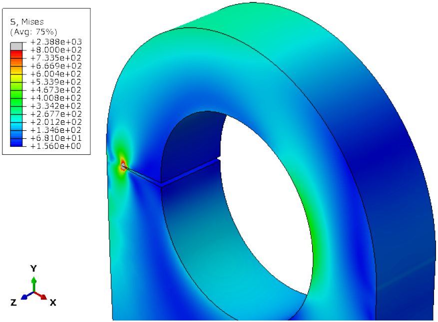
$$\lambda = \frac{1}{1+2a/r}$$

$$G = \frac{1}{2} + \frac{W}{\pi(D+a)}\sqrt{\frac{D}{D+2a}}$$

Wyniki K_I dla szczeliny stacjonarnej



Rysunek 21: Wartości K_I w zależności od długości szczeliny

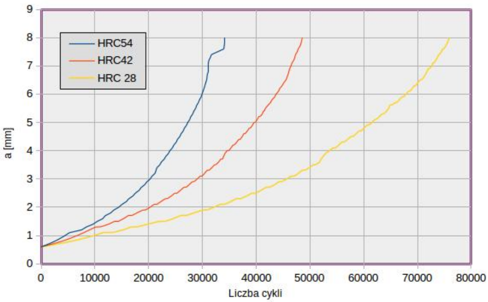


Rysunek 22: Warstwice naprężeń w modelu 3D

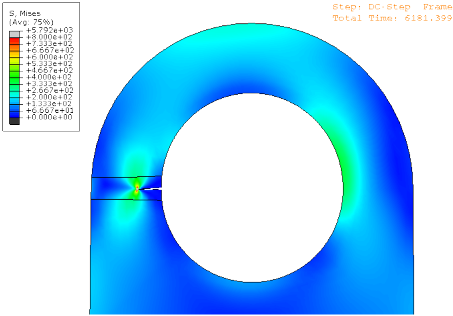
Wniosek:

Model numeryczny jest najbliższy wynikom uzyskanym przez Newmana

Wyniki K_I dla modelu propagacji zmęczeniowej



Rysunek 23: Krzywe czasu życia dla róznych twardości po obróbce cieplnej



Rysunek 24: Warstwice naprężeń w modelu propagacji zmęczeniowej

Uwaga:

Próbka uległa zniszczeniu, jednak z uwagi na liniowy model materiału szczeliny $a > 8$ [mm] nie są brane pod uwagę.

Współpraca

1. współpraca w katedrze:
   - Dr. inż G. Lesiuk – zdecydowana większość poruszanych tematów
   - Dr. inż M. Bocian, Dr inż M. Panek – lokalizacja szczeliny przy użyciu analizy modalnej
   - Dr. inż Justyna Krzak – współpraca z grupą zol–żel (w fazie inicjacji) rozwój metod obliczeniowych pęknięć w bi-materiałach i analiz uszkodzeń w materiałach z pokryciami typu zol-żel
2. współpraca z innymi ośrodkami:
   - Prof. K.Werner – wpływ przeciążeń w mieszanych sposobach pękania (planowana)
   - Prof. A.M.P de Jesus – mechanizm domykania się pęknięcia (modele numeryczne)
3. współpraca z przemysłem:
   - Nobo Solutions – rozwój procedur obliczeniowych (Fitnet), staż przemysłowy

Publikacje

- Lesiuk Grzegorz, Kucharski Paweł: *Inicjacja wzrostu pęknięć w długotrwale eksploatowanych stalach mostowych z punktu widzenia metod energetycznych*, TTS, 2015, R.22, nr 12, s. 920 – 927
- Kucharski Paweł, Lesiuk Grzegorz: *Obliczenia numeryczne podkrytycznego okresu rozwoju pękania zmęczeniowego w warunkach wieloosiowego wytężenia materiałów konstrukcyjnych* Komputerowe wspomaganie badań naukowych XXII , 2015 s. 205 - 212
- Kucharski Paweł, Lesiuk Grzegorz: *Numerical investigation of the mixed mode fracture (I +II) in low carbon steel used in bridge enginneering* 32nd Danubia – Adria Symposium on Advances in Experimental Mechanics, 2015. s. 22-23
- Paweł Kucharski, Mieczysław Szata, Grzegorz Lesiuk *Numerical estimation of stress intensity factors in lug connector with existing flaw* (po recenzji)
- Paweł Kucharski, Mieczysław Szata, Grzegorz Lesiuk *Analysis of fatigue crack growth in long term operated mild low carbon steel in terms of crack closure and energy approach* (po recenzji)
- Grzegorz Lesiuk, Jose A.F.O. Correia, A.M.P De Jesus, Paweł Kucharski *Fatigue crack propagation behavior of old puddle iron including crack closure effects* (w druku)

Planowane publikacje i granty

- Kucharski P., Lesiuk G., Frątczak R., Maciejewski Ł., Czapliński T. „Fatigue fracture in lug joints – a study of the numerical simulation and experimental results comparison" – Engineering Failure Analysis (lista JCR) (lipiec 2016)

1. grant obliczeniowy WCSS
   - Abaqus/CAE
   - MatLab
   - dostęp do mocy obliczeniowej
2. grant NCN Preludium 11/12 (planowany)
3. staż naukowy z Porto (planowany)

Dziękuje za uwagę