ZMMiK Laboratorium 3 - Liniowo Sprężysta Mechanika Pękania

1 Cel laboratorium

Celem ćwiczenia jest numeryczne wyznaczenie współczynnika intensywności naprężeń K_1 dla próbki do trójpunktowego zginania (SENB - Single Edge Notch Bend), oraz porównanie uzyskanych wyników z rozwiązaniem analitycznym zgodnym ze standardem ASTM-E399.

Modelowana geometria próbki oraz jej podstawowe wymiary przedstawione są na rysunku 1 wraz z danymi materiałowymi i obciążeniem:

- W = 50 mm (szerokość/wysokość), L = 4W = 200 mm (rozstaw podpór), B = 0.5W = 25 mm (grubość), a = 0.5W = 25 mm (długość szczeliny),
- $E = 2 \cdot 10^5$ MPa (moduł Younga), $\nu = 0.3$ (współczynnik Poissona),
- P = 1000 N (siła obciążająca).



Rysunek 1: Schemat modelowanej geometrii próbki SENB.

1.1 Obliczenia analityczne

W pobliżu czoła ostrej szczeliny w liniowo sprężystym materiale występuje teoretyczna osobliwość (naprężenia dążą do nieskończoności). Do scharakteryzowania pola naprężeń w tej strefie stosuje się współczynniki intensywności naprężeń K, które zależą od geometrii próbki, długości szczeliny oraz obciążenia. Wyróżnia się trzy mody pękania, którym odpowiadają współczynniki: K_1 (rozwieranie), K_2 (ścinanie w płaszczyźnie) oraz K_3 (ścinanie poza płaszczyzną).

W przypadku próbki SENB obciążonej jak na rysunku 1, dominuje Mod I (rozwieranie), a teoretyczną wartość współczynnika intensywności naprężeń K_1 w warunkach płaskiego stanu odkształcenia (Plane

Strain) można wyznaczyć ze wzoru:

$$K_1 = \frac{P \cdot L}{B \cdot W^{\frac{3}{2}}} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right) \tag{1}$$

gdzie $f\left(\frac{a}{W}\right)$ jest bezwymiarową funkcją zależną od stosunku długości szczeliny do szerokości próbki, określoną dla tej geometrii:

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{3\left(\frac{a}{W}\right)^{\frac{1}{2}} \left[1.99 - \left(\frac{a}{W}\right)\left(1 - \frac{a}{W}\right)\right] \cdot \left(2.15 - 3.93\frac{a}{W} + 2.7\left(\frac{a}{W}\right)^{2}\right)}{2\left(1 + 2\frac{a}{W}\right)\left(1 - \frac{a}{W}\right)^{\frac{3}{2}}}$$
(2)

Alternatywnym parametrem stosowanym w mechanice pękania jest całka J (J-integral), która w warunkach liniowej sprężystości jest równa energii odkształcenia sprężystego uwolnionej na jednostkę pola powierzchni pęknięcia (wskaźnik G - Strain Energy Release Rate). Dla płaskiego stanu odkształcenia (PSO), całka J jest związana z K_1 relacją:

$$J = G_1 = K_1^2 \left(\frac{1 - \nu^2}{E}\right)$$
(3)

Wartości K_1 i J odnoszą się do wartości krytycznych (K_{IC} , J_{IC} lub G_{IC}), które stanowią właściwości materiałowe i odpowiadają warunkom rozpoczęcia kruchej (lub quasi-kruchej) propagacji szczeliny.

1.2 Zadania do wykonania

- 1. Sprawdzić wpływ gęstości siatki na dokładność wyników.
- 2. Przeprowadzić analizę 2D w PSO.

2 Przygotowanie geometrii

1. Przed rozpoczęciem pracy w szkicowniku zaznaczamy w opcjach przyciąganie do siatki: *Snap to grid* - Rysunek 2: 1. Następnie rysujemy prostokąt o wymiarach 100×50 mm w płaszczyźnie *XY*.



Rysunek 2: Przygotowanie geometrii - główny kontur.

- 2. Szkic wycięcia na prawym brzegu Rysunek 3:
 - Rysowanie pionowej linii zaczynamy w punkcie o współrzędnych (-2, 0): 1.
 - Długość linii to 14 mm: 2.
 - Kolejną linią "wracamy" do punktu (16, 0): 3.



Rysunek 3: Przygotowanie geometrii - szkic wycięcia.

- 3. Usunięcie nadmiarowych linii Rysunek 4:
 - Do przecięcia linii używamy funkcji *Split Curve*: **1**.
 - Zaznaczamy punktu, w których przecinają się linie: 2.
 - Wynikowa geometria: **3**.



Rysunek 4: Przygotowanie geometrii - usnięcie linii.

4. Wyciągnięcie szkicu o 25 mm - Rysunek 5:

۴) - ۴ 🖥 🖥 🍕	A:Static Structural - Design1 - SpaceClaim
File Design Display Assemb	aly Measure Facets Repair Prepare Workbanch Detail Sheet Metal Tools KeyShot Momentum
Image: Second system Image: Second system Paste Image: Second system Origonard Orient	N □ 0 ? 2 ? X N X
Structure 4	Pull 1 fee
⊿ ⊘ 🚴 Design1* ⊘ ĝi Solid	
Structure Layers Selection Groups Views	
Options - Pull P	
🔅 General	
+ Add - Cut ⊗ Nomerge	
Options - Pull Camera Options	
Properties 0 Vopearance Artical 255, 143, 17 Style By Lyare, 89, Style V Face Type Shape Ohamfer False	

Rysunek 5: Przygotowanie geometrii - wyciągnięcie szkicu.

- 5. Przygotowanie szczeliny:
 - Dodanie płaszczyzny na górną powierzchnię: Rysunek 6.
 - 1: dodanie płaszczny.
 - 2: jako odniesienie zaznaczamy górną powierzchnię modelu.





Rysunek 6: Przygotowanie geometrii - dodanie płaszczyzny.

- Przesunięcie płaszczyzny w pionie Rysunek 7.
 - 1: wybór opcji *Move*.
 - 2: zaznaczenie płaszczyzny.
 - 3: przesunięcie płaszczyzny w kierunku pionowym o 25 mm:



Rysunek 7: Przygotowanie geometrii - przesunięcie płaszczyzny.

- Podzielenie powierzchni na dwa elementy Rysunek 8.
 - 1: wybór opcji *Split*.
 - 2: zaznaczenie bocznej powierzchni jako geometrii do podziału.
 - 3: zaznaczenie płaszczyzny z poprzednich punktów jako geometrii podziału.



Rysunek 8: Przygotowanie geometrii - podział powierzchni.

- Przygotowanie szczeliny obrót powierzchni Rysunek 9.
 - 1: zaznaczenie w opcji *Pull* dolnej powierzchni.
 - 2: osią obrotu jest krawędź między dwoma powierzchniami.
 - **3**: obrót powierzchni o -1° (w kierunku do materiału).



Rysunek 9: Przygotowanie geometrii - przygotowanie szczeliny.

- 6. Symetryczne odbicie modelu Rysunek 10.
 - 1: wybranie opcji *Mirror*.
 - 2: jako płaszczyznę symetrii zaznaczamy wskazaną powierzchnię.
 - 3: zaznaczamy objętość do symetrycznego odbicia.





Rysunek 10: Przygotowanie geometrii - symetryczne odbicie modelu.

- 7. Przygotowanie linii do wprowadzenia obciążenia Rysunek 11.
 - 1: opcja dodania płaszczyzny.
 - 2: jako odniesienie dla płaszczny zaznaczamy płaszczyznę związaną z osiami *Z* i *Y*.
 - **3**: opcja podziału *Split* górnej powierzchni.
 - 4: jako obiekt dzielący zaznaczamy nową płaszczyznę.



Rysunek 11: Przygotowanie geometrii - dodanie linii obciążenia.

8. Rysunek 12 przedstawia gotową geometrię.



Rysunek 12: Gotowa geometria.

3 Przygotowanie modelu numerycznego

3.1 Układ współrzędnych szczeliny

1. Dodanie układu współrzędnych związanego z frontem szczeliny - Rysunek 13.

- 1: dodanie układu współrzędnych.
- 2: dla lepszej orientacji można zmienić nazwę układu.
- 3: wprowadzenie układu na krawędzi będącej frontem szczeliny.



Rysunek 13: Dodanie układu współrzędnych.

- 2. Obrót układu Rysunek 14.
 - 1: teoretyczny schemat orientacji układu.
 - 2: mając zaznaczony układ współrzędnych w górnej części menu znajdują się opcje modyfikacji jego orientacji, w naszym przypadku będzie to obrót wokół osi *Z*.
 - **3**: zadanie obrotu układu o 90°.
 - 4: obrócony układ.



Rysunek 14: Obrót układu współrzędnych.

3.2 Paramtery siatki

1. Ogólne ustawienia Mesh.

De	tails of "Mesh"		 д
Ξ	Display		^
	Display Style	Use Geometry Setting	
	Defaults		
	Physics Preference	Mechanical	
	Element Order	Quadratic	
	Element Size	Default (10,383 mm)	
Ξ	Sizing		
	Use Adaptive Sizing	No	
	Growth Rate	Default (1,85)	
	Max Size	Default (20,767 mm)	
	Mesh Defeaturing	Yes	
	Defeature Size	Default (5,1754e-002 mm)	
	Capture Curvature	No	
	Capture Proximity	No	
	Size Formulation (Beta)	Program Controlled	
	Bounding Box Diagonal	207,67 mm	
	Average Surface Area	2397,5 mm ²	
	Minimum Edge Length	2,6023 mm	\sim

Rysunek 15: Parametry globalne siatki.

2. Szczegółowy podział

• Podział na dwóch dolnych krawędziach szczeliny - Rysunek 16.



Rysunek 16: Podział na dolnych krawędziach.

• Podział na krawędziach wewnątrz szczeliny - Rysunek 17.



Rysunek 17: Podział wewnątrz szczeliny.

• Podział na dwóch wierzchołkach - Rysunek 18.



Rysunek 18: Podział na wierzchołkach.

• Gotowa siatka elementów wraz z widokiem na okolicę szczeliny.



Rysunek 19: Siatka elementów.

3.3 Parametry frontu szczeliny.

- 1. Zaznaczenie geometrii związanej z frontem szczeliny Rysunek 20
 - 1: wybór linii.
 - * 2: PPM na zaznaczoną linię, Insert \rightarrow Named Selection.

, 🗞 📽 🛷 👯 🖏 🖬 🔃 🚺	🕽 🕲 🕲 🖉 - S 💠 🍳 🖯	R Q 🛛 Q Q 🐺 🕫 🐻 😁 🗆 🗖
$\downarrow \rightarrow \downarrow \mid \downarrow \leftrightarrow$ Size $\checkmark @$	Convert 👻 💠 Miscellaneous 👻 🐼 Toleran	ces 📗 🕋 Clipboard 👻 [Empty]
H Thicken		
netry 🏟 Mesh Edit 🛛 🚳 Mesh Numbering 🕇	🗃 Solution Combination 充 Fatigue Com	bination 🛛 🖺 Named Selection 🔹 AM Process
-		
4	Insert	Kamed Selection
	Go To	Construction Geometry
	Export CAERep Files (Beta) Abandon RSM Jobs (Reta)	and a state of the state of th
		- A Symmetry
	Filter Tree Based On Visible Bodies	🔍 Remote Point
	🔞 Suppress Body	Tracture
	Isometric View	Condensed Geometry
	Set Set Restore Default (H)	Mesh Edit Mesh Numbering
	 Zoom To Fit (F7) Zoom To Selection (Z) 	Connections
	🕼 Image To Clipboard (Ctrl+ C)	Solution Combination
	Cursor Mode View Ø ΩLook At	AM Process
	 ☆ Create Coordinate System ☆ Create Named Selection (N) ☆ Select All (Ctrl+ A) ☆ Select Mesh by ID (M) 	
Association	Refresh Materials Dydate Geometry from Source	

Rysunek 20: Zaznaczenie frontu szczeliny.

- 2. Zaznaczenie górnej i dolnej powierzchni szczeliny Rysunek 21. Uwaga: górną i dolną powierzchnię wybieramy zgodnie ze schematem z rysunku 16 biorąc pod uwagę wprowadzony przez nas układ współrzędnych szczeliny.
 - 1: wybór gornej powierzchni.
 - 2: wybór dolnej powierzchni.



Rysunek 21: Przypisanie powierzchni szczeliny.

- 3. Wybranie węzłów związanych z zaznaczoną geometrią Rysunek 22.
 - 1: elementy wybrane w poprzednich krokach (zmienione nazwy dla ułatwienia kolejnych kroków).
 - 2: z każdego z elementów należy utworzyć grupę węzłów: PPM → *Create Nodal Named Selection*. Uwaga: dzięki przygotowaniu zaznaczenia węzłów w ten sposób przy zmianie siatki grupy zaktualizują się automatycznie.
 - 3: ostateczne grupy węzłów związane ze szczeliną.



Rysunek 22: Zaznaczenie węzłów związanych ze szczeliną.

- 4. Dodanie modułu Fracture Rysunek 23.
 - 1: PPM na $Model \rightarrow Insert \rightarrow Fracture$.
 - 2: PPM na Fracture \rightarrow Insert \rightarrow Pre-Meshed Crack.
 - **3**: Wypełnienie odpowiednich opcji grupami elementów oraz układem współrzędnych związanym z frontem szczeliny.





Rysunek 23: Siatka elementów.

3.4 Warunki brzegowe

- 1. Dodanie warunków brzegowych Rysunek 24.
 - A: Displacement na krawędzi odebrana możliwość ruchu we wszystkich kierunkach.
 - B: *Displacement* na krawędzi odebrana możliwość ruchu w kierunkach *Y* oraz *Z*, kierunek *X*: *Free*.
 - **C**: Force na krawędzi, składowa $F_Y = -1000$ N.



Rysunek 24: Warunki brzegowe.

3.5 Prezentacja wyników

- 1. Dodanie modułu z wynikami związanymi z pękaniem Rysunek 25.
 - 1: PPM na Solution \rightarrow Insert \rightarrow Fracture Tool.
 - 2: Zaznaczenie przygotowanego pęknięcia oraz dodanie do wyników współczynnika *K*₁ oraz całki *J*.

Displacem	iettings ient ient 2			1 1.
GI 5				
Solution	(free)	Insert	•	Deformation
Solution Solution				Strain
- An Dire	ct 🕙	Clear Generated Data		Channel .
- 崎 Equ	o∏e svi	Rename (F2)		Suess
	0	Course All Circilian Children	_	chergy
etails of "Solution (Ab)"		Group All Similar Children		Linearized Stress
Solution	_ 🕒	Open Solver Files Directory		Volume
Number Of Cores to Use (B	eti 🍿	Worksheet: Result Summary		Stress Tool
Adaptive Mesh Refinemen	t	, , , , , , , , , , , , , , , , , , , ,	_	50055 1001
Max Refinement Loops		1,	_	Fatigue
Refinement Depth		2,		Contrast Total
Information			_	Contact 1001
Status		Done	_	Bolt Tool
MAPDL Elapsed Time		18, s		
MAPDL Memory Used		575, MB	2	Fracture Tool
MADDI Decult File Size		76 875 MR	_	Probe
Post Processing				
Distributed Post Processing) (Beta)	Program Controlled	-	Coordinate Systems
Mesh Source (Beta)		Program Controlled		Hear Defined Result
Beam Section Results		No	uter.	User Dernied Result
On Demand Stress/Strain		No	- 🗈	Commands
			_	

	ė	Fracture Tool SIFS (K1) J-Integral (JINT)	*
D	etails of "Fracture"	4	
Ξ	Scope		
	Scoping Method	Crack Selection	
	Crack Selection	Pre-Meshed Crack	
Ξ	Definition		

Rysunek 25: Narzędzie Fracture Tool.

2. Rozkład K_1 na froncie szczeliny.



Rysunek 26: Rozkład K_1 na froncie szczeliny.

3. Rozkład J na froncie szczeliny.



Rysunek 27: Rozkład J na froncie szczeliny.