

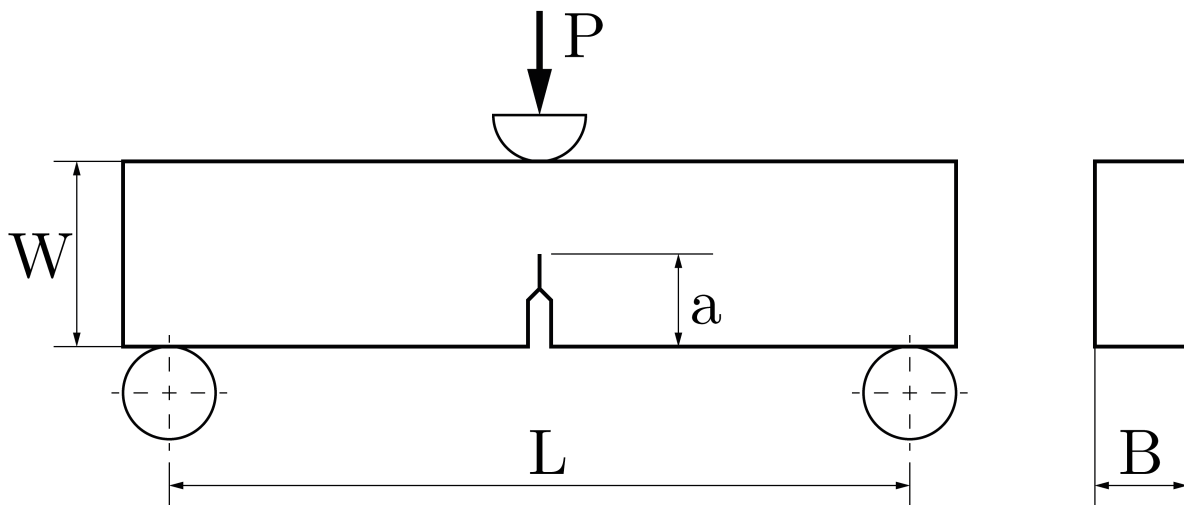
ZMMiK Laboratorium 3 - Liniowo Sprężysta Mechanika Pękania

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 (ściananie w płaszczyźnie) oraz K_3 (ściananie 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:

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

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

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

Alternatywnym parametrem stosowanym w mechanice pęknięcia 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:

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

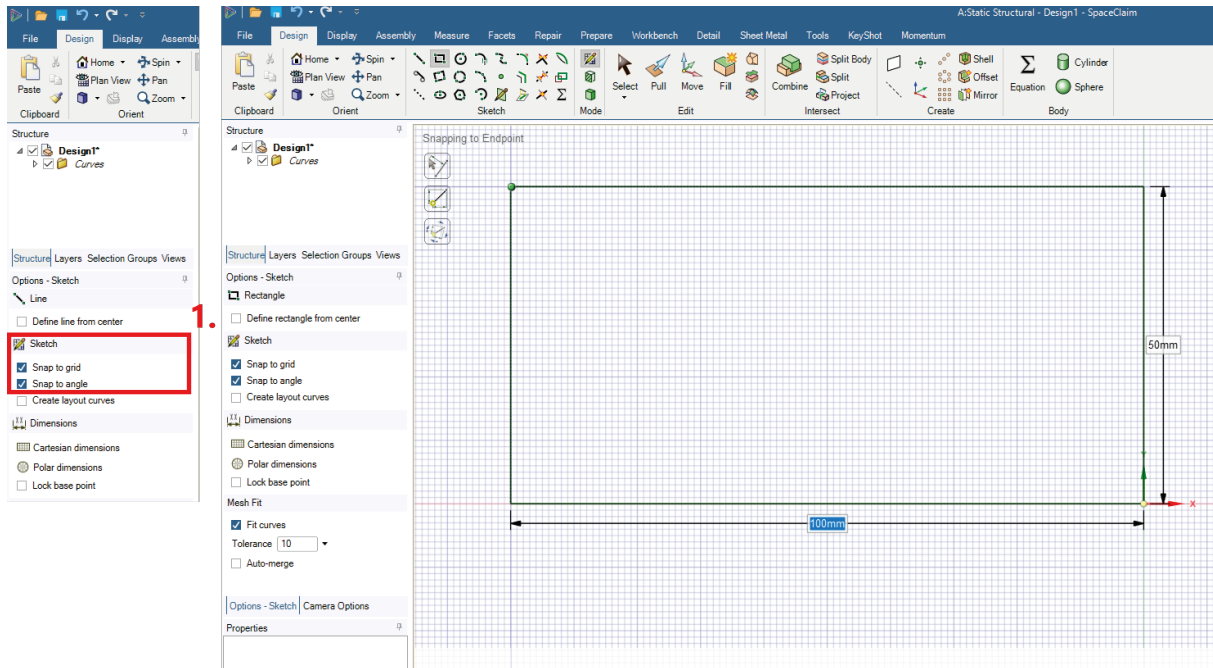
Wartości K_1 i J odnoszą się do wartości krytycznych (K_{IC} , J_{IC} lub G_{IC}), które stanowią właściwości materiałowe i odpowiadają warunkom rozpoczęcia kruchej (lub quasi-kruchej) propagacji szczeliny.

1.2 Zadania do wykonania

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

2 Przygotowanie geometrii

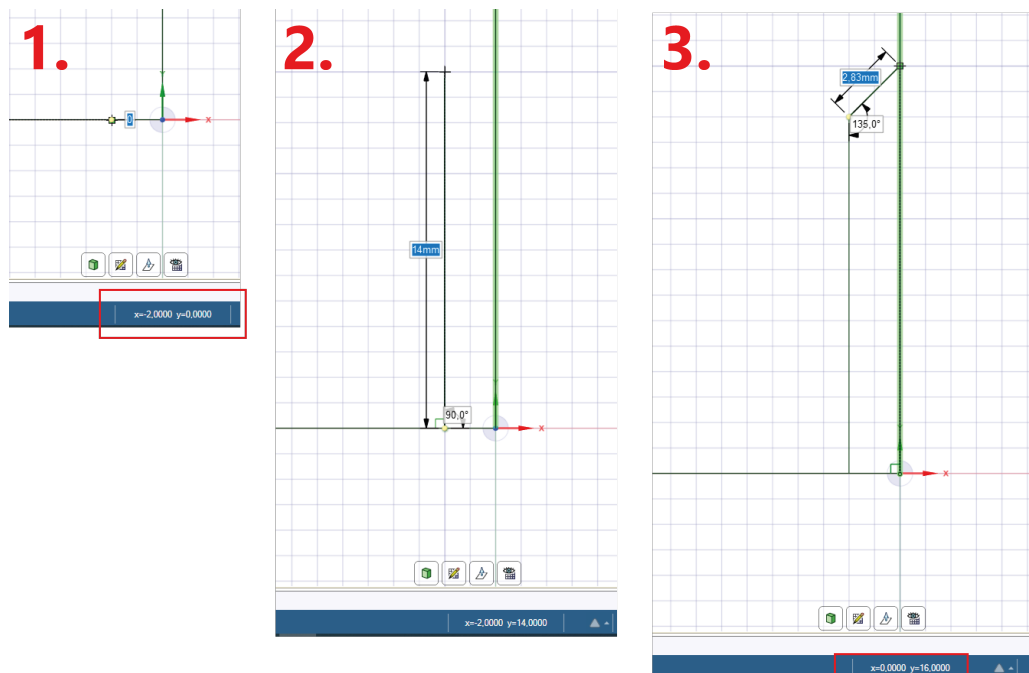
1. Przed rozpoczęciem pracy w szkicowniku zaznaczamy w opcjach przyciąganie do siatki: *Snap to grid* - Rysunek 2: **1**. Następnie rysujemy prostokąt o wymiarach 100×50 mm w płaszczyźnie XY .



Rysunek 2: Przygotowanie geometrii - główny kontur.

2. Szkic wycięcia na prawym brzegu - Rysunek 3:

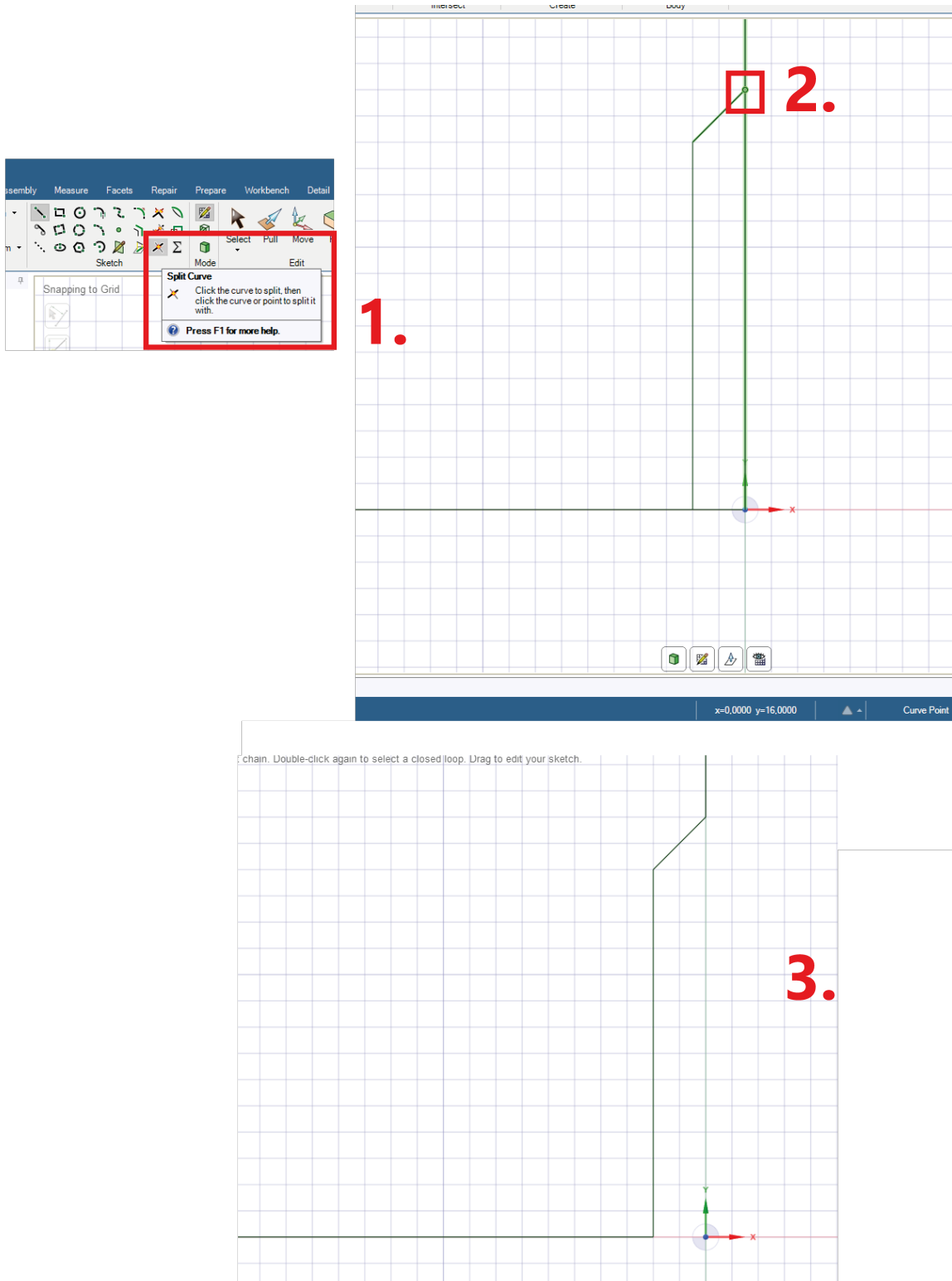
- Rysowanie pionowej linii zaczynamy w punkcie o współrzędnych $(-2, 0)$: **1**.
- Długość linii to 14 mm: **2**.
- Kolejną linią „wracamy” do punktu $(16, 0)$: **3**.



Rysunek 3: Przygotowanie geometrii - szkic wycięcia.

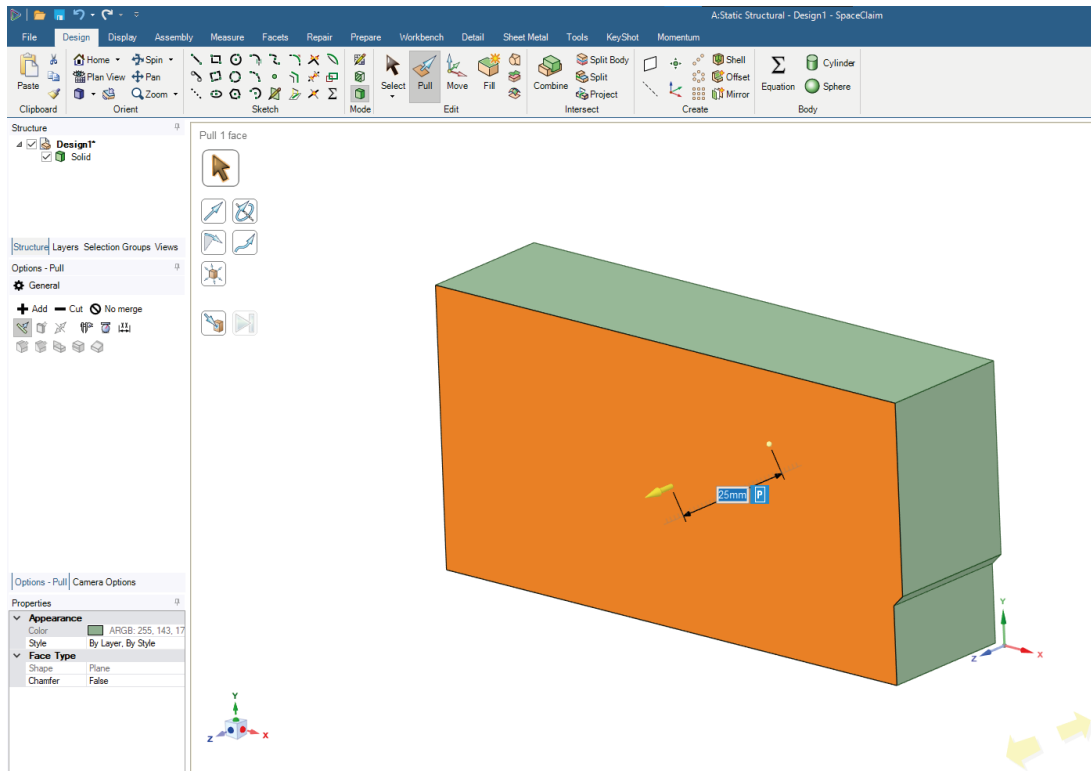
3. Usunięcie nadmiarowych linii - Rysunek 4:

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



Rysunek 4: Przygotowanie geometrii - usunięcie linii.

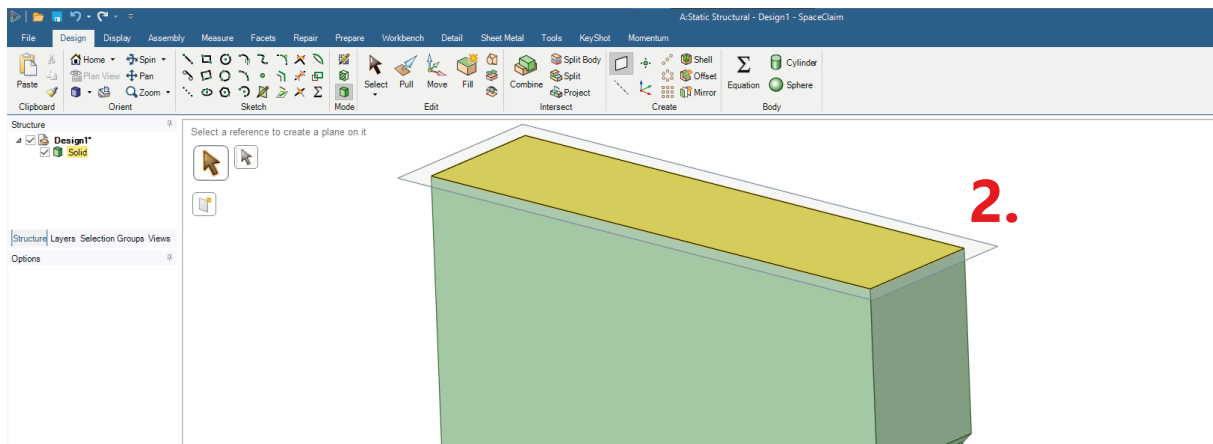
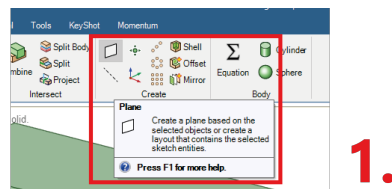
4. Wyciągnięcie szkicu o 25 mm - Rysunek 5:



Rysunek 5: Przygotowanie geometrii - wyciągnięcie szkicu.

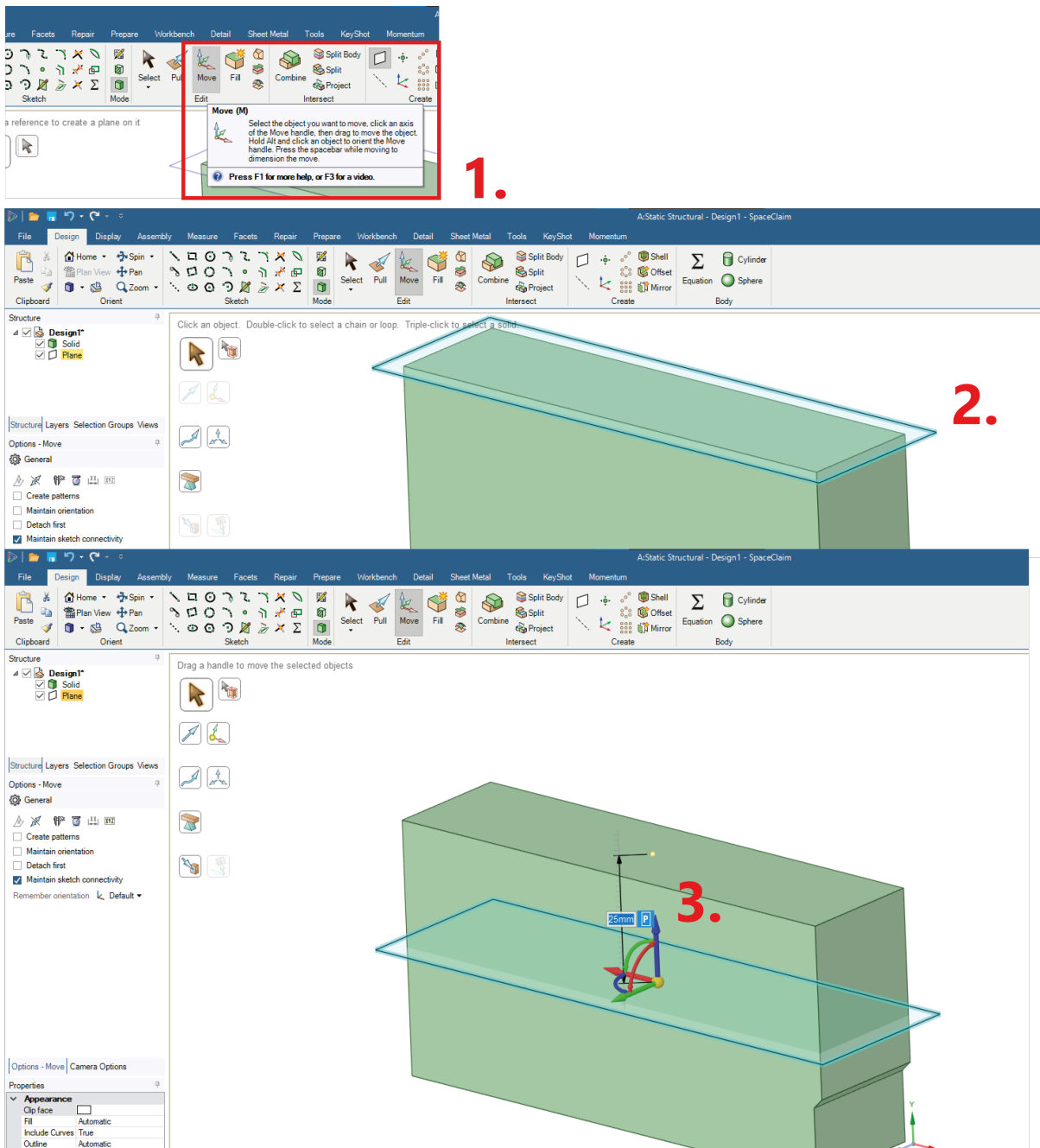
5. Przygotowanie szczeliny:

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



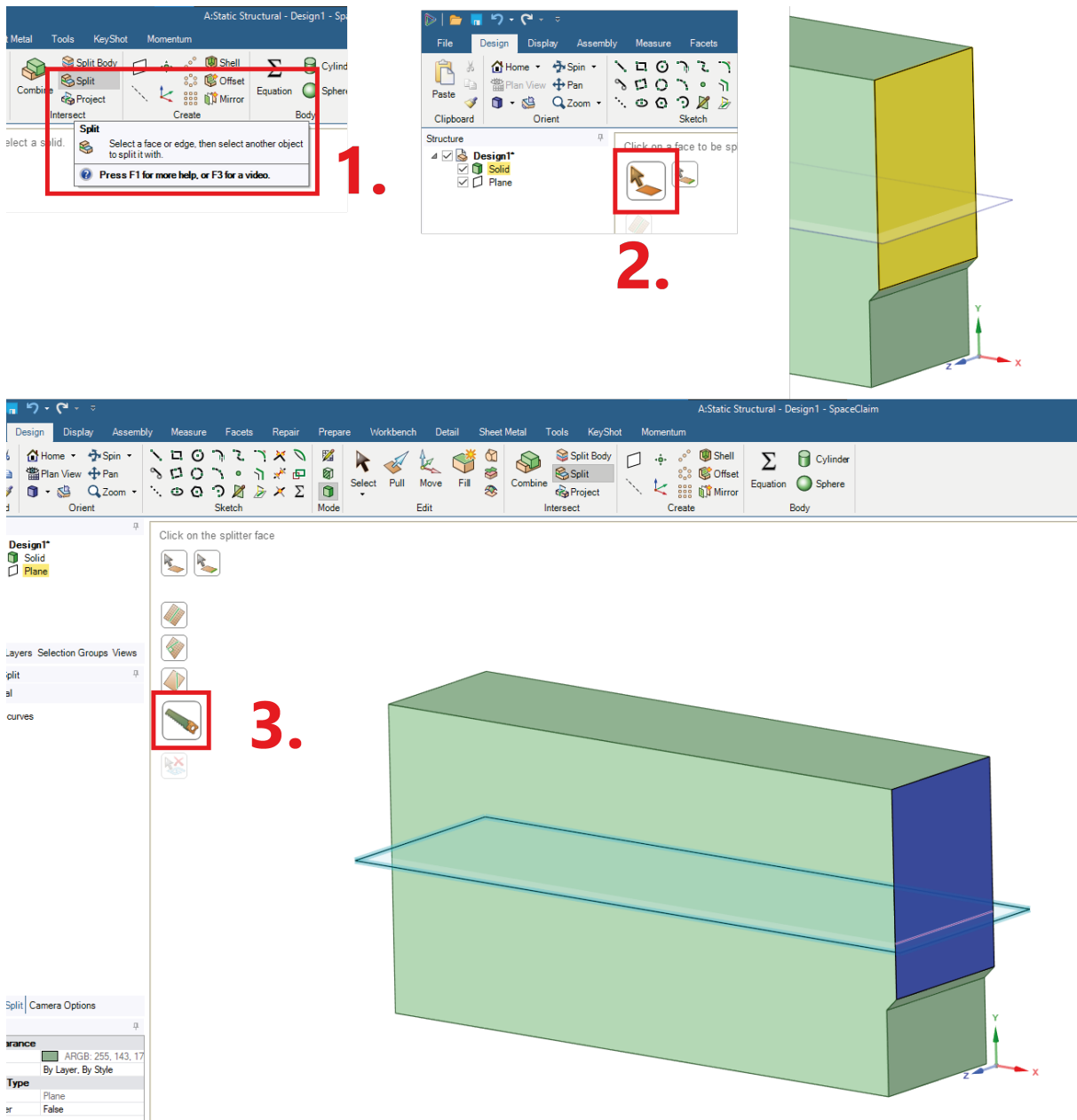
Rysunek 6: Przygotowanie geometrii - dodanie płaszczyzny.

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



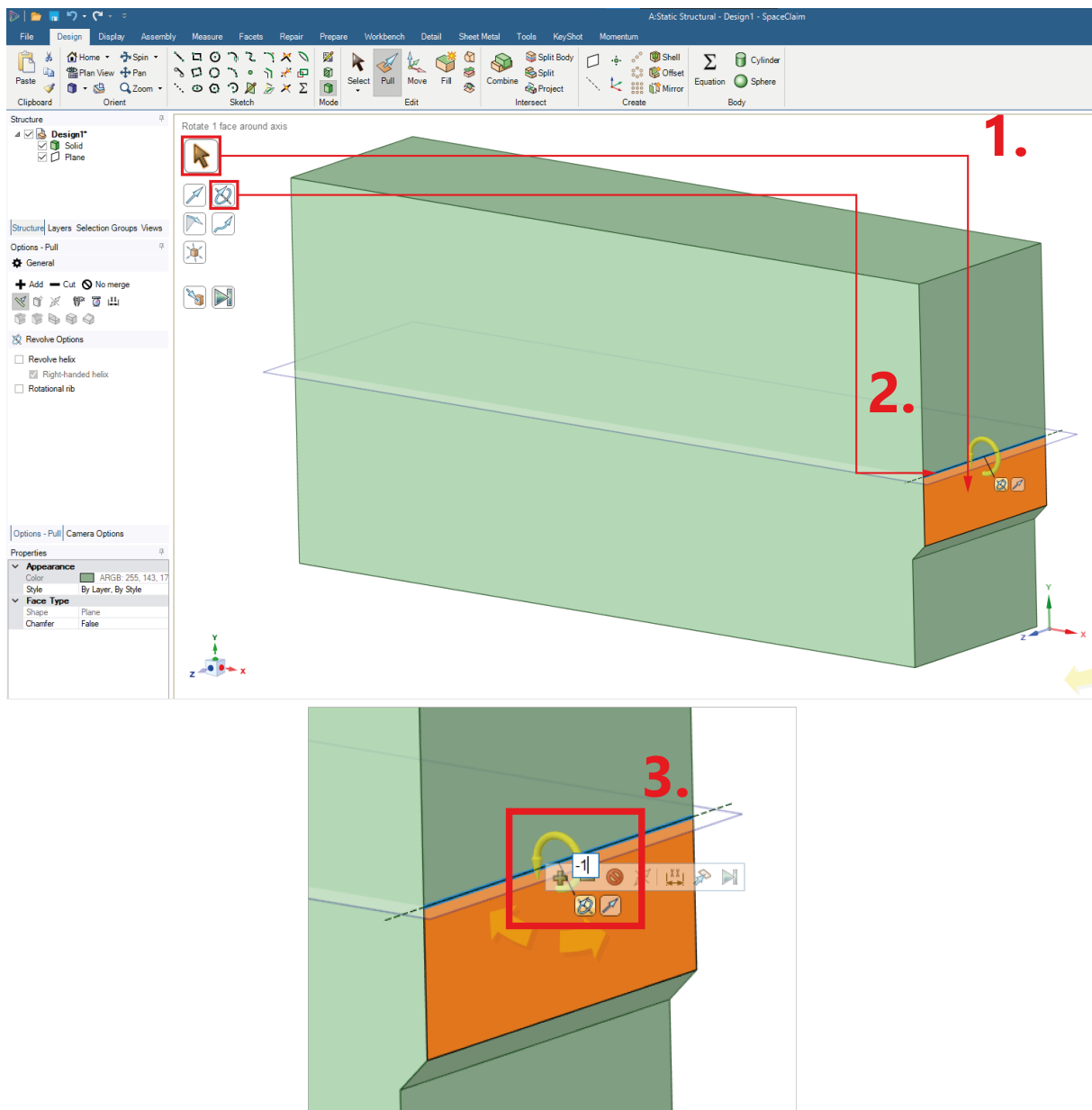
Rysunek 7: Przygotowanie geometrii - przesunięcie płaszczyzny.

- 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.

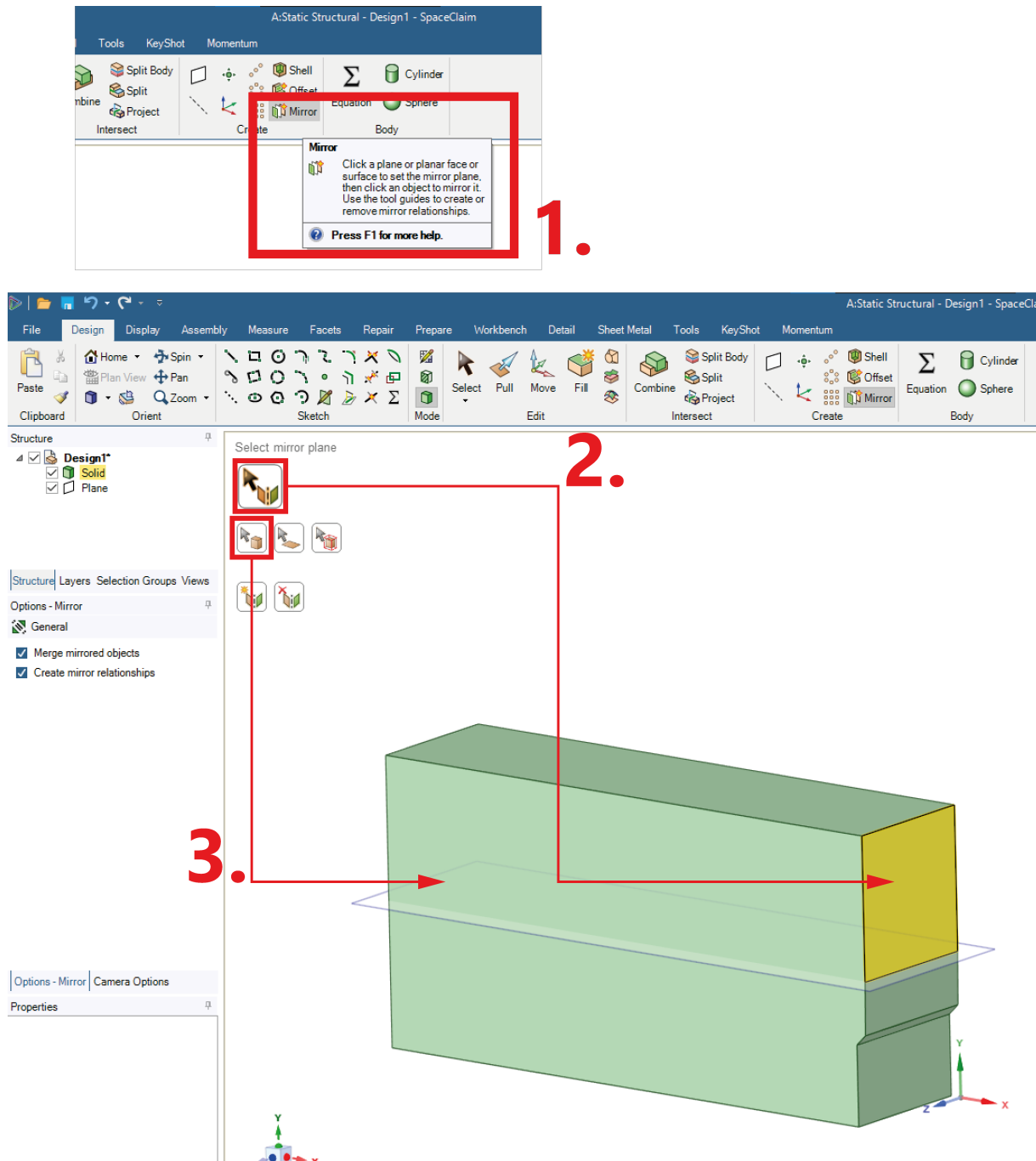
- Przygotowanie szczeliny - obrót powierzchni - Rysunek 9.
 - 1: zaznaczenie w opcji *Pull* dolnej powierzchni.
 - 2: ośią obrotu jest krawędź między dwoma powierzchniami.
 - 3: obrót powierzchni o -1° (w kierunku do materiału).



Rysunek 9: Przygotowanie geometrii - przygotowanie szczeliny.

6. Symetryczne odbicie modelu - Rysunek 10.

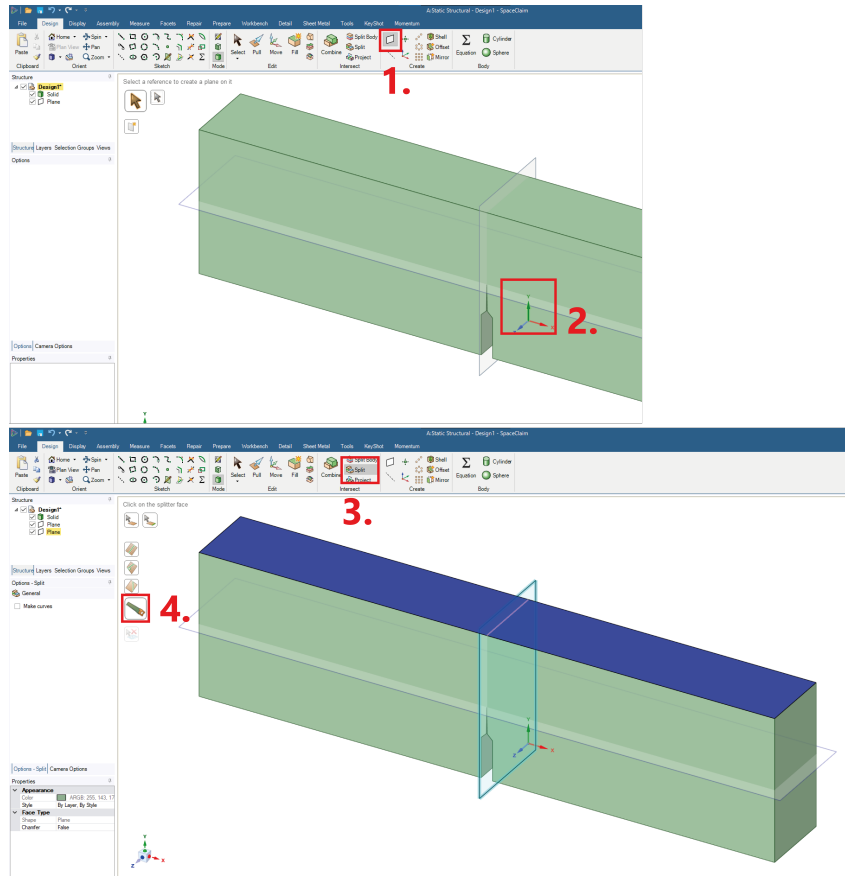
- **1:** wybranie opcji *Mirror*.
- **2:** jako płaszczyznę symetrii zaznaczamy wskazaną powierzchnię.
- **3:** zaznaczamy objętość do symetrycznego odbicia.



Rysunek 10: Przygotowanie geometrii - symetryczne odbicie modelu.

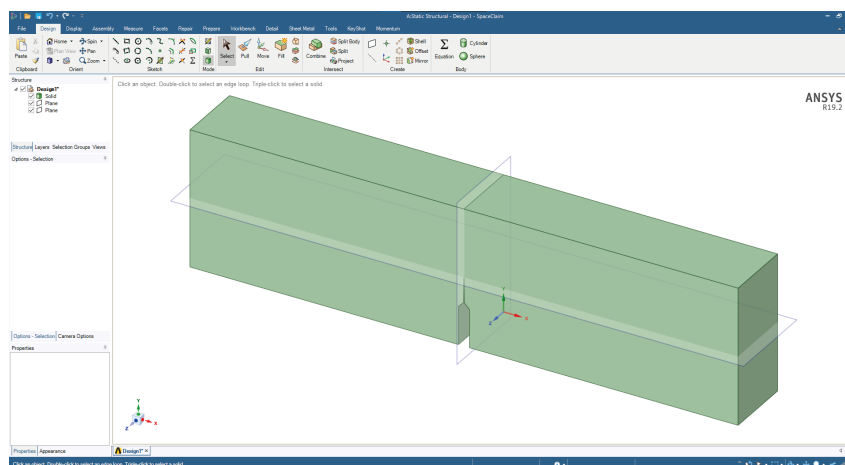
7. Przygotowanie linii do wprowadzenia obciążenia - Rysunek 11.

- **1:** opcja dodania płaszczyzny.
- **2:** jako odniesienie dla płaszczyzny 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.



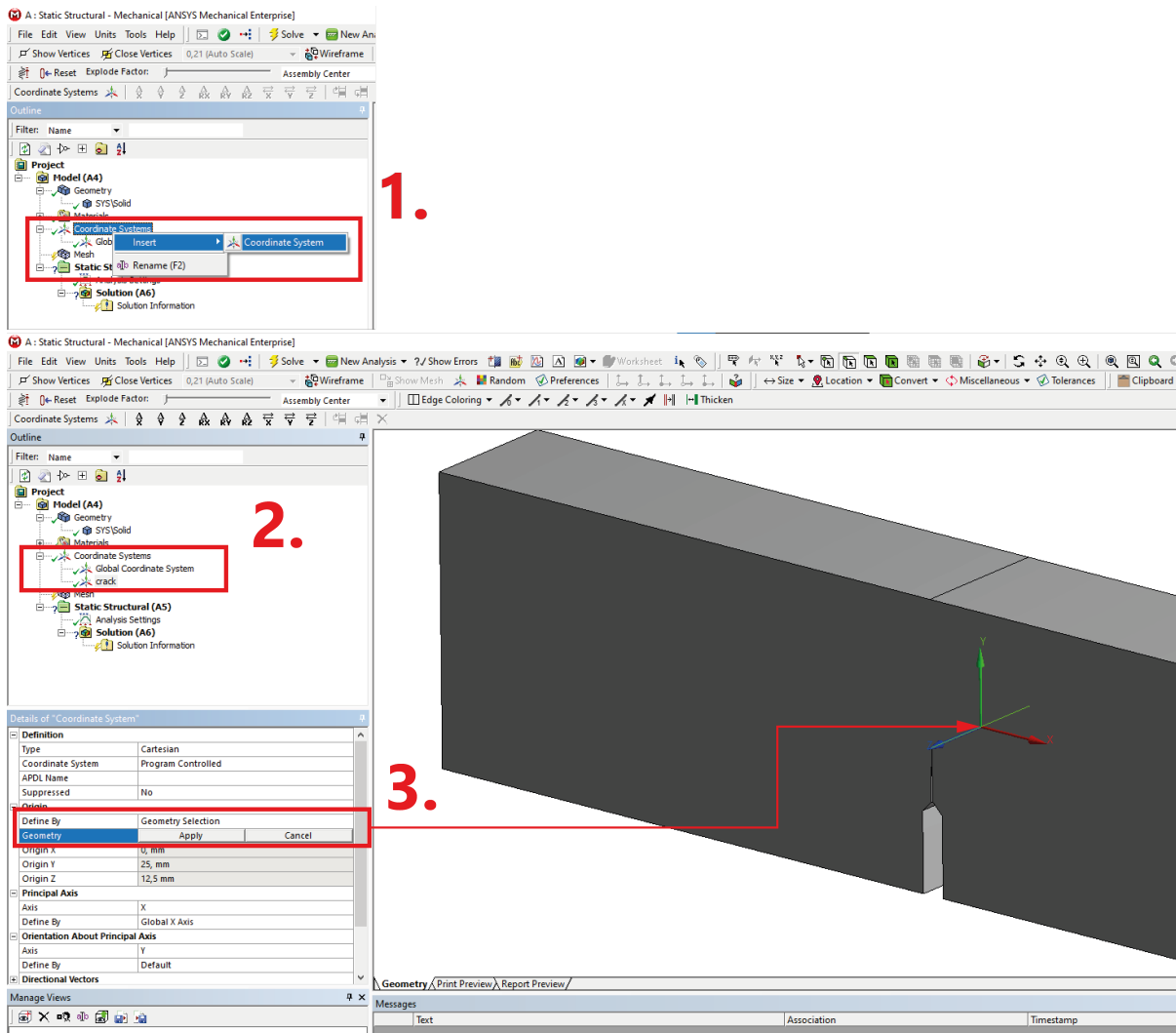
Rysunek 12: Gotowa geometria.

3 Przygotowanie modelu numerycznego

3.1 Układ współrzędnych szczeliny

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

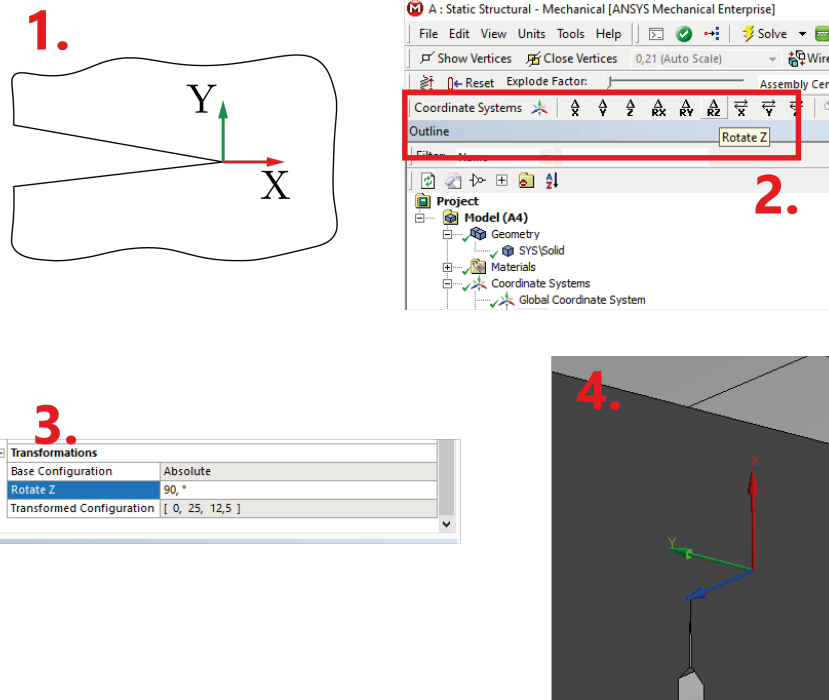
- **1:** dodanie układu współrzędnych.
- **2:** dla lepszej orientacji można zmienić nazwę układu.
- **3:** wprowadzenie układu na krawędzi będącej frontem szczeliny.



Rysunek 13: Dodanie układu współrzędnych.

2. Obrót układu - Rysunek 14.

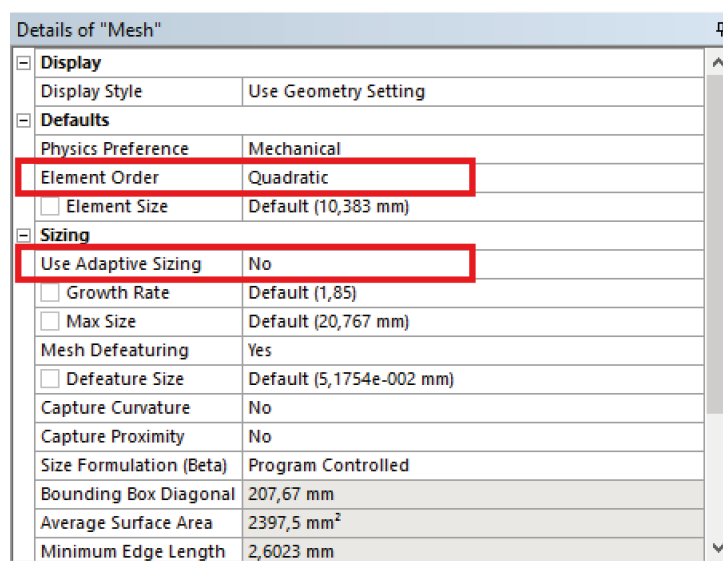
- **1:** teoretyczny schemat orientacji układu.
- **2:** mając zaznaczony układ współrzędnych w górnej części menu znajdują się opcje modyfikacji jego orientacji, w naszym przypadku będzie to obrót wokół osi Z.
- **3:** zadanie obrotu układu o 90° .
- **4:** obrócony układ.



Rysunek 14: Obrót układu współrzędnych.

3.2 Parametry siatki

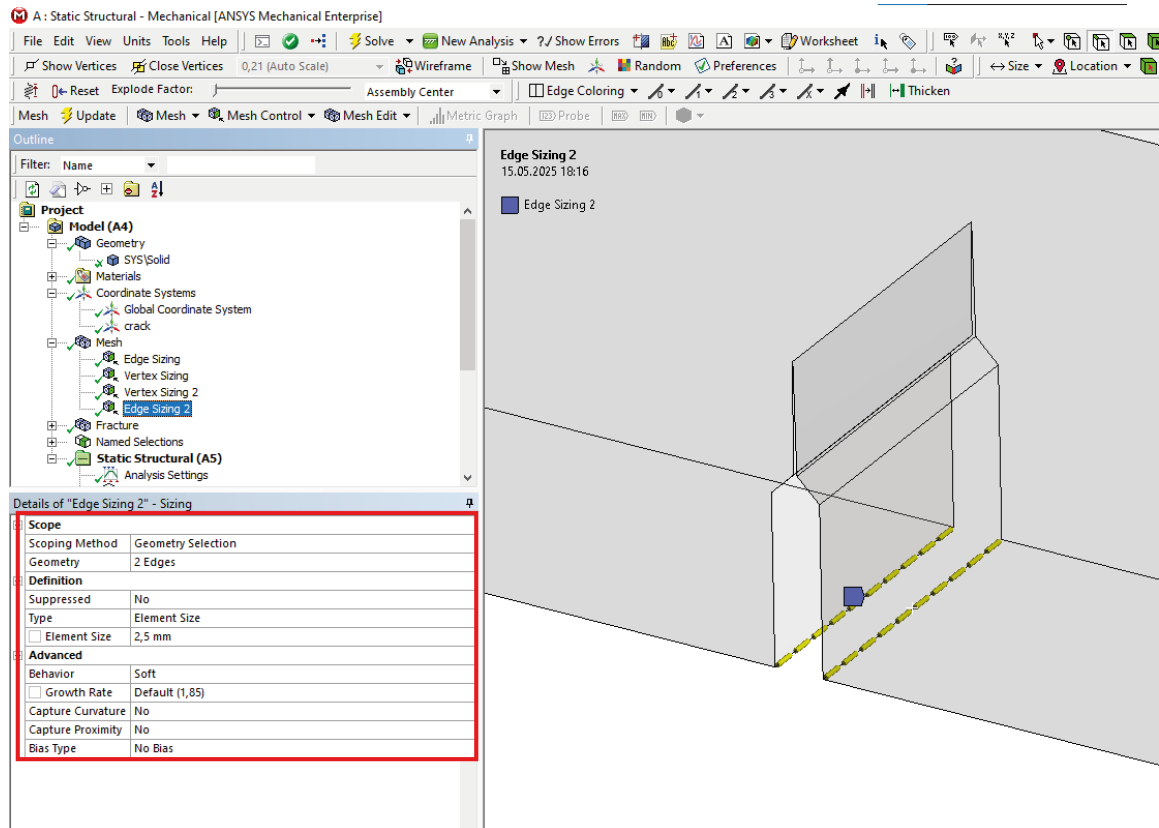
1. Ogólne ustawienia Mesh.



Rysunek 15: Parametry globalne siatki.

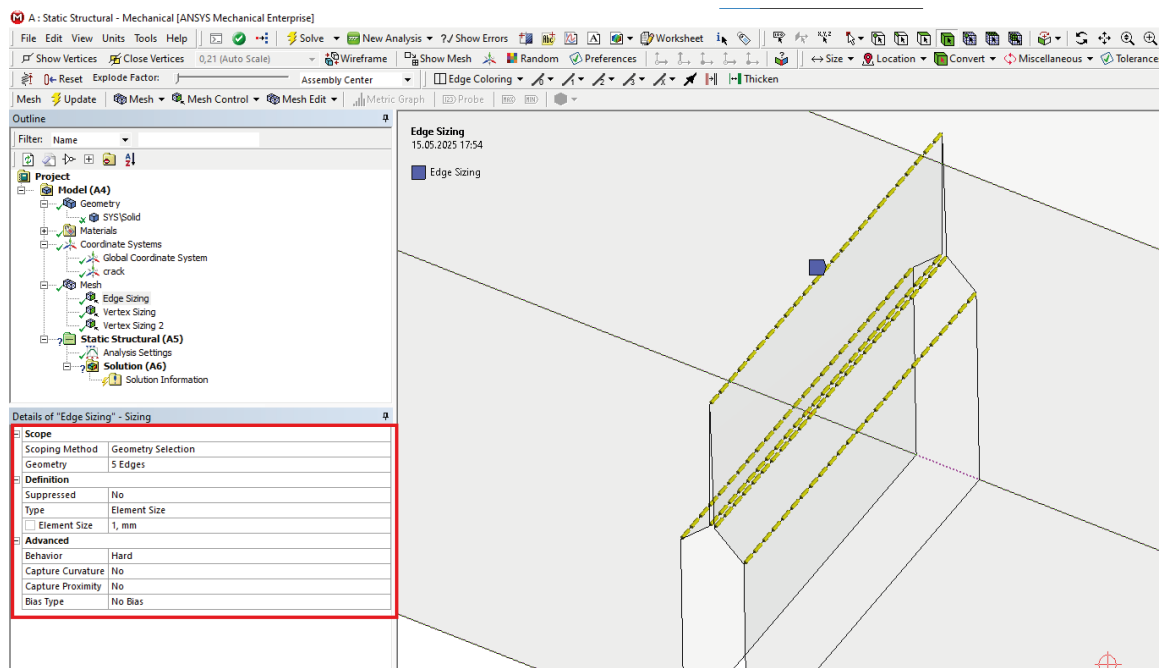
2. Szczegółowy podział

- Podział na dwóch dolnych krawędziach szczeliny - Rysunek 16.



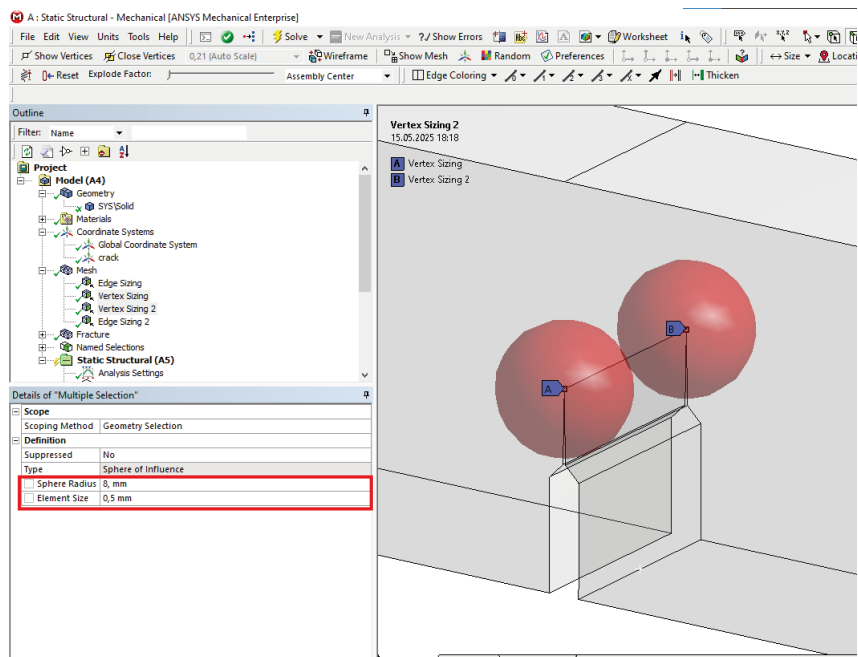
Rysunek 16: Podział na dolnych krawędziach.

- Podział na krawędziach wewnątrz szczeliny - Rysunek 17.



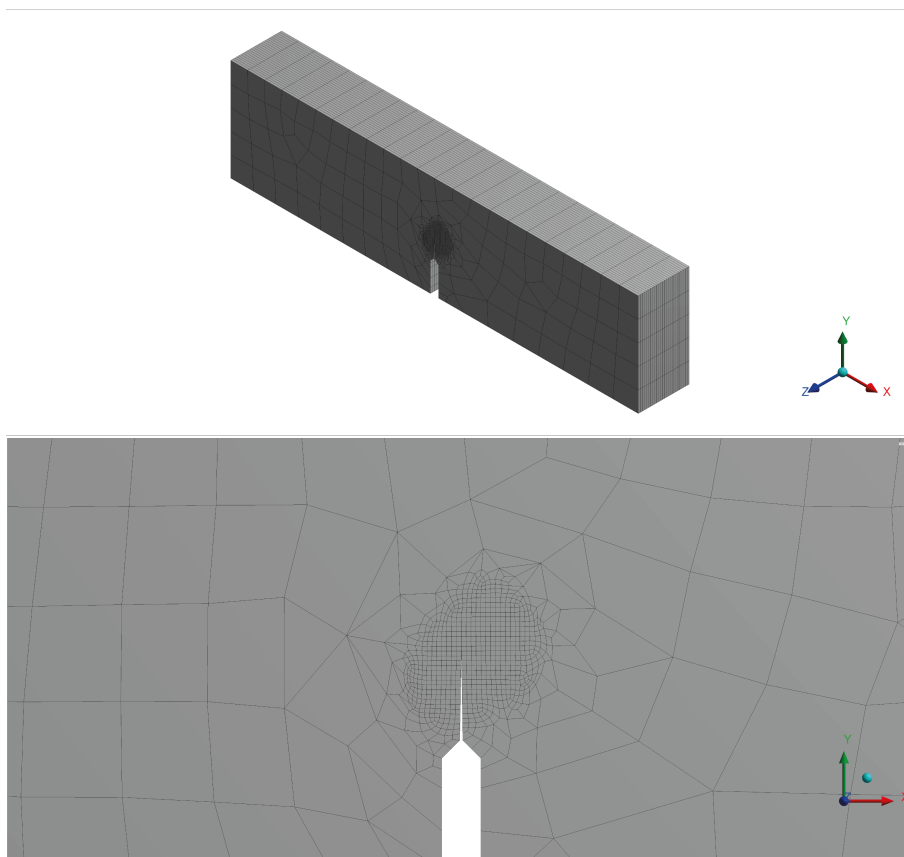
Rysunek 17: Podział wewnątrz szczeliny.

- Podział na dwóch wierzchołkach - Rysunek 18.



Rysunek 18: Podział na wierzchołkach.

- Gotowa siatka elementów wraz z widokiem na okolicę szczeliny.

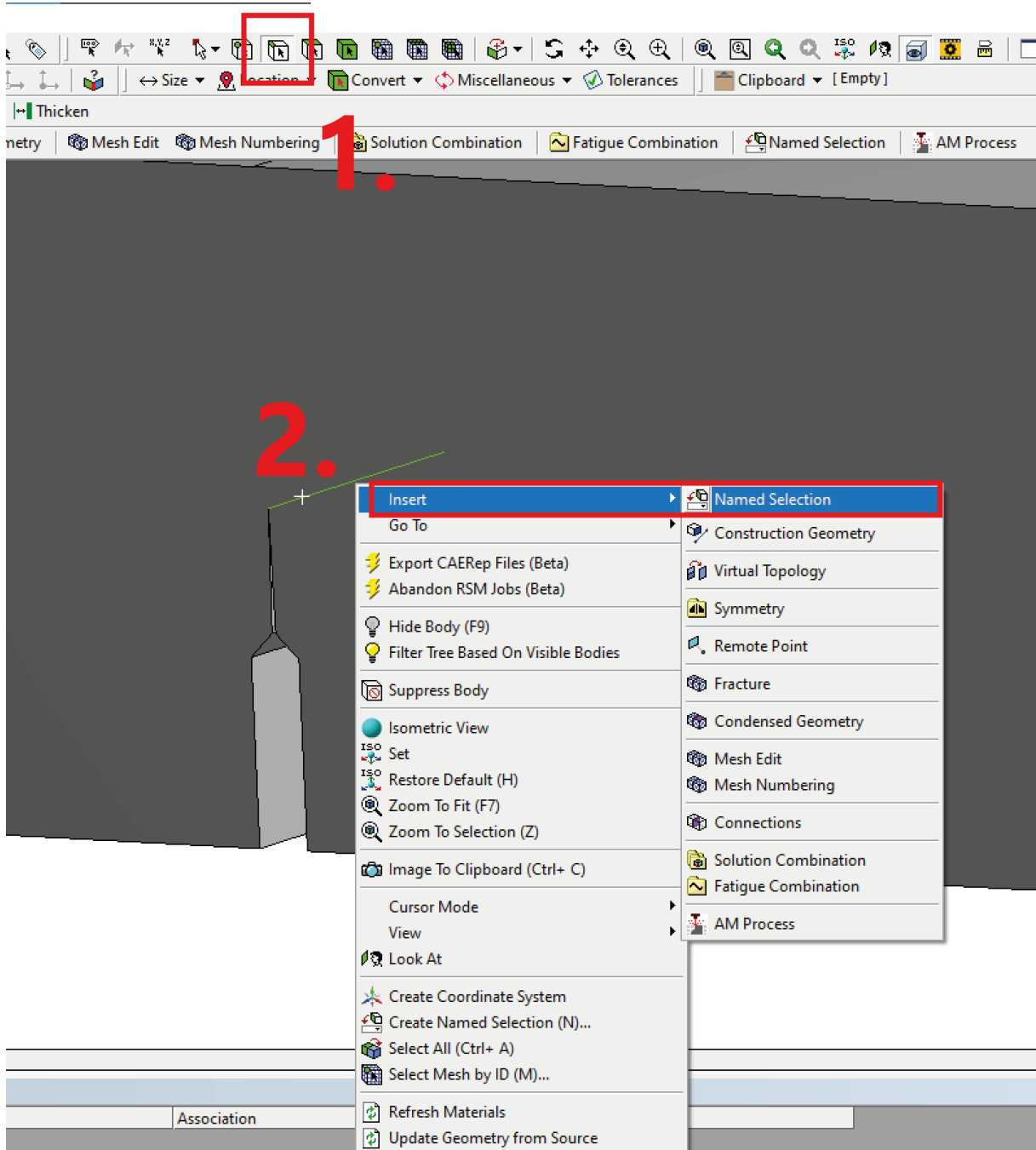


Rysunek 19: Siatka elementów.

3.3 Parametry frontu szczeliny.

1. Zaznaczenie geometrii związanej z frontem szczeliny - Rysunek 20

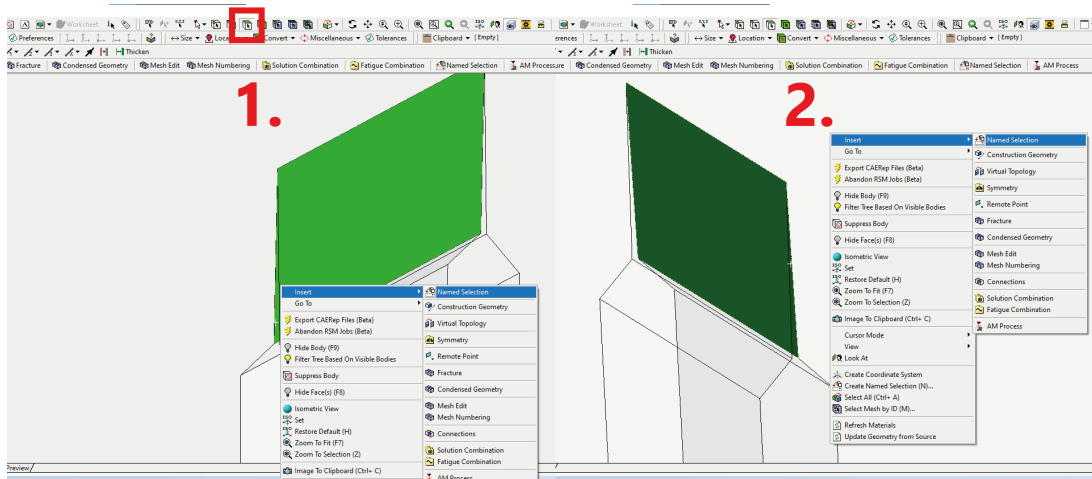
- 1: wybór linii.
- 2: PPM na zaznaczoną linię, *Insert* → *Named Selection*.



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.

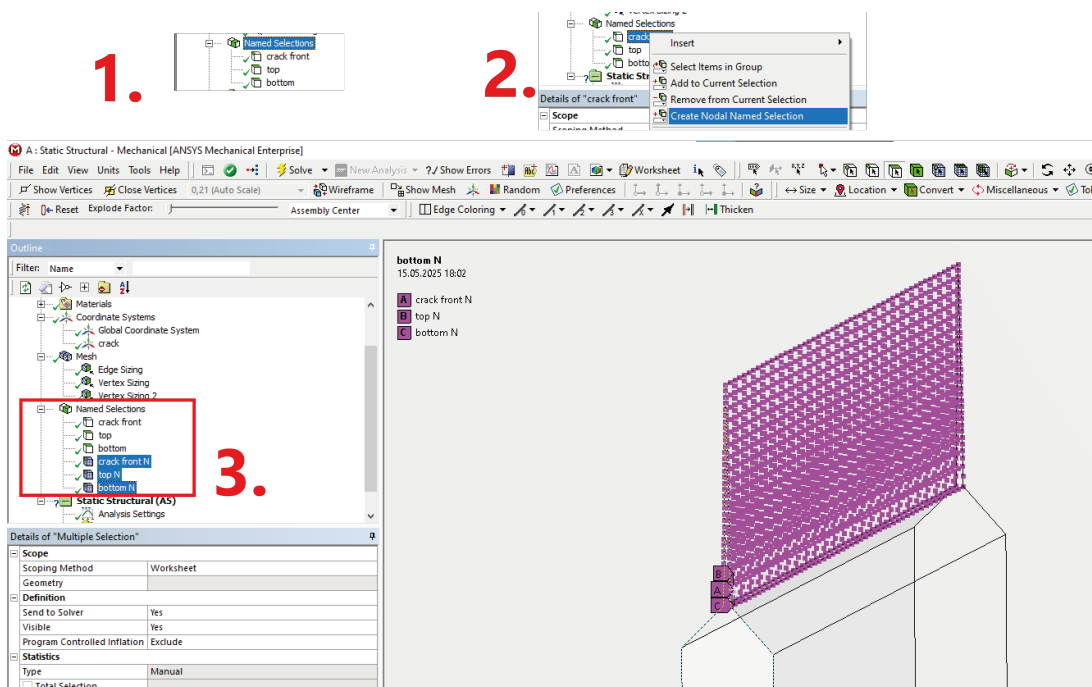
- 1: wybór górnej powierzchni.
- 2: wybór dolnej powierzchni.



Rysunek 21: Przypisanie powierzchni szczeliny.

3. Wybranie węzłów związanych z zaznaczoną geometrią - Rysunek 22.

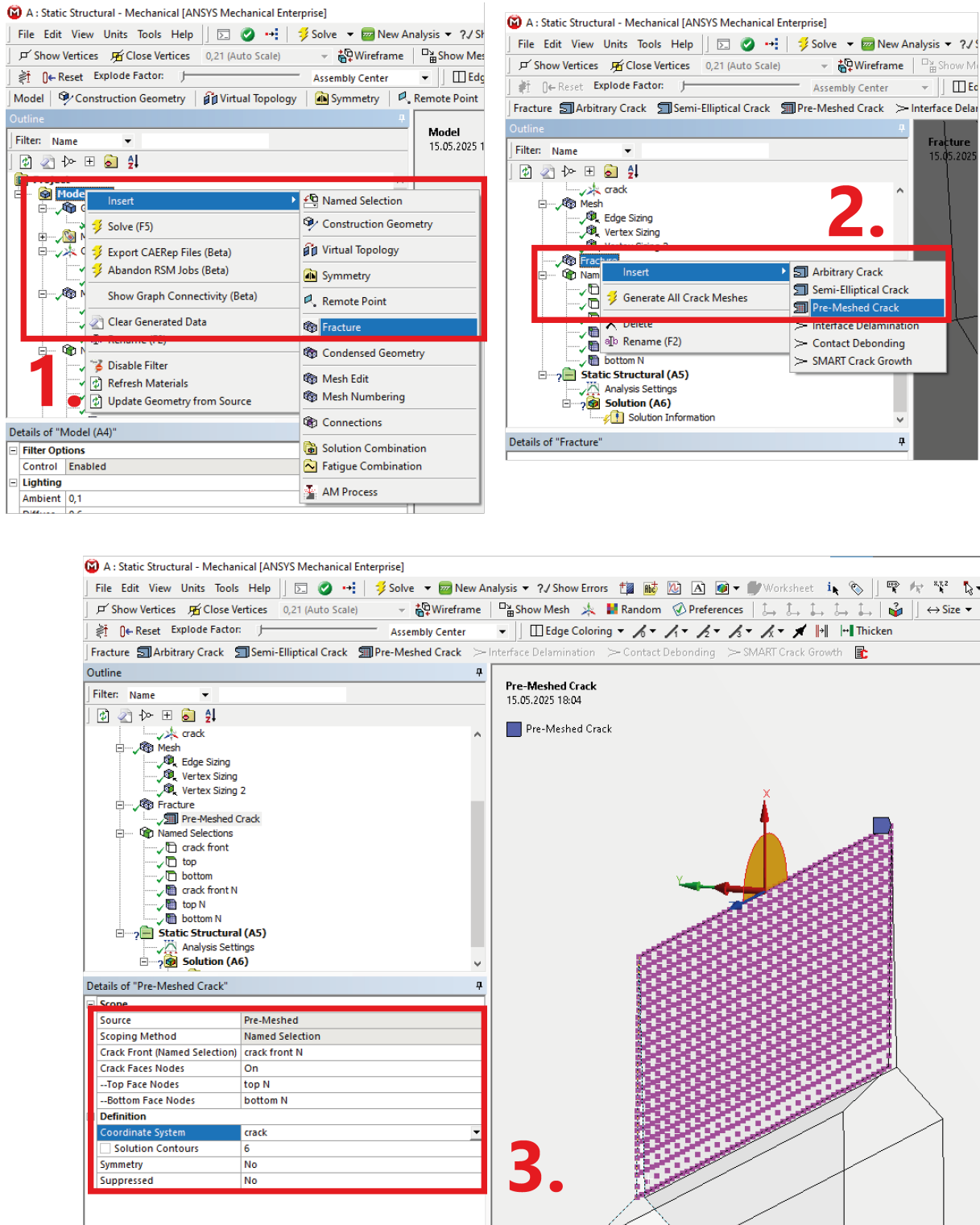
- 1: elementy wybrane w poprzednich krokach (zmienione nazwy dla ułatwienia kolejnych kroków).
- 2: z każdego z elementów należy utworzyć grupę węzłów: PPM → *Create Nodal Named Selection*. **Uwaga:** dzięki przygotowaniu zaznaczenia węzłów w ten sposób przy zmianie siatki grupy zaktualizują się automatycznie.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



Rysunek 22: Zaznaczenie węzłów związanych ze szczeliną.

4. Dodanie modułu *Fracture* - Rysunek 23.

- **1:** PPM na *Model* → *Insert* → *Fracture*.
- **2:** PPM na *Fracture* → *Insert* → *Pre-Meshed Crack*.
- **3:** Wypełnienie odpowiednich opcji grupami elementów oraz układem współrzędnych związanym z frontem szczeliny.

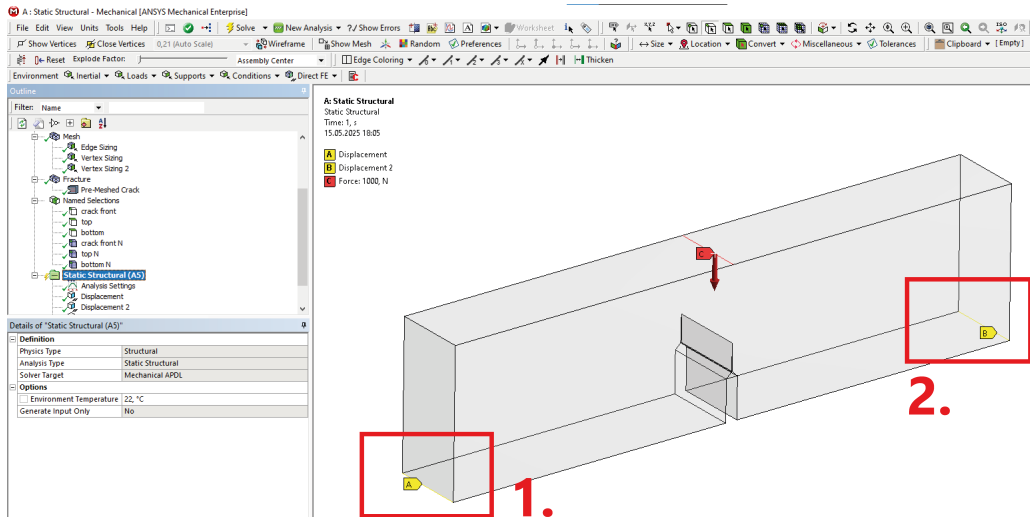


Rysunek 23: Siatka elementów.

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.

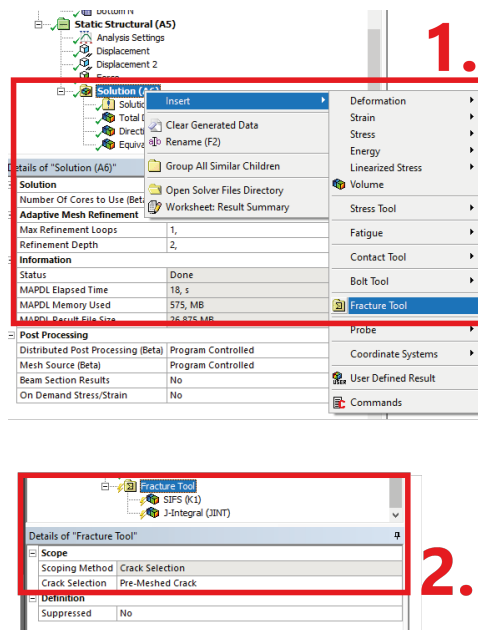


Rysunek 24: Warunki brzegowe.

3.5 Prezentacja wyników

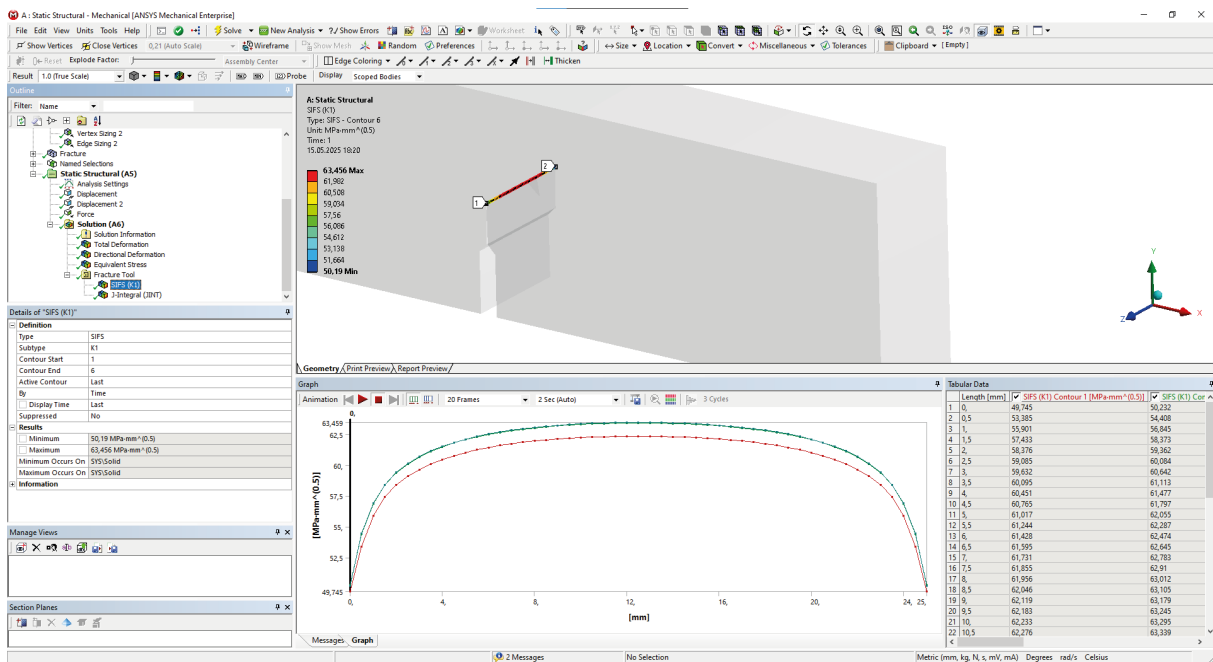
1. Dodanie modułu z wynikami związanymi z pękaniem - Rysunek 25.

- **1:** PPM na *Solution* → *Insert* → *Fracture Tool*.
- **2:** Zaznaczenie przygotowanego pęknięcia oraz dodanie do wyników współczynnika K_1 oraz całki J .



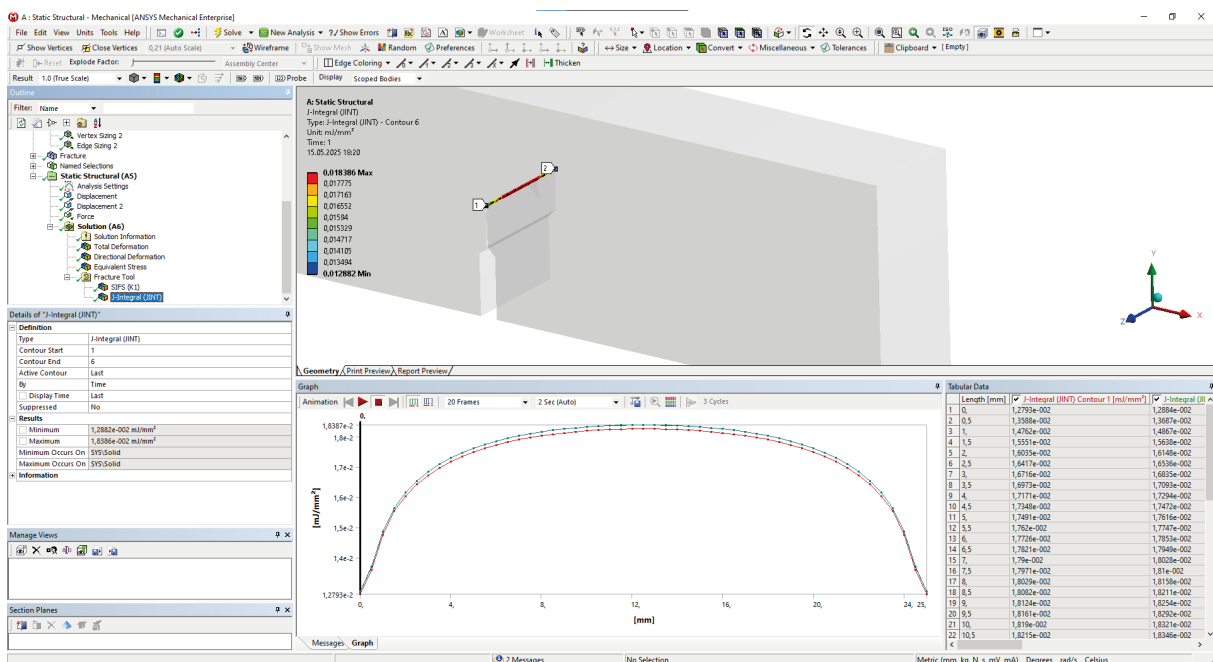
Rysunek 25: Narzędzie *Fracture Tool*.

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.