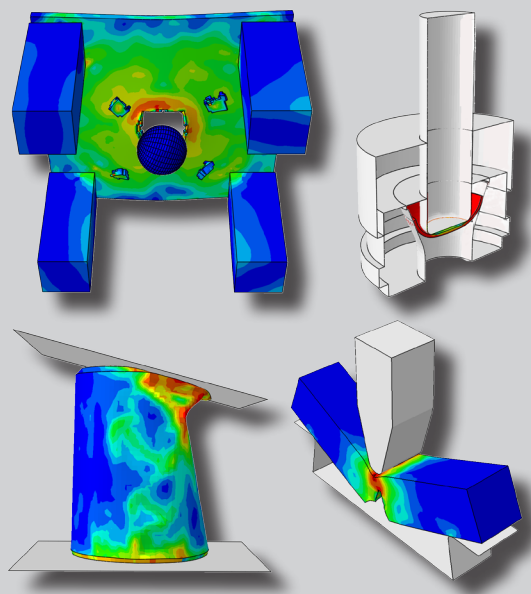




*Patryk Różyło*

# Metoda elementów skończonych

Praktyczne przykłady zagadnień statycznych i dynamicznych w programie Abaqus  
Część 2



# Metoda elementów skończonych

## Praktyczne przykłady zagadnień statycznych i dynamicznych w programie Abaqus

### Część 2

# Podręczniki – Politechnika Lubelska



Politechnika Lubelska  
Wydział Mechaniczny  
ul. Nadbystrzycka 36  
20-618 LUBLIN

Patryk Różyło

# Metoda elementów skończonych

## Praktyczne przykłady zagadnień statycznych i dynamicznych w programie Abaqus

### Część 2



Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej  
Lublin 2020

Recenzent:

dr hab. inż. Hubert Dębski, prof. Politechniki Lubelskiej

Publikacja wydana za zgodą Rektora Politechniki Lubelskiej

© Copyright by Politechnika Lubelska 2020

ISBN: 978-83-7947-397-7

Wydawca: Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej  
[www.biblioteka.pollub.pl/wydawnictwa](http://www.biblioteka.pollub.pl/wydawnictwa)  
ul. Nadbystrzycka 36C, 20-618 Lublin  
tel. (81) 538-46-59

Druk: TOP Agencja Reklamowa Agnieszka Łuczak  
[www.agencjatop.pl](http://www.agencjatop.pl)

---

Elektroniczna wersja książki dostępna w Bibliotece Cyfrowej PL [www.bc.pollub.pl](http://www.bc.pollub.pl)

Nakład: 50 egz.

# SPIS TREŚCI

1. PROSTY PROCES PRZEBICIA MATERIAŁU .....	9
1.1 Wprowadzenie .....	9
1.2 Budowa modelu geometrycznego – <i>moduł Part</i> .....	9
1.3 Definicja właściwości materiałowych – <i>moduł Property</i> .....	12
1.4 Tworzenie instancji części – <i>moduł Assembly</i> .....	16
1.5 Definicja analizy numerycznej – <i>moduł Step</i> .....	20
1.6 Interakcje modelu numerycznego – <i>moduł Interaction</i> .....	21
1.7 Definicja warunków brzegowych – <i>moduł Load</i> .....	23
1.8 Budowa siatki elementów skończonych – <i>moduł Mesh</i> .....	25
1.9 Wykonanie obliczeń numerycznych – <i>moduł Job</i> .....	27
1.10 Wyniki obliczeń numerycznych – <i>moduł Visualization</i> .....	27
2. ZŁOŻONY PROCES PRZEBICIA MATERIAŁU .....	30
2.1 Wprowadzenie .....	30
2.2 Budowa modelu geometrycznego – <i>moduł Part</i> .....	30
2.3 Definicja właściwości materiałowych – <i>moduł Property</i> .....	35
2.4 Tworzenie instancji części – <i>moduł Assembly</i> .....	39
2.5 Definicja analizy numerycznej – <i>moduł Step</i> .....	45
2.6 Budowa siatki elementów skończonych – <i>moduł Mesh</i> .....	46
2.7 Interakcje modelu numerycznego – <i>moduł Interaction</i> .....	56
2.8 Definicja warunków brzegowych – <i>moduł Load</i> .....	58
2.9 Wykonanie obliczeń numerycznych – <i>moduł Job</i> .....	60
2.10 Wyniki obliczeń numerycznych – <i>moduł Visualization</i> .....	61
3. SYMULACJA GRY W GOLFA .....	63
3.1 Wprowadzenie .....	63
3.2 Budowa modelu geometrycznego – <i>moduł Part</i> .....	63
3.3 Definicja właściwości materiałowych – <i>moduł Property</i> .....	70
3.4 Tworzenie instancji części – <i>moduł Assembly</i> .....	71
3.5 Definicja analizy numerycznej – <i>moduł Step</i> .....	75
3.6 Interakcje modelu numerycznego – <i>moduł Interaction</i> .....	76

3.7 Budowa siatki elementów skończonych – <i>moduł Mesh</i> .....	76
3.8 Definicja warunków brzegowych – <i>moduł Load</i> .....	80
3.9 Wykonanie obliczeń numerycznych – <i>moduł Job</i> .....	82
3.10 Wyniki obliczeń numerycznych – <i>moduł Visualization</i> .....	82
4. SYMULACJA GRY W KRĘGLE .....	84
4.1 Wprowadzenie.....	84
4.2 Budowa modelu geometrycznego – <i>moduł Part</i> .....	84
4.3 Definicja właściwości materiałowych – <i>moduł Property</i> .....	92
4.4 Tworzenie instancji części – <i>moduł Assembly</i> .....	93
4.5 Definicja analizy numerycznej – <i>moduł Step</i> .....	96
4.6 Interakcje modelu numerycznego – <i>moduł Interaction</i> .....	96
4.7 Budowa siatki elementów skończonych – <i>moduł Mesh</i> .....	97
4.8 Definicja warunków brzegowych – <i>moduł Load</i> .....	102
4.9 Wykonanie obliczeń numerycznych – <i>moduł Job</i> .....	103
4.10 Wyniki obliczeń numerycznych – <i>moduł Visualization</i> .....	104
5. BADANIE PROCESU ZGNIOTU.....	106
5.1 Wprowadzenie.....	106
5.2 Budowa modelu geometrycznego – <i>moduł Part</i> .....	106
5.3 Definicja właściwości materiałowych – <i>moduł Property</i> .....	109
5.4 Tworzenie instancji części – <i>moduł Assembly</i> .....	111
5.5 Definicja analizy numerycznej – <i>moduł Step</i> .....	114
5.6 Interakcje modelu numerycznego – <i>moduł Interaction</i> .....	115
5.7 Definicja warunków brzegowych – <i>moduł Load</i> .....	116
5.8 Budowa siatki elementów skończonych – <i>moduł Mesh</i> .....	118
5.9 Wykonanie obliczeń numerycznych – <i>moduł Job</i> .....	120
5.10 Wyniki obliczeń numerycznych – <i>moduł Visualization</i> .....	120
5.11 Pierwsza modyfikacja złożenia – <i>moduł Assembly</i> .....	126
5.12 Wykonanie obliczeń numerycznych – <i>moduł Job</i> .....	128
5.13 Wyniki obliczeń numerycznych – <i>moduł Visualization</i> .....	128
5.14 Druga modyfikacja złożenia – <i>moduł Assembly</i> .....	131
5.15 Wykonanie obliczeń numerycznych – <i>moduł Job</i> .....	133
5.16 Wyniki obliczeń numerycznych – <i>moduł Visualization</i> .....	134

6. BADANIE UDARNOŚCI – ZAGADNIENIE DODATKOWE .....	137
6.1 Wprowadzenie .....	137
6.2 Budowa modelu geometrycznego – <i>moduł Part</i> .....	137
6.3 Definicja właściwości materiałowych – <i>moduł Property</i> .....	141
6.4 Tworzenie instancji części – <i>moduł Assembly</i> .....	142
6.5 Definicja analizy numerycznej – <i>moduł Step</i> .....	143
6.6 Interakcje modelu numerycznego – <i>moduł Interaction</i> .....	143
6.7 Definicja warunków brzegowych – <i>moduł Load</i> .....	143
6.8 Budowa siatki elementów skończonych – <i>moduł Mesh</i> .....	146
6.9 Wykonanie obliczeń numerycznych – <i>moduł Job</i> .....	148
7. BADANIE PROCESU TŁOCZENIA .....	151
7.1 Wprowadzenie .....	151
7.2 Budowa modelu geometrycznego – <i>moduł Part</i> .....	151
7.3 Definicja właściwości materiałowych – <i>moduł Property</i> .....	163
7.4 Tworzenie instancji części – <i>moduł Assembly</i> .....	165
7.5 Definicja analizy numerycznej – <i>moduł Step</i> .....	170
7.6 Interakcje modelu numerycznego – <i>moduł Interaction</i> .....	172
7.7 Definicja warunków brzegowych – <i>moduł Load</i> .....	174
7.8 Budowa siatki elementów skończonych – <i>moduł Mesh</i> .....	176
7.9 Wykonanie obliczeń numerycznych – <i>moduł Job</i> .....	181
7.10 Wyniki obliczeń numerycznych – <i>moduł Visualization</i> .....	182
7.11 Modyfikacja modelu – <i>moduł Part i Assembly</i> .....	188
7.12 Modyfikacja siatki MES – <i>moduł Mesh</i> .....	189
7.13 Wykonanie obliczeń numerycznych – <i>moduł Job</i> .....	190
7.14 Wyniki obliczeń numerycznych – <i>moduł Visualization</i> .....	190
7.15 Modyfikacja modelu – <i>moduł Part i Assembly</i> .....	193
7.16 Modyfikacja siatki MES – <i>moduł Mesh</i> .....	195
7.17 Wykonanie obliczeń numerycznych – <i>moduł Job</i> .....	195
7.18 Wyniki obliczeń numerycznych – <i>moduł Visualization</i> .....	196
8. BADANIE PROCESU WYKRAWANIA .....	199
8.1 Wprowadzenie .....	199
8.2 Budowa modelu geometrycznego – <i>moduł Part</i> .....	199



8.3 Definicja właściwości materiałowych – <i>moduł Property</i> .....	208
8.4 Tworzenie instancji części – <i>moduł Assembly</i> .....	210
8.5 Definicja analizy numerycznej – <i>moduł Step</i> .....	216
8.6 Interakcje modelu numerycznego – <i>moduł Interaction</i> .....	218
8.7 Definicja warunków brzegowych – <i>moduł Load</i> .....	220
8.8 Budowa siatki elementów skończonych – <i>moduł Mesh</i> .....	223
8.9 Wykonanie obliczeń numerycznych – <i>moduł Job</i> .....	229
8.10 Wyniki obliczeń numerycznych – <i>moduł Visualization</i> .....	229
<b>9. BADANIE CZTEROPUNKTOWEGO ZGINANIA KONSTRUKCJI</b> – ZAGADNIENIE DODATKOWE .....	235
9.1 Wprowadzenie .....	235
9.2 Budowa modelu geometrycznego – <i>moduł Part</i> .....	235
9.3 Definicja właściwości materiałowych – <i>moduł Property</i> .....	237
9.4 Tworzenie instancji części – <i>moduł Assembly</i> .....	239
9.5 Definicja analizy numerycznej – <i>moduł Step</i> .....	240
9.6 Interakcje modelu numerycznego – <i>moduł Interaction</i> .....	240
9.7 Definicja warunków brzegowych – <i>moduł Load</i> .....	243
9.8 Budowa siatki elementów skończonych – <i>moduł Mesh</i> .....	246
9.9 Wykonanie obliczeń numerycznych – <i>moduł Job</i> .....	247
<b>10. POŁĄCZENIE ADHEZYJNE – ZAGADNIENIE DODATKOWE</b> .....	249
10.1 Wprowadzenie .....	249
10.2 Budowa modelu geometrycznego – <i>moduł Part</i> .....	249
10.3 Definicja właściwości materiałowych – <i>moduł Property</i> .....	250
10.4 Tworzenie instancji części – <i>moduł Assembly</i> .....	252
10.5 Definicja analizy numerycznej – <i>moduł Step</i> .....	253
10.6 Interakcje modelu numerycznego – <i>moduł Interaction</i> .....	253
10.7 Definicja warunków brzegowych – <i>moduł Load</i> .....	255
10.8 Budowa siatki elementów skończonych – <i>moduł Mesh</i> .....	256
10.9 Wykonanie obliczeń numerycznych – <i>moduł Job</i> .....	257
<b>LITERATURA</b> .....	266

# 1. PROSTY PROCES PRZEBICIA MATERIAŁU

## 1.1 Wprowadzenie

Przedmiotem analizy numerycznej jest model płytowej próbki aluminiowej, stanowiący nieruchomy obiekt, poddany procesowi przebicia pod wpływem uderzenia sferycznym elementem stalowym. Proces przebicia uwzględnienia dodatkowo złożone zagadnienie kontaktowe. W realizowanym przykładzie przeprowadzona zostanie dyskretyzacja konstrukcji przy wykorzystaniu trójwymiarowych elementów bryłowych typu C3D8R (elementy ośmiowęzłowe o 3 stopniach swobody w każdym węźle, z liniową funkcją kształtu oraz zredukowanym całkowaniem) oraz S4R (elementy powłokowe czterowęzłowe). Zagadnienie przebicia materiału, stanowi skomplikowany proces numeryczny, który jest ściśle związany z rozwiązaniem zagadnienia dynamicznego.

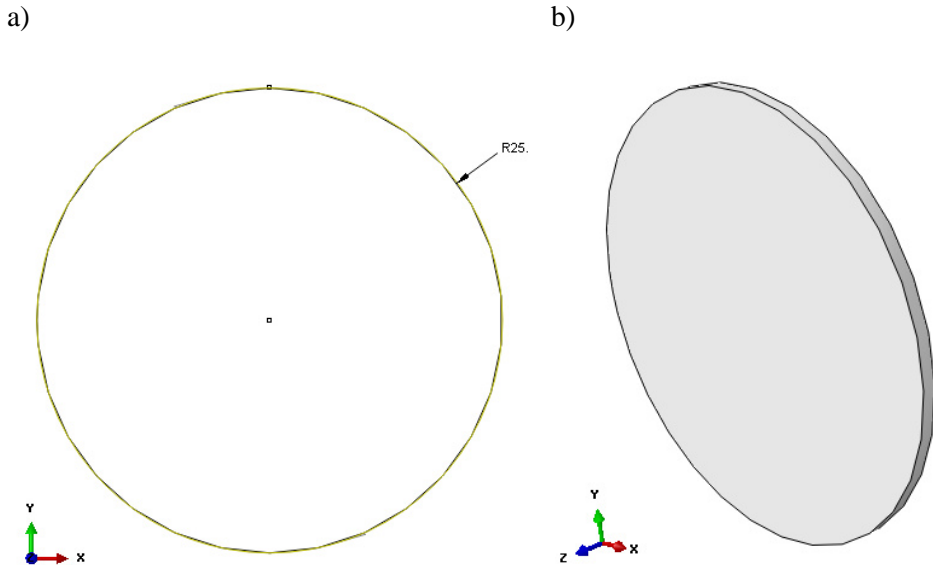
W odniesieniu do zagadnień statycznych, gdzie czas analizy był pomijalny, w przypadku realizacji zagadnień dynamicznych definicja czasu realizowanego zagadnienia, stanowi parametr fundamentalny.

## 1.2 Budowa modelu geometrycznego – *moduł Part*

Model geometryczny próbki płytowej poddanej uderzeniu zostanie wykonany w oparciu o elementy bryłowe. Przy wykorzystaniu narzędzia *Create Part* należy nanieść nazwę elementu *Konstrukcja płytowa* oraz ustalić parametry geometryczne części jako element 3D, ciało odkształcalne typu *Deformable*, wykonane jako element bryłowy *Solid* metodą wyciągnięcia profilu *Extrusion*, akceptując ustawienia poleceniem *Continue*.

Po automatycznym przekierowaniu programu do pracy w nowo otwartym szkicowniku, konieczne jest naszkicowanie profilu pierwszego z elementów poddanych analizie badawczej. Celem narysowania poprawnego szkicu, należy skorzystać z opcji *Create Circle: Center and Perimeter*. Niezbędne wymiary należy nanieść przy użyciu narzędzia *Add Dimension*, natomiast edycji oraz modyfikacji wymiarów, w przypadku ewentualnej pomyłki wykonuje się za pomocą narzędzia *Edit Dimension Value*, poprzez zaznaczenie danego wymiaru i zadeklarowanie poprawnej jego wartości. Zwymiarowany szkicu i element bryłowy przedstawiono na rys. 1.1.

Po zatwierdzeniu narysowanego profilu poleceniem *Done* w nowo otwartym oknie należy wprowadzić długość wyciągnięcia *Depth: 1.5*, ustalając tym samym grubość modelu przestrzennego oraz zatwierdzając poleceniem *OK*. Wszelkie wymiary geometryczne dotyczące tworzenia modelu podane są w [mm].

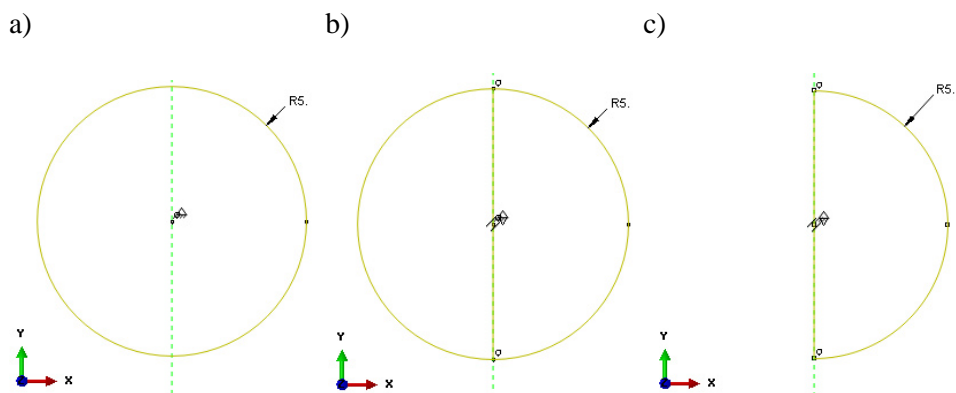


**Rys. 1.1.** Element *Konstrukcja płytowa*: a) szkic, b) model bryłowy

Następny etap stanowi zaprojektowanie drugiego elementu, który będzie w dalszej części analizy powodował uderzenie w centralną część pierwszego podzespołu. Model geometryczny zostanie wykonany jako element powłokowy, ze względu na przeprowadzenie końcowych obliczeń w krótszym czasie.

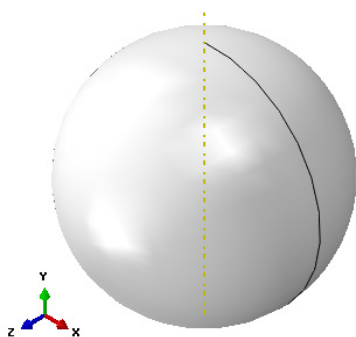
Wykorzystując narzędzie *Create Part* należy nadać nazwę elementu *Kulka* oraz ustalić parametry geometryczne części jako element 3D, ciało odkształcalne typu *Deformable*, wykonane jako element powłokowy *Shell* metodą obrotu profilu *Revolution*, akceptując ustawienia poleceniem *Continue*. Po automatycznym przekierowaniu do szkicownika, należy skorzystać z opcji *Create Circle: Center and Perimeter*. Niezbędne wymiary w postaci promienia okręgu należy nadać przy użyciu narzędzia *Add Dimension*. Po narysowaniu okręgu z początku układu współrzędnych, istotne jest, żeby punkt końcowy rysowanego okręgu, był zgodny z kierunkiem osi X. Następnym etapem jest narysowanie pionowej linii w centralnej części okręgu. Szkic linii prostej należy wykonać z wykorzystaniem jednego narzędzia *Create Lines: Connected*. Konieczne jest narysowanie linii w pionie względem osi Y, poczynając od najniższej położonego punktu na okręgu do najwyższej. Ostatni etap stanowi docięcie lewej

części okręgu, celem dalszej możliwości obrotu jego fragmentu względem narysowanej pionowej linii. Niepotrzebną część okręgu należy przyciąć poleceniem *Auto-Trim*  $\dagger\dagger\dagger$ , poprzez zaznaczenie lewej zewnętrznej części okręgu, która ma zostać przycięta. Na poniższym rysunku przedstawiono etapowo tworzenie w pełni funkcjonalnego szkicu.




**Rys. 1.2.** Element *Kulka*: a) szkic okręgu, b) szkic pionowej linii wewnątrz okręgu, c) docięcie zbędnej lewej połowy okręgu

Po zatwierdzeniu środkowym klawiszem myszy narysowanego szkicu lub poprzez wyłączenie polecenia *Auto-Trim*  $\dagger\dagger\dagger$ , należy wybrać z dolnej części okna projektowego opcję *Done*. Program poprosi o wprowadzenie kąta obrotu narysowanego półokręgu, względem pionowej linii stanowiącej oś obrotu. Przy parametrze *Angle* w nowo otwartym oknie, konieczne jest wpisanie pełnego kąta obrotu wynoszącego 360 stopni. Po zatwierdzeniu poleceniem *OK* wprowadzonego parametru, nastąpi wygenerowanie powłokowego elementu sferycznego.




**Rys. 1.3.** Model przestrzenny elementu *Kulka*


### 1.3 Definicja właściwości materiałowych – *moduł Property*


Właściwości materiałowe przypisuje się w module *Property* poprzez użycie opcji *Create Material* . W nowo otwartym oknie następuje określenie nazwy materiału jako *Aluminium*. Następnie, należy przejść do zakładki *Mechanical/Elasticity/Elastic*, w celu określenia podstawowych cech opisujących materiał. Moduł odkształcalności liniowej wynosi *Young's Modulus: 70000* [MPa] oraz współczynnik Poissona stanowiący stosunek odkształcenia poprzecznego do podłużnego *Poisson's Ratio: 0.33*. Po wprowadzeniu danych należy bezpośrednio przejść do zakładki *Mechanical/Plasticity/Plastic*. W pierwszym wierszu w opcji *Yield Stress* należy nanieść wartość granicy plastyczności materiału wynoszącą w tym przypadku 250 [MPa], natomiast odkształcenie plastyczne, odpowiadające poziomowi granicy plastyczności *Plastic Strain* wynosi 0. Po przejściu klawiszem *Enter* z klawiatury do drugiego wiersza, należy zdefiniować *Yield Stress* jako granicę wytrzymałości materiału równą 300 [MPa], przy odpowiadającym jej wydłużeniu plastycznym próbki przy zerwaniu wynoszącym 9%, które musi być zdefiniowane liczbowo w podopcji *Plastic Strain* jako 0.09. Z uwagi na realizację zagadnienia dynamicznego, niezbędne jest określenie gęstości materiału. Celem określenia pożądanej gęstości, należy przejść do zakładki *General/Density*. W polu *Mass Density*, konieczne jest wpisanie gęstości w poprawnej jednostce. Z uwagi na to iż model był tworzony w [mm], gęstość musi być podana w jednostce zgodnej jako [t/mm<sup>3</sup>]. Gęstość z reguły podawana jest w jednostce [kg/m<sup>3</sup>], jednak do celów numerycznych poprawnie zamodelowanego procesu, niezbędne jest przeliczenie 2700 [kg/m<sup>3</sup>] na poprawny typ jednostki. W omawianym polu należy nanieść wartość 2.7E-009. Finalnie poza trzema już wprowadzonymi właściwościami, konieczne jest zdefiniowanie właściwości niszczących materiału *Aluminium*. Definicja właściwości niszczących odbywa się po przejściu do opcji *Mechanical/Damage for Ductile Metals/Ductile Damage*. W odniesieniu do wybranej opcji, należy wprowadzić szereg zależności pomiędzy odkształceniami i naprężeniami niszczącymi. Początkowo możliwe jest określenie stopnia ewolucji zniszczenia materiału w ramach podopcji o nazwie *Suboptions/Damage Evolution* w prawej części nowo otwartego okna. W komórce określonej jako *Displacement at Failure*, należy nanieść wartość 0.001, stanowiącą parametr określający zachodzące zniszczenie, na skutek wystąpienia przemieszczeń większych od wartości zadeklarowanej w obrębie badanego materiału, podczas procesu uderzenia. Po zatwierdzeniu naniesionego parametru poleceniem *OK*, należy przejść do szczegółowej definicji zniszczenia materiału. Szereg wartości niezbędnych do naniesienia w odpowiednich komórkach przedstawiono na poniższym rysunku.



	Fracture Strain	Stress Triaxiality	Strain Rate
1	33	-3.33	0.01
2	33	-0.33	0.01
3	23	-0.26	0.01
4	16.5	-0.2	0.01
5	11.5	-0.13	0.01
6	8.1	-0.06	0.01
7	5.7	0	0.01
8	4.1	0.06	0.01
9	2.8	0.13	0.01
10	2	0.2	0.01
11	1.4	0.26	0.01
12	1	0.33	0.01
13	0.7	0.4	0.01
14	0.5	0.46	0.01
15	0.38	0.53	0.01
16	0.61	1	0.01
17	7.5	3.33	0.01

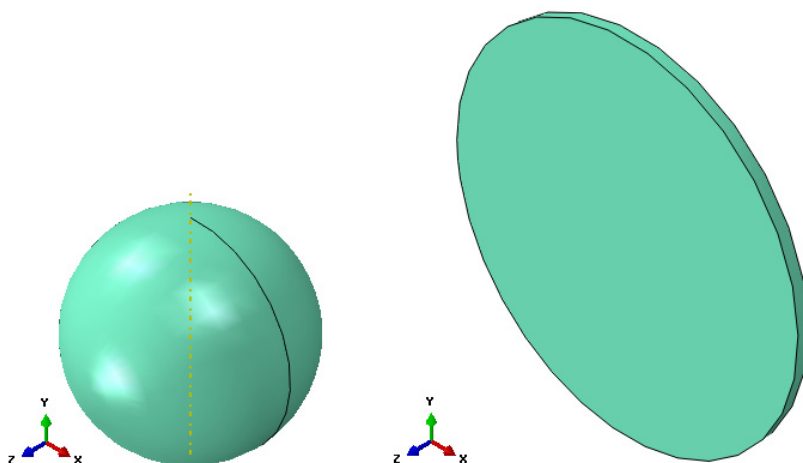
Rys. 1.4. Właściwości dotyczące zniszczenia materiału

Po wprowadzeniu powyżej przedstawionych parametrów należy użyć polecenia *OK*. Właściwości materiałowe związane w dalszej części z elementem *Kulka* należy przypisać poprzez ponowne użycie opcji *Create Material* . W nowo otwartym oknie następuje określenie nazwy materiału jako *Stal*. W zakładce *Mechanical/Elasticity/Elastic*, niezbędne jest określenie podstawowych parametrów charakteryzujących materiał. Moduł odkształcalności liniowej wynosi *Young's Modulus: 210000* [MPa] oraz współczynnik Poissona stanowiący stosunek odkształcenia poprzecznego do podłużnego *Poisson's Ratio: 0.3*. Po wprowadzeniu danych należy bezpośrednio przejść do zakładki *Mechanical/Plasticity/Plastic*. W pierwszym wierszu w opcji *Yield Stress* należy nanieść wartość granicy plastyczności materiału wynoszącą w tym przypadku 360 [MPa], natomiast odkształcenie plastyczne, odpowiadające poziomowi granicy plastyczności *Plastic Strain* wynosi 0. Po przejściu klawiszem *Enter* z klawiatury do drugiego wiersza, należy zdefiniować *Yield Stress* jako granicę wytrzymałości materiału równą 510 [MPa], przy odpowiadającym jej wydłużeniu plastycznym próbki przy zerwaniu wynoszącym 15%, które musi być zdefiniowane liczbowo w podopcji *Plastic Strain* jako 0.15. Z uwagi na realizację zagadnienia dynamicznego, niezbędne jest określenie gęstości materiału. W tym celu, należy przejść do zakładki *General/Density*. W polu *Mass Density*, konieczne jest wpisanie gęstości wynoszącej 7.86E-009. Zdefiniowanie w opisany sposób wszystkich cech materiałowych, należy zakończyć poleceniem *OK*.

W ramach następnego etapu należy utworzyć sekcje z odpowiednio przypisanymi właściwościami materiałowymi za pomocą narzędzia *Create Section* , przypisując nazwę pierwszej z sekcji jako *Aluminium* oraz właściwości *Solid/Homogeneous*, zatwierdzając wprowadzone dane poleceniem *Continue*. W nowo otwartym oknie należy wybrać *Material: Aluminium*, zatwierdzając *OK*.

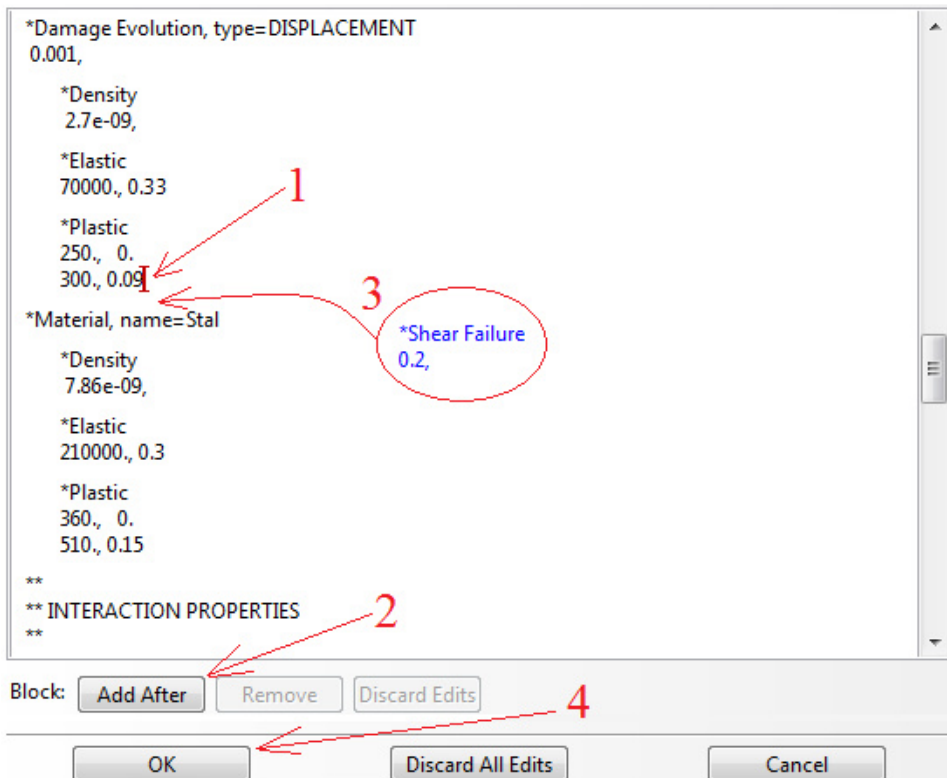
Utworzoną w powyższy sposób sekcję należy przypisać do wykonanego modelu o nazwie *Konstrukcja plytowa*, wybierając kolejno nad ekranem roboczym w okienku *Part* poszczególną część i wykorzystując narzędzie *Assign Section* . Po zaznaczeniu odpowiedniej części i zatwierdzeniu wyboru poleceniem *Done*, należy wybrać odpowiednią sekcję *Aluminium* o typie *Solid* i zaakceptować przypisanie sekcji poleceniem *OK*.

W odniesieniu do drugiego zaprojektowanego elementu należy utworzyć sekcję z odpowiednio przypisanymi właściwościami materiałowymi za pomocą narzędzia *Create Section* , przypisując nazwę drugiej z sekcji jako *Stal* oraz właściwości *Shell/Homogeneous*, zatwierdzając wprowadzone dane poleceniem *Continue*. W nowo otwartym oknie należy wybrać *Material: Stal* oraz *Shell thickness Value: 0.1*, zatwierdzając *OK*. W przypadku przypisania sekcji do elementu o nazwie *Kulka*, konieczny jest wybór nad ekranem roboczym w okienku *Part*, odpowiedniej części oraz ponowne zastosowanie narzędzia *Assign Section* . Po zaznaczeniu części o nazwie *Kulka* w przestrzeni roboczej i zatwierdzeniu wyboru poleceniem *Done*, należy w nowo otwartym oknie zdefiniować typ sekcji jako *Stal* – o składowym typie sekcji *Shell*. Okno przypisywania sekcji materiałowej do elementu *Kulka*, należy zatwierdzić poleceniem *OK*.



Rys. 1.5. Przypisanie cech materiałowych do elementów

Dodatkowo, konieczne jest zdefiniowanie współczynnika uszkodzenia pod wpływem ścinania. Celem definicji parametru niezbędne jest przejście do zakładki *Model/Edit Keywords/Model-1*, po czym w nowo otwartym oknie, należy przy użyciu dostępnego suwaka przemieścić się do treści zgodnych z rys. 1.6 oraz wykonać modyfikację według dalszego opisu.




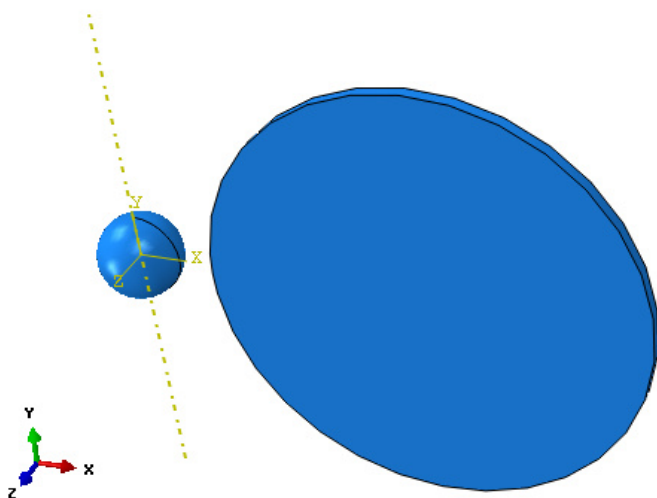
Rys. 1.6. Definicja uszkodzenia na skutek ścinania

Początkowo konieczne jest zaznaczenie kursorem myszy miejsca zgodnego z pierwszym krokiem definicji – 1. Następnie należy wybrać polecenie *Add After* – 2, celem naniesienia pożądanego parametru uszkodzenia. Kolejny etap stanowi wprowadzenie danych zgodnych z trzecim krokiem – 3. Ostatecznie należy dokonać zatwierdzenia wprowadzonej właściwości uszkodzenia na skutek ścinania poleceniem *OK* – 4, znajdującej się w dolnej części okna roboczego. Wszelkie etapy definicji są zgodne z kolejnością postępowania, przedstawioną na rys. 1.6, co stanowi pełny proces przypisywania modelu materiałowego.




## 1.4 Tworzenie instancji części – *moduł Assembly*

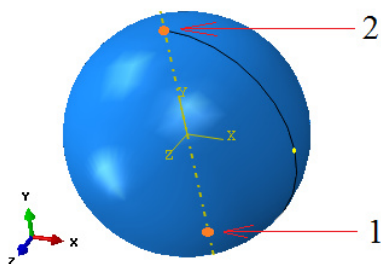
W bieżącym module należy dokonać utworzenia instancji wykonanych elementów. Model numeryczny składa się z dwóch podzespołów. W celu wczytania poszczególnych elementów należy wykorzystać narzędzie *Create Instance* , zaznaczając w oknie listy części dzięki przytrzymaniu klawisza *Shift* z klawiatury element *Konstrukcja płytowa* oraz *Kulka*, przy jednoczesnym wybraniu opcji *Instance Type: Independent* oraz *Auto-offset from other instances*, należy finalnie zatwierdzić wybór poleceniem *OK*. Utworzone instancje części przedstawiono na rys. 1.7.



Rys. 1.7. Instancje części


Celem możliwości złożenia wstawionych części do przestrzeni roboczej, niezbędne będzie początkowo obrócenie elementu *Kulka* względem osi *Y* o  $90^\circ$ . Konieczne jest użycie opcji *Rotate Instance* , zaznaczenie omawianego podzespołu oraz wybranie polecenia *Done*. Kolejny krok stanowi wybór dwóch punktów, wzdłuż których będzie ustalona oś obrotu elementu.

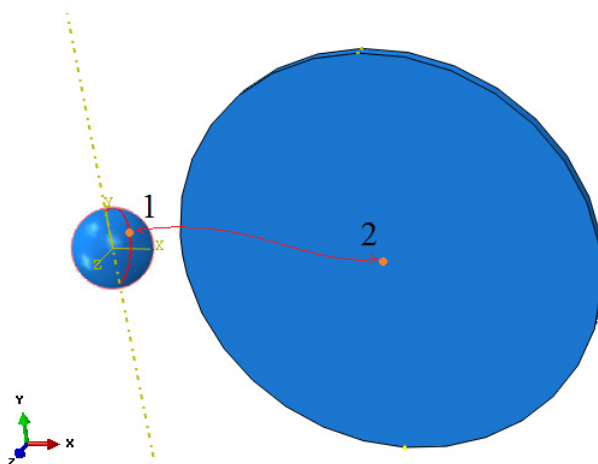
Punkty powinny być wybrane w kolejności przedstawionej na rys. 1.8, ze względu na konieczność wykonanego obrotu części w kierunku przeciwnym do ruchu wskazówek zegara.



**Rys. 1.8.** Wybór punktów do obrotu części

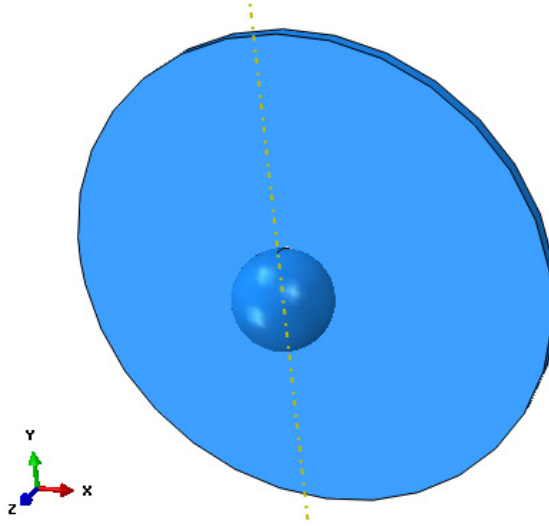
Po wyborze odpowiednich punktów, w dolnej części okna roboczego, pojawi się komenda *Angle of rotation: 90*, co akurat odpowiada kątowi obrotu, o jaki należy obrócić element. Finalnie, należy dokonać akceptacji klawiszem *Enter* oraz wybrać polecenie *OK* znajdujące się w dolnej części okna roboczego.

Kolejny etap stanowi umieszczenie skrajnego punktu elementu *Kulka*, znajdującego się na osi *Z*, w centralnej części elementu *Konstrukcja płytowa*. Przy użyciu opcji *Translate Instance* , należy wybrać element *Kulka* oraz zatwierdzić opcją *Done*. Po tej operacji pojawią się punkty charakterystyczne na wszystkich elementach. Należy wybrać w odpowiedniej kolejności punkt z jednego elementu względem punktu na drugim elemencie i wybrać polecenie *OK*, aby nastąpiło odpowiednie złożenie, zgodnie z rys. 1.9.




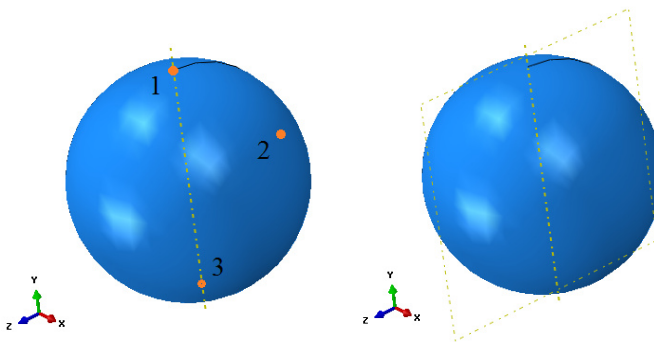
**Rys. 1.9.** Wybór punktów do translacji części

Po wykonaniu odpowiedniej translacji, przygotowany model w ramach dokonanego złożenia powinien być zgodny z rys. 1.10.



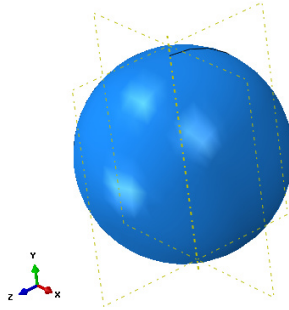
Rys. 1.10. Złożenie modelu

Dodatkowo w module *Assembly*, występuje możliwość równomiernego podziału elementu *Kulka*, co posłuży dalszym ułatwieniom w przypisywaniu kolejnych relacji w następnych modułach. Wstępnie w ramach opcji *Create Display Group* , konieczne jest przejście do zakładki *Part/Model instances* oraz zaznaczenie elementu *Konstrukcja płytowa*. Z dolnej części otwartego okna należy wybrać polecenie *Remove* oraz na zakończenie *Dismiss*. Z zakładki zawartej w górnej części programu, należy wybrać kolejno *Tools/Datum/Plane/3 points*. Po wyborze odpowiednich punktów zgodnych z poniższym rysunkiem, znajdujących się na krzywej, tworzącej powierzchnię sferyczną, zostanie utworzona pierwsza płaszczyzna podziału.





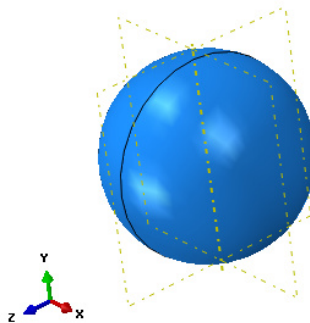
Rys. 1.11. Tworzenie pierwszej płaszczyzny podziału

Następnym etapem jest wybór z dostępnego okna *Create Datum*, opcji *Rotate from plane*. Po wyborze omawianej opcji, konieczne jest wybranie pierwszej utworzonej płaszczyzny podziału oraz kolejno osi elementu sferycznego. Pojawienie się w dolnej części okna roboczego programu komunikatu *Angle of rotation: 90*, świadczy o wykonaniu drugiej płaszczyzny podziału elementu obróconej o  $90^\circ$ , względem pierwszej, co finalnie należy akceptować klawiszem *Enter*. Wizualizacja elementu z obydwoma płaszczyznami podziału została przedstawiona na rys. 1.12.



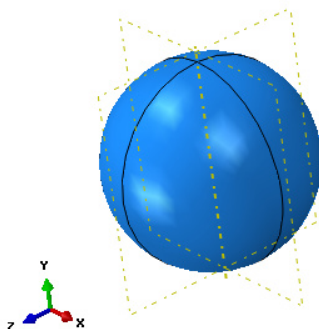
Rys. 1.12. Tworzenie drugiej płaszczyzny podziału

Ostatni etap stanowi wykonanie partycji, przy użyciu utworzonych uprzednio płaszczyzn podziału. W celu utworzenia odpowiednich partycji konieczne jest przytrzymanie lewym klawiszem myszy opcji *Partition Face: Sketch*  oraz wybór dostępnej podopcji *Partition Face: Use Datum Plane* . Po wyborze wskazanej opcji, zaznaczeniu elementu oraz zatwierdzeniu wyboru poleceniem *Done*, należy dokonać wyboru pierwszej z dwóch dostępnych płaszczyzn podziału elementu, przy czym operację sfinalizować opcją *Create Partition*. Wykonanie partycji powinno być zgodne z rys. 1.13.




Rys. 1.13. Utworzenie pierwszej partycji

Następnym krokiem jest dokonanie wyboru całej powierzchni sferycznej, zatwierdzenie wyboru opcją *Done* oraz podział drugą płaszczyzną podziału, sfinalizowany użyciem polecenia *Create Partition*. Graficzna prezentacja w ramach wykonania drugiej partycji została przedstawiona na rys. 1.14.




Rys. 1.14. Utworzenie drugiej partycji


## 1.5 Definicja analizy numerycznej – *moduł Step*

Analiza numeryczna przeprowadzona zostanie jako zadanie dynamiczne. Wybierając narzędzie *Create Step* , należy ustalić nazwę kroku obliczeniowego jako *Dynamika* i wybrać typ analizy jako *Dynamic, Explicit* oraz zatwierdzić wybór poleceniem *Continue*. W nowo otwartym oknie w pierwszej z zakładek *Basic*, należy nanieść wyłącznie wartość czasu trwania analizy numerycznej w polu *Time period: 0.015* oraz włączyć opcję *Nlgeom* na *ON*. Podana wartość jest wyrażona w sekundach. Ze względu na długi okres oczekiwania towarzyszący skomplikowanym obliczeniom dynamicznym, czas analizy jest możliwie najkrótszy oraz wcześniejsze złożenie uwzględnia od razu styk elementu *Kulka* z uderzanym elementem *Konstrukcja płytowa*. W trzeciej z zakładek *Mass scaling*, konieczne jest użycie opcji *Use scaling definitions below* oraz wybranie w dolnej części otwartego okna roboczego polecenia *Create*. W okienku *Scale by factor*, należy nanieść wartość *625* oraz zatwierdzić opcją *OK*. Okno związane z określaniem procesu dynamicznego również powinno być zaakceptowane poleceniem *OK*. Zgodnie z zasadą przyspieszenia procesu obliczeniowego związanego ze skalowaniem masy obiektów poddanych procesom dynamicznym, naniesiona wartość skalowania ma wpływ na przebieg samej analizy i otrzymany wynik powinien zostać przeanalizowany. W przypadku wykorzystywania w obliczeniach procesu skalowania masy, przyspieszy znacząco realizacja obliczeń. Skalowanie masy, często wiąże się


z występowaniem niepożądanych błędów numerycznych, jednak przy niewielkim współczynniku skalowania, błędy symulacyjne są często niezauważalne.

Dodatkowo w ramach opcji *Field Output Manager* , należy wybrać opcję *Created* (dwukrotnym kliknięciem myszy), po czym z okna dostępnych wyników wybrać dodatkowo z opcji *Failure/Fracture* podopcję *DMICRT*. Podobnie z opcji *State/Field/User/Time*, należy wybrać podopcję *STATUS* oraz wszelkie wybory zatwierdzić poleceniem *OK*, a także następnie poleceniem *Dismiss* zamknąć kolejne okno. Wybór powyższych opcji pozwoli na odwzorowanie procesu przebicia w ramach elementu *Konstrukcja płytowa*.

## 1.6 Interakcje modelu numerycznego – moduł *Interaction*

W module związanym z interakcjami należy początkowo ustalić typ kontaktu oraz miejsca współpracy podzespołów. W tym celu niezbędne jest wstępne zdefiniowanie rodzaju kontaktu, jaki ma występować na powierzchniach styku elementów. Należy wybrać polecenie *Create Interaction Property* , nazwę zdefiniować jako *Kontakt* oraz wybrać typ współpracy powierzchni z listy o nazwie *Contact* i zatwierdzić wybór przyciskiem *Continue*.

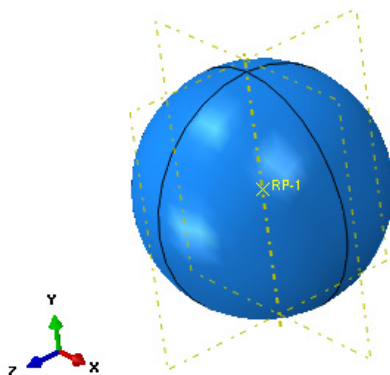
W nowo otwartym oknie niezbędne jest określenie cech wybranego kontaktu. Należy, zatem wybrać zakładkę *Mechanical/Tangential Behavior* i zaznaczyć opcję *Frictionless* ze względu na pominięcie współczynnika tarcia przy uderzeniu. Kolejno w zakładce *Mechanical/Normal Behavior* powinna zostać wybrana opcja „*Hard*” *Contact* oraz *Default* w odpowiednich oknach wyboru, z faktu uwzględnienia niezbędnego rodzaju kontaktu na powierzchniach normalnych współpracujących podzespołów. Dodatkowo zaznaczenie opcji *Allow separation after contact* spowoduje współpracę oddzielonych elementów skończonych na skutek uderzenia z elementem uderzającym. Wszelkie wybory zatwierdzić należy opcją *OK*.

Następnym zagadnieniem do zdefiniowania będzie określenie miejsca współpracy zaprojektowanych podzespołów kompletnego modelu. Należy początkowo wybrać opcję *Create Interaction* , zdefiniować nazwę jako *Kontakt*, z informacji *Step* wybrać z rozwinięcia utworzony krok obliczeniowy o nazwie *Initial* i typ kontaktu *General contact (Explicit)* oraz zatwierdzić wszystkie wybory poleceniem *Continue*. W nowo otwartym oknie bez zmian pozostawić należy typ kontaktu jako *All\* with self*, przy czym w dolnej części okna roboczego z właściwości kontaktowych *Contact properties*, konieczny jest wybór w podopcji *Global property assignment*, wcześniej utworzonej relacji o nazwie *Kontakt*. Wszelkie operacje należy zatwierdzić poleceniem *OK*.



Przedstawiony sposób przypisywania cech kontaktowych, pozwoli na stałą współpracę zdefiniowanego kontaktu między wszystkimi powierzchniami

współpracującymi podczas uderzenia oraz zachowanie kontaktu w chwili przebiccia materiału.


Dodatkowo w module *Interaction*, niezbędne jest utworzenie punktu referencyjnego w centralnej części elementu *Kulka*. Celem wygenerowania punktu referencyjnego należy przejść do zakładki *Tools/Reference Point*, po czym wskazać środkowy punkt na omawianym podzespole, zgodnie z rys. 1.15.

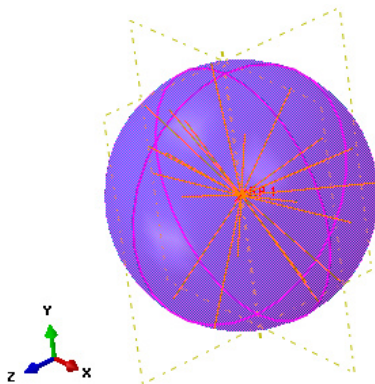


Rys. 1.15. Utworzenie punktu referencyjnego

Finalny etap w module interakcji stanowi sprzężenie utworzonego punktu referencyjnego o automatycznie zdefiniowanej nazwie *RP-1* z zewnętrzną powierzchnią sferyczną elementu *Kulka*. W przypadku, gdy w przestrzeni roboczej są wyświetlane obydwa elementy, zalecane jest użycie opcji *Create Display Group* , przejście do zakładki *Part/Model instances* oraz zaznaczenie elementu *Konstrukcja płytowa*. Z dolnej części otwartego okna należy wybrać polecenie *Remove* oraz na zakończenie *Dismiss*. Jeżeli wyświetlony był tylko element sferyczny o nazwie *Kulka*, zabieg opisany w poprzednim zdaniu jest zbędny. Celem utworzenia niezbędnego sprzężenia punktu referencyjnego z powierzchnią sferyczną elementu, pożądane jest użycie opcji *Create Constraint* . Po jej wybraniu, należy zdefiniować nazwę jako *Sprzezenie* oraz wybrać dostępną podopcję *Coupling* i polecenie *Continue*.


Początkowo konieczne jest zaznaczenie punktu referencyjnego oraz zatwierdzenie go opcją *Done*. Następnie po wyborze z dolnej części okna roboczego opcji *Surface*, należy wybrać całą powierzchnię sferyczną oraz zatwierdzić wybór poleceniem *Done*. Po wyświetleniu trzech możliwości wyboru związanego z określeniem oddziaływań sprzężenia wewnątrz lub zewnątrz elementu *Kulka*, należy wybrać opcję *Brown*, oznaczającą kolorystykę zewnętrznej powierzchni części. W nowo otwartym oknie niezbędne jest wybranie opcji sprzężenia jako *Kinematic* i wybranie polecenia *OK*.


Sprawdzenie poprawności przypisania omawianego więzu odbywa się za pomocą narzędzia *Constraint Manager* , dwukrotnie wybierając jedną z utworzonych relacji sprzężenia. Po dokonaniu powyższej czynności graficzna reprezentacja przypisanej relacji będzie zgodna z rys. 1.16.



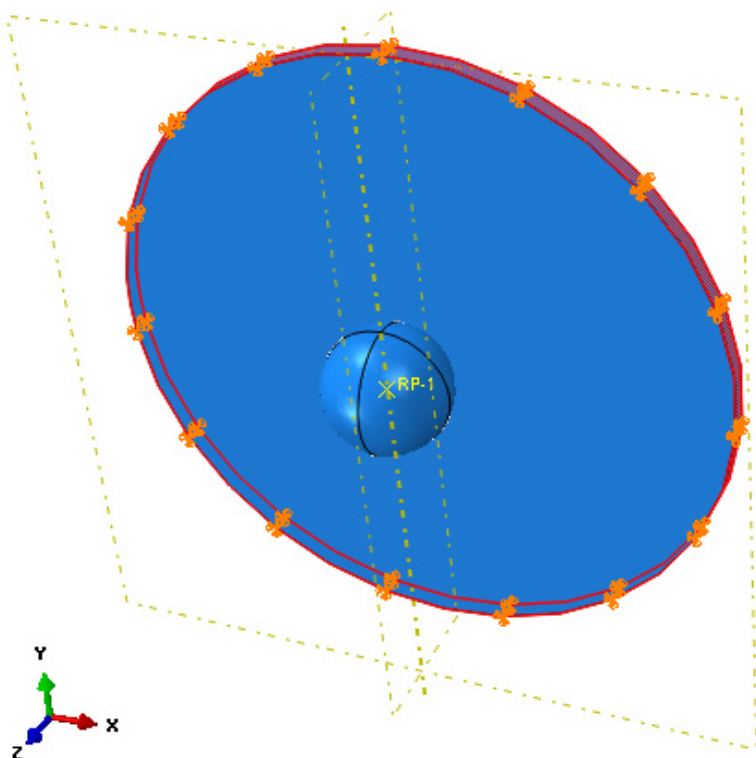
Rys. 1.16. Relacja typu *Coupling*

## 1.7 Definicja warunków brzegowych – moduł *Load*

Warunki brzegowe modelu numerycznego stanowią określenie odpowiedniego utwierdzenia elementu *Konstrukcja płytowa* oraz ustalenie prędkości, z jaką poruszać się musi część o nazwie *Kulka*. Niezbędne jest w omawianym module wyświetlanie obydwu podzespołów naraz. Przy użyciu opcji *Replace All* , nastąpi wyświetlenie ukrytego elementu *Konstrukcja płytowa*.

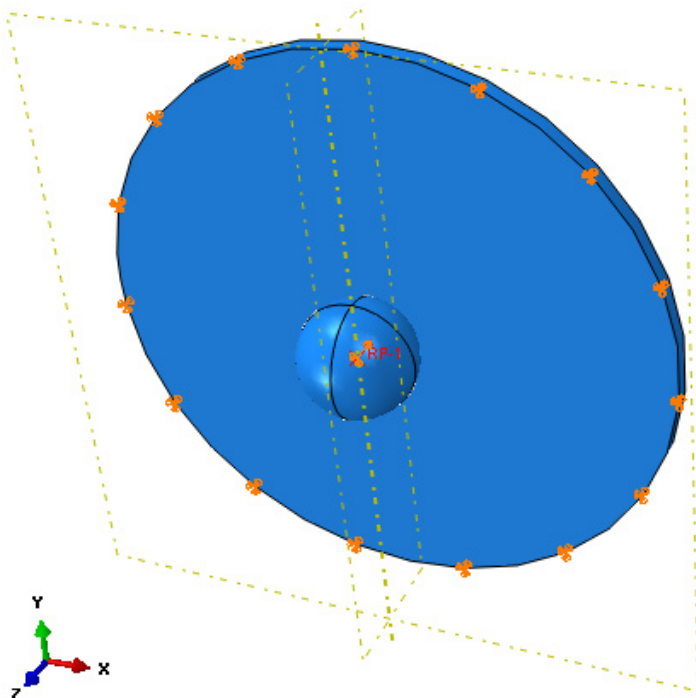
Definicję warunków brzegowych należy rozpocząć od utwierdzenia elementu poddanego uderzeniu. W tym celu konieczny jest wybór opcji *Create Boundary Condition* , nadając nazwę *Utwierdzenie*, w kroku analizy *Step: Initial*, wybierając metodę definicji warunków brzegowych *Displacement/Rotation*. Po zatwierdzeniu ustawień poleceniem *Continue*, należy zaznaczyć i zatwierdzić poleceniem *Done* powierzchnię cylindryczną części *Konstrukcja płytowa*. Następnie konieczne jest zablokowanie trzech translacyjnych stopni swobody (elementy bryłowe posiadają wyłącznie trzy pierwsze stopnie swobody), wybierając *U1*, *U2* oraz *U3*, po czym akceptacji wyboru dokonuje się opcją *OK*, co zostało przedstawione na rys. 1.17.






Rys. 1.17. Utwierdzenie elementu *Konstrukcja plytowa*


Określenie warunku brzegowego dotyczącego nadania prędkości w odniesieniu do elementu uderzającego następuje poprzez ponowne użycie opcji *Create Boundary Condition*. Po zdefiniowaniu nazwy jako *Predkosc*, w kroku analizy *Step: Dynamika*, należy wybrać metodę definicji warunków brzegowych *Velocity/Angular velocity*. Po zatwierdzeniu ustawień poleceniem *Continue*, należy zaznaczyć i zatwierdzić poleceniem *Done* punkt referencyjny *RP-1* przynależny do części *Kulka*. Następnie konieczne jest zablokowanie trzech translacyjnych stopni swobody, wybierając *V1*, *V2* oraz *V3*. Dodatkowo przy zaznaczonym stopniu swobody *V3*, niezbędne jest naniesienie wartości *-1000* (wartość oznacza prędkość elementu w przeciwnym kierunku do osi *Z* w jednostce [mm/s]). Finalny etap stanowi akceptacja zdefiniowanego warunku brzegowego poleceniem *OK*. Poprawnie przypisany warunek brzegowy będzie zgodny z prezentacją graficzną jak na rys. 1.18.




Rys. 1.18. Przypisanie prędkości elementu *Kulka*

## 1.8 Budowa siatki elementów skończonych – *moduł Mesh*

W celu określenia typu i parametrów siatki elementów skończonych należy wykorzystując narzędzie *Assign Mesh Controls*  zaznaczyć cały element *Konstrukcja płytowa* oraz zatwierdzając wybór poleceniem *Done*, ustawić parametry siatki na *Hex/Sweep* z algorytmem jej tworzenia względem osi symetrii modelu *Medial axis* oraz zatwierdzić całość poleceniem *OK*.

Wykorzystując narzędzie *Seed Part* , należy wybrać element *Konstrukcja płytowa*, zatwierdzić wybór opcją *Done*, ustalić globalną gęstość siatki dyskretyzowanej części w poleceniu *Approximate global size* na wartość *0.5* i zatwierdzić poleceniem *OK*.

Kolejny krok stanowi ustalenie rodzaju elementu skończonego zastosowanego w dyskretyzacji modelu *Konstrukcja płytowa*. Używając narzędzia *Assign Element Type* , konieczność stanowi zaznaczenie całego obiektu oraz zatwierdzenie poleceniem *Done*, po czym należy dokonać następujących wyborów w ramach dostępnych opcji *Element Library*: *Explicit*, *Geometric Order: Linear*, typ *Family: 3D Stress* oraz w zakładce *Hex*, niezbędne jest

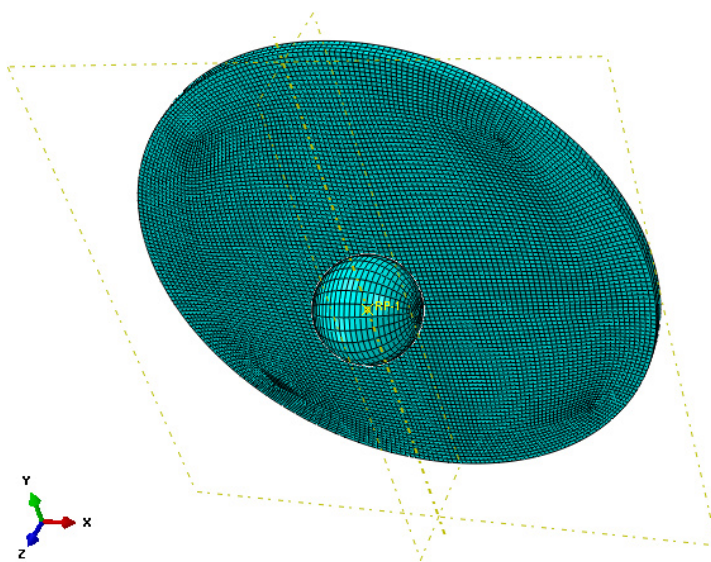
włączenie opcji *Element deletion: Yes*. Akceptacji dokonanych zmian należy dokonać za pomocą polecenia *OK*.

Analogiczne etapy należy przeprowadzić w ramach dyskretyzacji elementu *Kulka*. Początkowo przy wykorzystaniu narzędzia *Assign Mesh Controls* niezbędne jest zaznaczenie powierzchni całego elementu *Kulka* oraz zatwierdzenie poleceniem *Done*. W nowo otwartym oknie konieczność stanowi ustawienie parametrów siatki na *Quad/Free* z algorytmem jej tworzenia względem osi symetrii modelu *Medial axis* oraz zatwierdzenie poleceniem *OK*.

Za pomocą opcji *Seed Part* należy wybrać element *Kulka*, zatwierdzić wybór opcją *Done*, ustalić globalną gęstość siatki dyskretyzowanej części w poleceniu *Approximate global size* na wartość *0.5* i zatwierdzić poleceniem *OK*.


Następnie o ile możliwe jest zaznaczenie całego elementu *Kulka*, poprzez wybranie jego wszystkich powierzchni oraz użycie narzędzia *Assign Element Type*, konieczne jest określenie typu elementów skończonych opisujących siatkę dyskretyzowanej części. W nowo otwartym oknie kolejno wybrać *Element Library: Explicit* o typie elementu z dostępnej listy *Shell* oraz liniowej funkcji kształtu *Geometric Order: Linear*, przy czym pozostałe opcje bez zmian. Okno należy zamknąć poleceniem dostępnym w jego dolnej części o nazwie *OK*.


Ostatni etap stanowi przypisanie zdefiniowanej siatki na obydwie elementy. W tym celu wykorzystując narzędzie *Mesh Part*. Należy wybrać obydwie obiekty zatwierdzić poleceniem *Done*, po czym nastąpi nałożenie siatki elementów skończonych według ustalonych wcześniej parametrów. Otrzymany model dyskretny przedstawia rys. 1.19.



Rys. 1.19. Model dyskretny


## 1.9 Wykonanie obliczeń numerycznych – moduł *Job*

W celu przygotowania zadania obliczeniowego należy wykorzystując narzędzie *Create Job* , nanieść nazwę zadania *Name: Przebicie*, zatwierdzić poleceniem *Continue*. W przypadku możliwości równoległego wykorzystania w procesie obliczeń numerycznych większej liczby rdzeni procesora, można w zakładce *Parallelization* wybrać opcję *Use multiple processors* wpisując odpowiednią liczbę rdzeni (np. 2 lub 4). Następnie należy zatwierdzić zadanie obliczeniowe z ustawieniami domyślnymi poleceniem *OK*.


Obliczenia numeryczne należy uruchomić wykorzystując narzędzie *Job Manager* , poprzez wybranie polecenia *Submit*. Przebieg procesu obliczeń numerycznych można obserwować poprzez włączenie polecenia *Monitor*. Zakończenie procesu obliczeń numerycznych zostanie zasygnalizowane odpowiednim komunikatem w oknie dialogowym *Monitor* oraz przez osiągnięcie w zakładce *Total Time* wartości zgodnej w parametrem czasu analizy zdefiniowanym w kroku obliczeniowym *0.015*.

Po zakończeniu procesu obliczeń w celu prezentacji wyników należy włączyć polecenie *Results*.

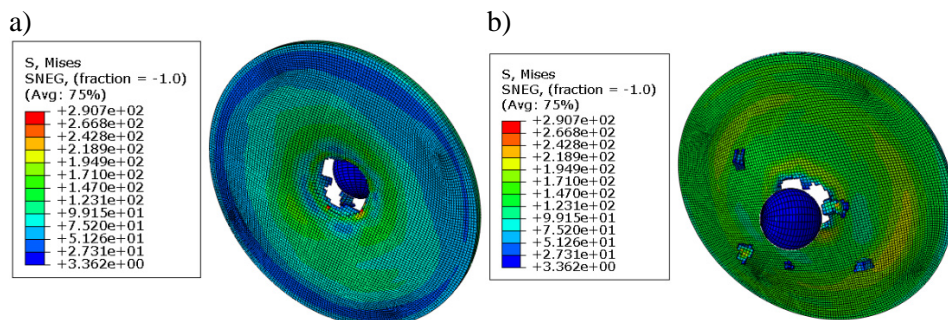
## 1.10 Wyniki obliczeń numerycznych – moduł *Visualization*

Analiza otrzymanych wyników przeprowadzona zostanie na podstawie rozkładów naprężeń zredukowanych z uwzględnieniem zjawiska przebiccia materiału, zgodnie z hipotezą wytrzymałościową Hubera-Misesa-Hencky'ego (H-M-H). Wizualizację rozkładów naprężenia zredukowanego H-M-H przy jednoczesnym wystąpieniu procesu przebiccia otrzymamy aktywując narzędzie *Plot Contours on Deformed Shape* .

Zwiększenie czcionki wyświetlanych wartości liczbowych można uzyskać wykorzystując narzędzie z górnego menu programu *Viewport/Viewport Annotation Options*. W tym celu należy w nowo otwartym oknie dialogowym w zakładce *Legend* zaznaczyć polecenie *Set Font*, po czym podopcję *Size*, zmieniając rozmiar czcionki wyświetlanej na ekranie – zmianę należy zatwierdzić poleceniem *OK*.

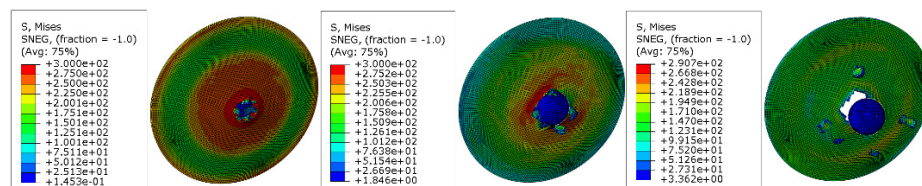
W celu obserwacji zachowania się modelu krok po kroku w trakcie procesu obciążania należy posługiwać się przewijaniem klatek animacji przy użyciu opcji *Previous* lub *Next* , znajdujących się nad oknem roboczym programu. Wyświetlane wartości naprężenia zredukowanego podawane są w tym przypadku w [MPa], co wynika bezpośrednio z jednostek wprowadzanych w trakcie przygotowania modelu numerycznego.

Ogólną mapę naprężenia zredukowanego w modelu numerycznym, w odniesieniu do całkowitego przebicia materiału, przedstawiono na rys. 1.20. Maksymalne wartości naprężeń osiągają poziom 290.7 MPa ( $+2.907e+02$  oznacza  $2.907 \times 10^2 = 290.7$ ).



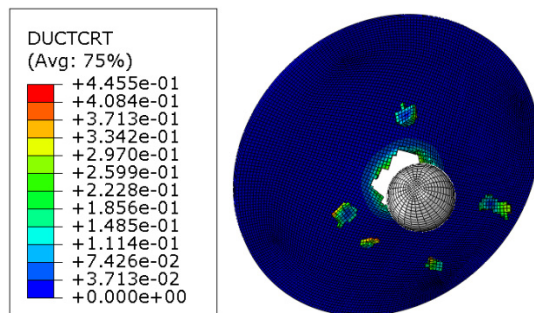
Rys. 1.20. Wynik analizy MES: a) wizualizacja przebicia od strony uderzonej, b) wizualizacja przebicia od strony nieuderzonej

Mapę naprężenia zredukowanego w odniesieniu do procesu przebicia przedstawiono dodatkowo w postaci etapowo pogłębianego trwałego uszkodzenia struktury elementu *Konstrukcja płytowa*, zgodnie z rys. 1.21.




Rys. 1.21. Wizualizacja postępującego przebicia

W odniesieniu do zastosowanego kryterium zniszczenia *Ductile Damage*, wynik poziomu zniszczenia może zostać wyświetlony za pomocą mapy prezentującej stan zniszczenia. W celu wyświetlenia mapy zniszczenia w oparciu o zastosowane kryterium zniszczenia materiałów ciągliwych/plastycznych w ramach modelu numerycznego, należy w oknie znajdującym się nad ekranem roboczym zmienić opcję z *S* (oznaczającą naprężenia – *Stress*) na opcję *DUCTCRT* przedstawiającą poziom uszkodzenia elementów skończonych, poddanych procesowi uderzenia.



Rys. 1.22. Wizualizacja poziomu zniszczenia

Kryterium związane ze zniszczeniem materiału działa na zasadzie „wyłączania” elementów skończonych, które przekroczą wartości graniczne wynikające bezpośrednio z parametrów wprowadzonych w ramach definiowanego modelu materiałowego. Na tej podstawie możliwe jest wizualne odwzorowanie postępującego procesu przebicia materiału, poddanego badaniu. W odniesieniu do elementów skończonych, znajdujących się w obrębie wygenerowanego otworu oraz elementów, które grupowo zostały na skutek uderzenia „oderwane” od rodzimego modelu, możliwe jest dokonanie oceny stanu uszkodzenia niewrażliwych obszarów struktury. Z uwagi na uwzględnienie kryterium zniszczenia wyłącznie w przypadku elementu *Konstrukcja płytowa*, mapa stanu zniszczenia nie jest związana z elementem *Kulka*.






Dodatkowo możliwa jest próba przeprowadzenia uderzenia z przebicciem na skutek zmiany warunków brzegowych, związanych z doraźną zmianą kierunku prędkości elementu uderzającego *Kulka*. Celem przeprowadzenia modyfikacji modelu numerycznego, należy skopiować bieżący model w drzewie historii tworzenia modelu oraz przypisać nową nazwę. (np. *Model-2*). Modyfikacja warunków brzegowych w module *Load* wiąże się ściśle ze skorzystaniem z opcji *Boundary Condition Manager* . Konieczna jest zmiana warunku brzegowego dotyczącego przypisania dodatkowej prędkości po osi *Y*. Zatem poza zdefiniowaną już prędkością oddziałującą przeciwnie do osi *Z* ( $V3 = -1000$  [mm/s]), możliwe jest określenie prędkości względem osi *Y* ( $V2 = 1000$  [mm/s]). Zdefiniowana w opisany sposób prędkość wypadkowa spowoduje uderzenie elementu *Kulka* pod kątem  $45^\circ$  w element *Konstrukcja płytowa*. Utworzenie nowego zadania obliczeniowego w module *Job* oraz przeliczenie zagadnienia, doprowadzi do uzyskania wyników analizy numerycznej przy uwzględnieniu zastosowanej modyfikacji.

## 2. ZŁOŻONY PROCES PRZEBICIA MATERIAŁU

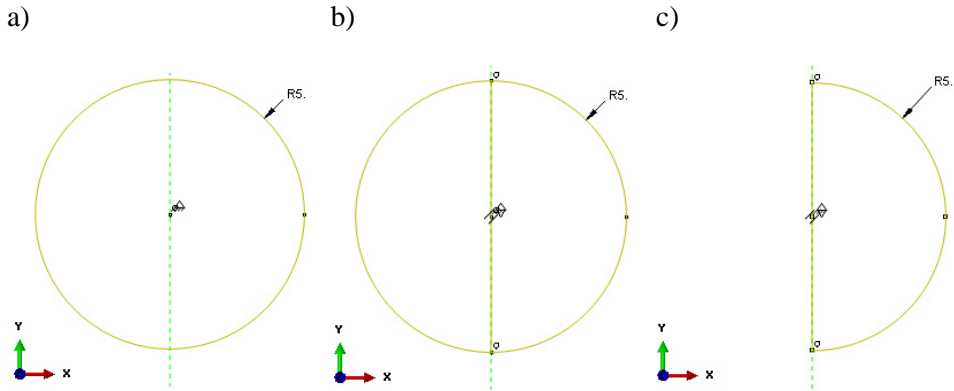
### 2.1 Wprowadzenie

Przedmiotem analizy numerycznej jest model konstrukcji płytowej, osadzonej na czterech podporach, poddany procesowi przebicia na skutek uderzenia pionowego, sferycznym obiektem. Proces przebicia uwzględnienia dodatkowo złożone zagadnienie kontaktowe w ramach swobodnego osadzenia płyty na podporach. W realizowanym przykładzie przeprowadzona zostanie dyskretyzacja konstrukcji przy wykorzystaniu trójwymiarowych elementów bryłowych typu C3D8R (elementy ośmiowęzłowe o 3 stopniach swobody w każdym węźle, z liniową funkcją kształtu oraz zredukowanym całkowaniem) oraz S4R (elementy powłokowe czterowęzłowe). Zagadnienie przebicia materiału, stanowi skomplikowany proces numeryczny, który jest ściśle związany z rozwiązaniem zagadnienia dynamicznego. W odniesieniu do zagadnień statycznych, gdzie czas analizy był pomijalny, w przypadku zagadnień dynamicznych definicja czasu realizowanego zagadnienia, stanowi parametr fundamentalny.

### 2.2 Budowa modelu geometrycznego – *moduł Part*

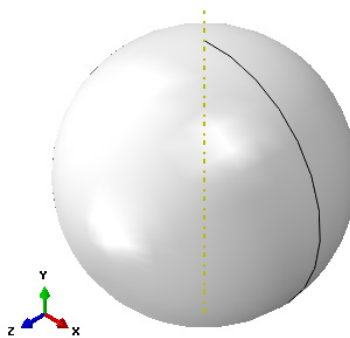
Model geometryczny próbki zostanie wykonany za pomocą narzędzia *Create Part* . Nazwę elementu należy zdefiniować jako *Kulka* oraz ustalić parametry geometryczne części jako element 3D, ciało odkształcalne typu *Deformable*, wykonane jako element powłokowy *Shell* metodą obrotu profilu *Revolution*, akceptując ustawienia poleceniem *Continue*. Po automatycznym przekierowaniu do szkicownika, należy skorzystać z opcji *Create Circle: Center and Perimeter* . Niezbędne wymiary w postaci promienia okręgu należy nanieść przy użyciu narzędzia *Add Dimension* . Po narysowaniu okręgu z początku układu współrzędnych istotne jest, żeby punkt końcowy rysowanego okręgu, był zgodny z kierunkiem osi X. Następnym etapem jest narysowanie pionowej linii w centralnej części okręgu. Szkic linii prostej należy wykonać przy wykorzystaniu jednego narzędzia *Create Lines: Connected* . Konieczne jest narysowanie linii w pionie względem osi Y, poczynając od najniższej położonego punktu na okręgu do najwyższej. Ostatni etap stanowi docięcie lewej części okręgu, celem dalszej możliwości obrotu jego fragmentu względem naszkicowanej pionowej linii. Niepotrzebną część okręgu należy przyciąć poleceniem *Auto-Trim* , poprzez zaznaczenie lewej zewnętrznej części okręgu, która ma zostać przycięta.

Na poniższym rysunku przedstawiono trzy etapowo tworzenie w pełni funkcjonalnego szkicu.



**Rys. 2.1.** Element *Kulka*: a) szkic okręgu, b) szkic pionowej linii wewnątrz okręgu, c) docięcie zbędnej lewej połowy okręgu

Po zatwierdzeniu środkowym klawiszem myszy narysowanego szkicu, lub poprzez wyłączenie polecenia *Auto-Trim*  $\dagger\dagger$ , należy wybrać z dolnej części okna projektowego opcję *Done*. Program poprosi o wprowadzenie kąta obrotu narysowanego półokręgu, względem pionowej linii stanowiącej oś obrotu. Przy parametrze *Angle* w nowo otwartym oknie, konieczne jest naniesienie wartości stanowiącej pełny kąt obrotu, który wynosi 360 stopni. Po zatwierdzeniu poleceniem *OK* wprowadzonego parametru, nastąpi wygenerowanie powłokowego elementu sferycznego.

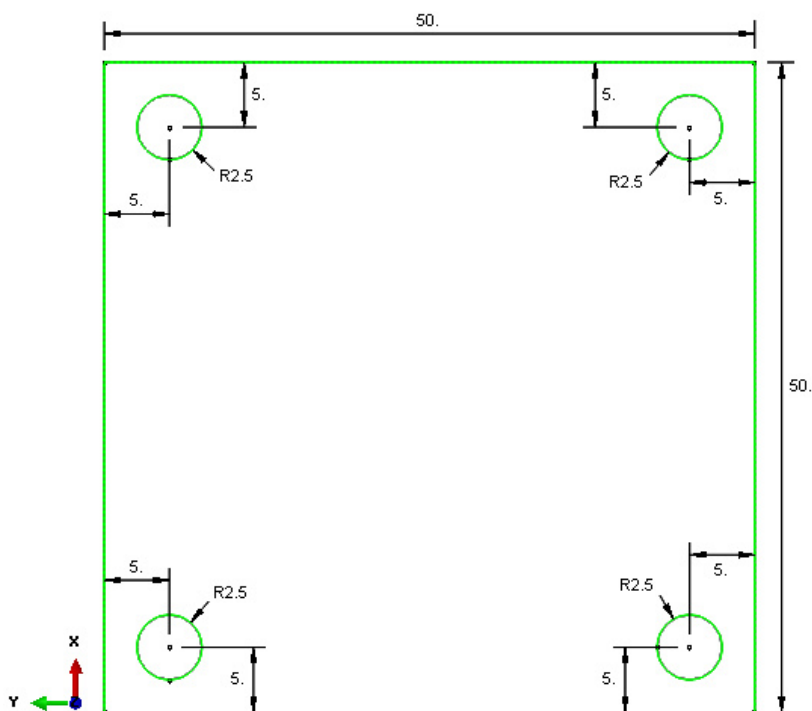


**Rys. 2.2.** Model przestrzenny elementu *Kulka*



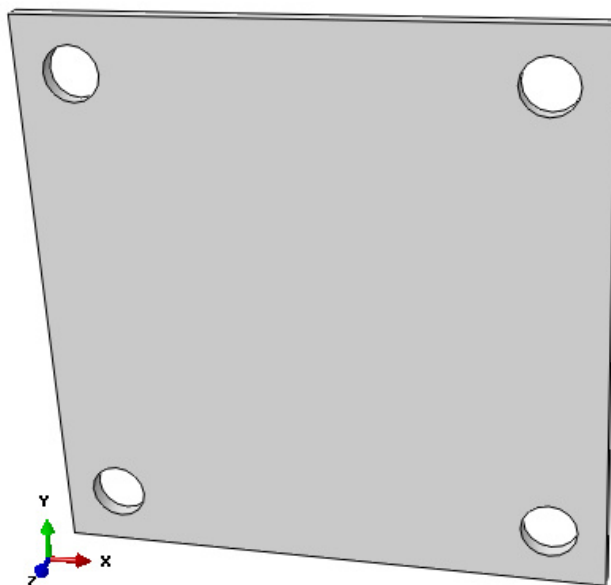
Następny etap stanowi wygenerowanie drugiej części w ramach modelowanego układu. Podzespół zostanie ponownie wykonany przy użyciu narzędzia *Create Part*. Nazwę elementu należy zdefiniować jako *Plyta* oraz ustalić parametry geometryczne części jako element *3D*, ciało odkształcalne typu *Deformable*, wykonane jako element bryłowy *Solid* metodą wyciągnięcia profilu *Extrusion*, akceptując ustawienia poleceniem *Continue*.

Szkic profilu części należy wykonać początkowo z wykorzystaniem narzędzia *Create Lines: Connected* lub ewentualnie *Create Lines: Rectangle*. Niezbędne wymiary należy nanieść przy użyciu narzędzia *Add Dimension*, natomiast edycji oraz modyfikacji wymiarów przeprowadzić narzędziem *Edit Dimension Value*, poprzez zaznaczenie danego wymiaru i zadeklarowanie poprawnej jego wartości. Dodatkowo należy skorzystać z opcji *Create Circle: Center and Perimeter*, celem naszkicowania czterech symetrycznie rozmieszczonych otworów, mieszczących się przy narożach próbki. Niezbędne wymiary w postaci promienia okręgu należy nanieść przy użyciu narzędzia *Add Dimension* oraz dodatkowo konieczność stanowi zwymiarowanie odległości otworów od krawędzi próbki. Poprawnie narysowany i zwymiarowany szkic powinien być zgodny z rys. 2.3.








Rys. 2.3. Sparаметryzowany szkic elementu *Plyta*

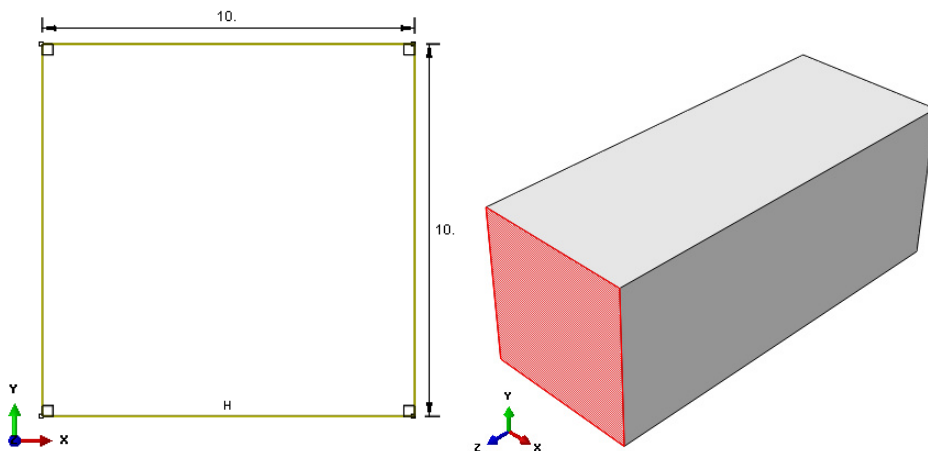
Po zatwierdzeniu narysowanego profilu poleceniem *Done* w nowo otwartym oknie należy wprowadzić długość wyciągnięcia *Depth: 1.5*, ustalając tym samym grubość modelu przestrzennego oraz zatwierdzając poleceniem *OK*. Wszelkie wymiary geometryczne dotyczące tworzenia modelu podane są w [mm].






Rys. 2.4. Model bryłowy elementu *Płyta*

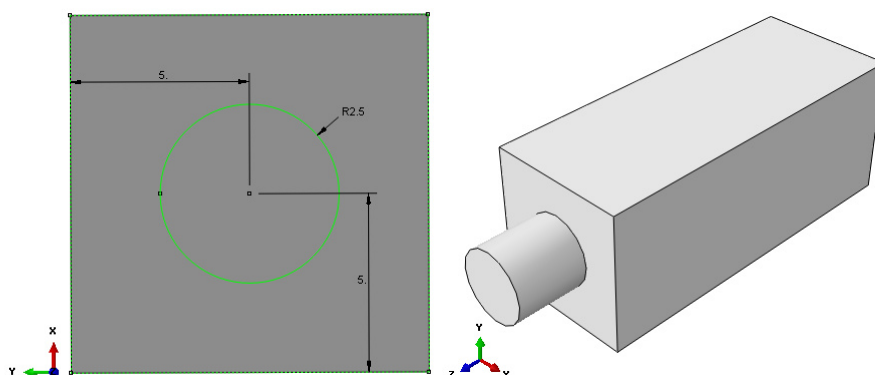
Następny etap stanowi wygenerowanie trzeciej części w ramach modelowanego układu. Podzespół zostanie ponownie wykonany przy użyciu narzędzia *Create Part* . Nazwę elementu należy zdefiniować jako *Podpora* oraz ustalić parametry geometryczne części jako element *3D*, ciało odkształcalne typu *Deformable*, wykonane jako element bryłowy *Solid* metodą wyciągnięcia profilu *Extrusion*, akceptując ustawienia poleceniem *Continue*.

Szkic profilu części należy wykonać z wykorzystaniem narzędzia *Create Lines: Connected* , lub ewentualnie *Create Lines: Rectangle* . Niezbędne wymiary należy nanieść przy użyciu narzędzia *Add Dimension* , natomiast edycji oraz modyfikacji wymiarów przeprowadzić narzędziem *Edit Dimension Value* , poprzez zaznaczenie danego wymiaru i zadeklarowanie poprawnej jego wartości. Po zatwierdzeniu narysowanego profilu poleceniem *Done* w nowo otwartym oknie należy wprowadzić długość wyciągnięcia *Depth: 25*, ustalając tym samym wysokość wyciągnięcia modelu oraz zatwierdzić *OK*. Poprawnie zwymiarowany szkic oraz model bryłowy powinien być zgodny z rys. 2.5.




Rys. 2.5. Szkic oraz model przestrzenny

Dalszy przebieg budowy elementu *Podpora*, związany jest z doprojektowaniem części na już istniejącej bryle. W tym celu konieczne jest użycie narzędzia *Create Solid: Extrude* , oraz wybranie powierzchni przedstawionej na rys. 2.5 kolorem czerwonym, a także dolnej krawędzi zgodnej z przebiegiem osi *X*. Po przekierowaniu do szkicownika należy skorzystać z opcji *Create Circle: Center and Perimeter*  oraz narysować odpowiedni profil okręgu. Niezbędne wymiary należy nanieść przy użyciu narzędzia *Add Dimension* . Po zatwierdzeniu narysowanego profilu poleceniem *Done*, w nowo otwartym oknie należy wprowadzić długość wyciągnięcia *Depth: 5* oraz zatwierdzić poleceniem *OK*. Sparametryzowany szkic oraz kompletny model bryłowy z dodatkowym wyciągnięciem przedstawiono na rys. 2.6.




Rys. 2.6. Szkic oraz zmodyfikowany model przestrzenny


## 2.3 Definicja właściwości materiałowych – *moduł Property*


Właściwości materiałowe przypisuje się w module *Property* poprzez użycie opcji *Create Material* . W nowo otwartym oknie następuje określenie nazwy materiału jako *Aluminium*. Następnie, należy przejść do zakładki *Mechanical/Elasticity/Elastic*, w celu określenia podstawowych cech opisujących materiał. Moduł odkształcalności liniowej wynosi *Young's Modulus: 70000* [MPa] oraz współczynnik Poissona stanowiący stosunek odkształcenia poprzecznego do podłużnego *Poisson's Ratio: 0.33*. Po wprowadzeniu danych należy bezpośrednio przejść do zakładki *Mechanical/Plasticity/Plastic*. W pierwszym wierszu w opcji *Yield Stress* należy nanieść wartość granicy plastyczności materiału wynoszącą w tym przypadku 250 [MPa], natomiast odkształcenie plastyczne, odpowiadające poziomowi granicy plastyczności *Plastic Strain* wynosi 0. Po przejściu klawiszem *Enter* z klawiatury do drugiego wiersza, należy zdefiniować *Yield Stress* jako granicę wytrzymałości materiału równą 300 [MPa], przy odpowiadającym jej wydłużeniu plastycznym próbki przy zerwaniu wynoszącym 9%, które musi być zdefiniowane liczbowo w podopcji *Plastic Strain* jako 0.09. Z uwagi na realizację zagadnienia dynamicznego, niezbędne jest określenie gęstości materiału. Celem określenia pożądanej gęstości, należy przejść do zakładki *General/Density*. W polu *Mass Density*, konieczne jest wpisanie gęstości w poprawnej jednostce. Z uwagi na to iż model był tworzony w [mm], gęstość musi być podana w jednostce zgodnej jako [t/mm<sup>3</sup>]. Gęstość z reguły podawana jest w jednostce [kg/m<sup>3</sup>], jednak do celów numerycznych poprawnie zamodelowanego procesu, niezbędne jest przeliczenie 2700 [kg/m<sup>3</sup>] na poprawny typ jednostki. W omawianym polu należy nanieść wartość 2.7E-009. Finalnie poza trzema już wprowadzonymi właściwościami, konieczne jest zdefiniowanie właściwości niszczących materiału *Aluminium*. Definicja właściwości niszczących odbywa się po przejściu do opcji *Mechanical/Damage for Ductile Metals/Ductile Damage*. W odniesieniu do wybranej opcji, należy wprowadzić szereg zależności pomiędzy odkształceniami i naprężeniami niszczącymi. Początkowo możliwe jest określenie stopnia ewolucji zniszczenia materiału w ramach podopcji o nazwie *Suboptions/Damage Evolution* w prawej części nowo otwartego okna. W komórce określonej jako *Displacement at Failure*, należy nanieść wartość 0.001, stanowiącą parametr określający zachodzące zniszczenie, na skutek wystąpienia przemieszczeń większych od wartości zadeklarowanej w obrębie badanego materiału, podczas procesu uderzenia. Po zatwierdzeniu naniesionego parametru poleceniem *OK*, należy przejść do szczegółowej definicji zniszczenia materiału. Szereg wartości niezbędnych do naniesienia w odpowiednich komórkach przedstawiono na poniższym rysunku.



	Fracture Strain	Stress Triaxiality	Strain Rate
1	33	-3.33	0.01
2	33	-0.33	0.01
3	23	-0.26	0.01
4	16.5	-0.2	0.01
5	11.5	-0.13	0.01
6	8.1	-0.06	0.01
7	5.7	0	0.01
8	4.1	0.06	0.01
9	2.8	0.13	0.01
10	2	0.2	0.01
11	1.4	0.26	0.01
12	1	0.33	0.01
13	0.7	0.4	0.01
14	0.5	0.46	0.01
15	0.38	0.53	0.01
16	0.61	1	0.01
17	7.5	3.33	0.01



Rys. 2.7. Właściwości dotyczące zniszczenia materiału

Po wprowadzeniu powyżej przedstawionych parametrów należy użyć polecenia *OK*. Konieczne jest zbudowanie drugiego modelu materiałowego, w związku, z czym należy ponownie użyć opcji *Create Material* . W nowo otwartym oknie następuje określenie nazwy materiału jako *Stal*. W zakładce *Mechanical/Elasticity/Elastic*, niezbędne jest określenie podstawowych parametrów charakteryzujących materiał. Moduł odkształcalności liniowej wynosi *Young's Modulus: 210000* [MPa] oraz współczynnik Poissona stanowiący stosunek odkształcenia poprzecznego do podłużnego *Poisson's Ratio: 0.3*. Po wprowadzeniu powyższych danych należy bezpośrednio przejść do narzędzia *Mechanical/Plasticity/Plastic*. W pierwszym wierszu w opcji *Yield Stress* należy nanieść wartość granicy plastyczności materiału wynoszącą w tym przypadku 360 [MPa], natomiast odkształcenie plastyczne, odpowiadające poziomowi granicy plastyczności *Plastic Strain* wynosi 0. Po przejściu klawiszem *Enter* z klawiatury do drugiego wiersza, należy zdefiniować *Yield Stress* jako granicę wytrzymałości materiału równą 510 [MPa], przy odpowiadającym jej wydłużeniu plastycznym próbki przy zerwaniu wynoszącym 15%, które musi być zdefiniowane liczbowo w podopcji *Plastic Strain* jako 0.15. Z uwagi na realizację zagadnienia dynamicznego, niezbędne jest określenie gęstości materiału. W tym celu, należy przejść do zakładki *General/Density*. W polu *Mass Density*, konieczne jest wpisanie gęstości wynoszącej 7.86E-009. Zdefiniowanie w opisany sposób wszystkich cech materiałowych, należy zakończyć poleceniem *OK*.

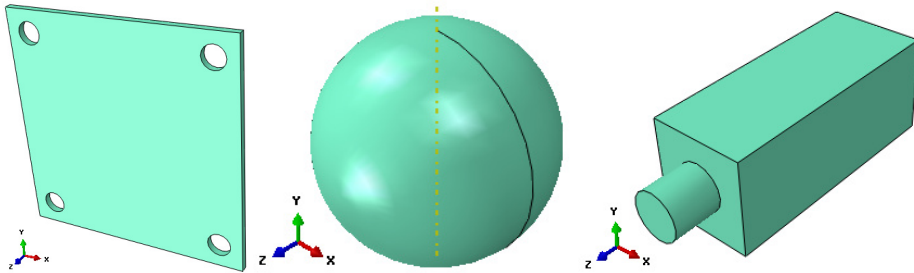
W ramach następnego etapu należy utworzyć sekcje z odpowiednio przypisanymi właściwościami materiałowymi za pomocą narzędzia *Create Section* , przypisując nazwę pierwszej z sekcji jako *Aluminium* oraz właściwości *Solid/Homogeneous*, zatwierdzając wprowadzone dane poleceniem *Continue*. W nowo otwartym oknie należy wybrać *Material: Aluminium*, zatwierdzając *OK*.

Utworzoną w powyższy sposób sekcję należy przypisać do wykonanego modelu o nazwie *Płyta*, wybierając kolejno nad ekranem roboczym w okienku *Part* poszczególną część i wykorzystując narzędzie *Assign Section* . Po zaznaczeniu odpowiedniej części i zatwierdzeniu wyboru poleceniem *Done*, należy wybrać odpowiednią sekcję *Aluminium* o typie *Solid* i zaakceptować przypisanie sekcji poleceniem *OK*.

W odniesieniu do kolejnego zaprojektowanego elementu *Kulka*, należy utworzyć sekcję z odpowiednio przypisanymi właściwościami materiałowymi za pomocą narzędzia *Create Section* , przypisując nazwę następnej sekcji jako *Stal* oraz właściwości *Shell/Homogeneous*, zatwierdzając wprowadzone dane poleceniem *Continue*. W nowo otwartym oknie należy wybrać *Material: Stal* oraz *Shell thickness Value: 0.1*, zatwierdzając *OK*. W przypadku przypisania sekcji do elementu o nazwie *Kulka*, konieczny jest wybór nad ekranem roboczym w okienku *Part*, odpowiedniej części oraz ponowne zastosowanie narzędzia *Assign Section* . Po zaznaczeniu części o nazwie *Kulka* w przestrzeni roboczej i zatwierdzeniu wyboru poleceniem *Done*, należy w nowo otwartym oknie zdefiniować typ sekcji jako *Stal* – o składowym typie sekcji *Shell*. Okno przypisywania sekcji materiałowej do elementu *Kulka*, należy zatwierdzić poleceniem *OK*.

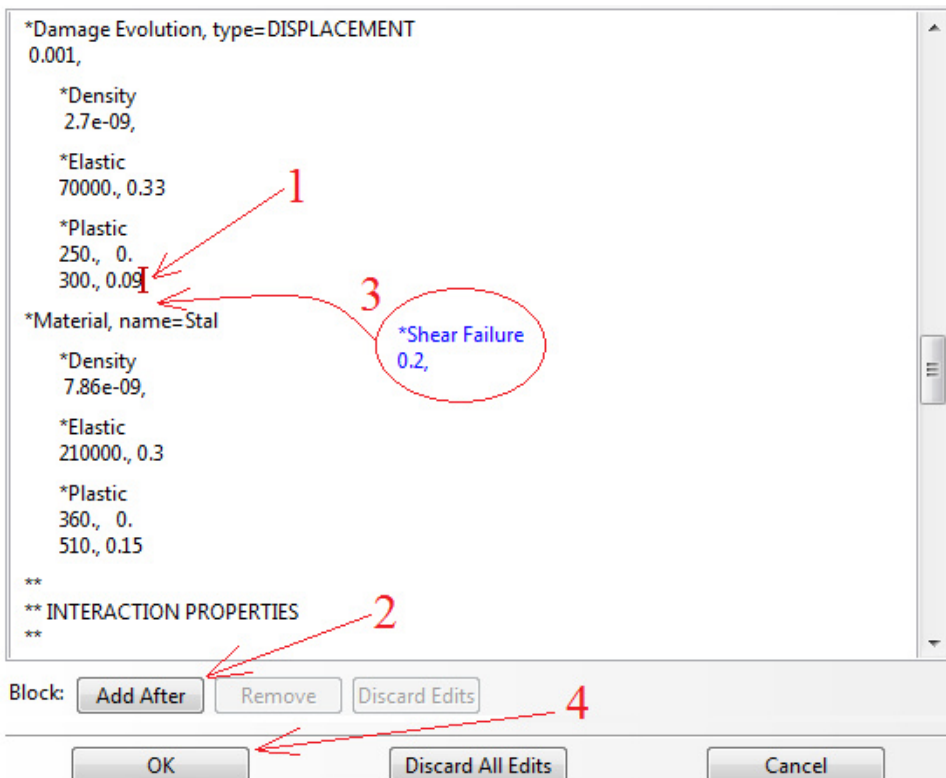
W przypadku ostatniego zaprojektowanego elementu *Podpora*, należy utworzyć sekcję z odpowiednio przypisanymi właściwościami materiałowymi za pomocą narzędzia *Create Section* , przypisując nazwę następnej sekcji jako *Stal\_2* oraz właściwości *Solid/Homogeneous*, zatwierdzając wprowadzone dane poleceniem *Continue*. W nowo otwartym oknie należy wybrać *Material: Stal*, zatwierdzając *OK*. W przypadku przypisania sekcji do elementu o nazwie *Podpora*, konieczny jest wybór nad ekranem roboczym w okienku *Part*, odpowiedniej części oraz ponowne zastosowanie narzędzia *Assign Section* . Po zaznaczeniu części o nazwie *Podpora* w przestrzeni roboczej i zatwierdzeniu wyboru poleceniem *Done*, należy w nowo otwartym oknie zdefiniować typ sekcji jako *Stal\_2* – o składowym typie sekcji *Solid*. Okno przypisywania sekcji materiałowej do elementu *Podpora*, należy zatwierdzić poleceniem *OK*.

Po zdefiniowaniu odpowiednich sekcji względem wszystkich utworzonych elementów, modele powinny automatycznie zmienić kolor na zielony, co jednocześnie oznacza relację poprawnego przypisania wcześniej określonych właściwości fizycznych.



Rys. 2.8. Przypisanie cech materiałowych do elementów



Dodatkowo, konieczne jest zdefiniowanie współczynnika uszkodzenia pod wpływem ścinania. Celem definicji parametru niezbędne jest przejście do zakładki *Model/Edit Keywords/Model-1*, po czym w nowo otwartym oknie, należy przy użyciu dostępnego suwaka przemieścić się do treści zgodnych z rys. 2.9 oraz wykonać modyfikację według dalszego opisu.

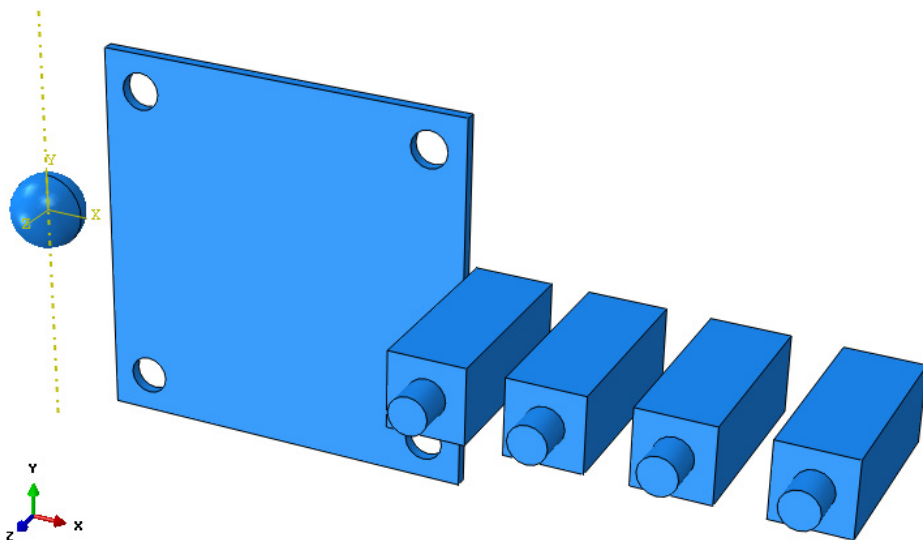


Rys. 2.9. Definicja uszkodzenia na skutek ścinania

Początkowo konieczne jest zaznaczenie kursorem myszy miejsca zgodnego z pierwszym krokiem definicji – 1. Następnie należy wybrać polecenie *Add After* – 2, celem naniesienia pożądanego parametru uszkodzenia. Kolejny etap stanowi wprowadzenie danych zgodnych z trzecim krokiem – 3. Ostatecznie należy dokonać zatwierdzenia wprowadzonej właściwości uszkodzenia na skutek ścinania poleceniem *OK* – 4, znajdującej się w dolnej części okna roboczego. Wszelkie etapy definicji są zgodne z kolejnością postępowania, przedstawioną na rys. 2.9, co stanowi pełny proces przypisywania modelu materiałowego.


## 2.4 Tworzenie instancji części – *moduł Assembly*

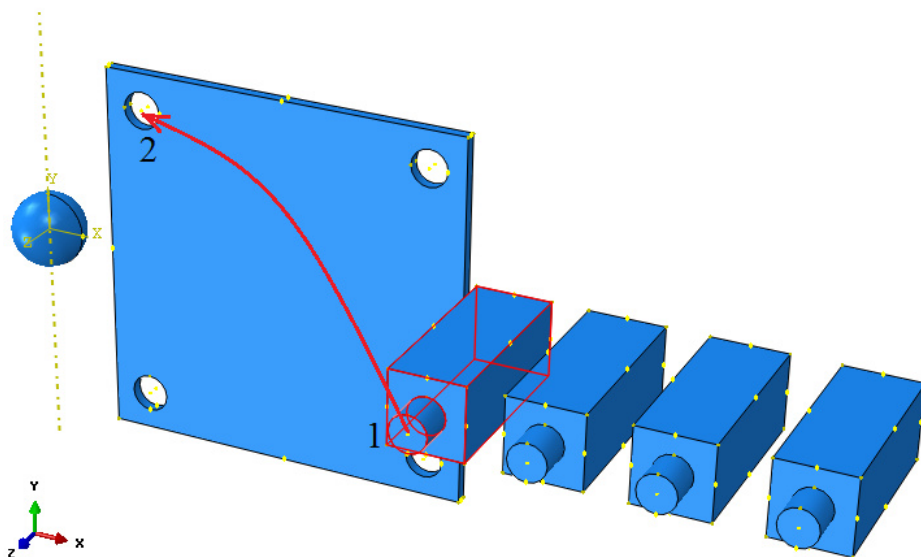
W bieżącym module należy dokonać utworzenia instancji wykonanych elementów. Model numeryczny składa się z trzech różnych podzespołów. W celu wczytania poszczególnych elementów należy wykorzystać narzędzie *Create Instance* , zaznaczając w oknie listy części dzięki przytrzymaniu klawisza *Shift* z klawiatury element *Kulka*, *Płyta* oraz *Podpora* przy uwzględnieniu opcji *Auto -offset from other instances*, co finalnie należy zatwierdzić poleceniem *OK*. Dodatkowo, konieczne jest trzykrotne powtórzenie wczytania elementu *Podpora*, przy użyciu opcji *Create Instance* . Instancje części przedstawiono na rys. 2.10.




Rys. 2.10. Wstawienie instancji części

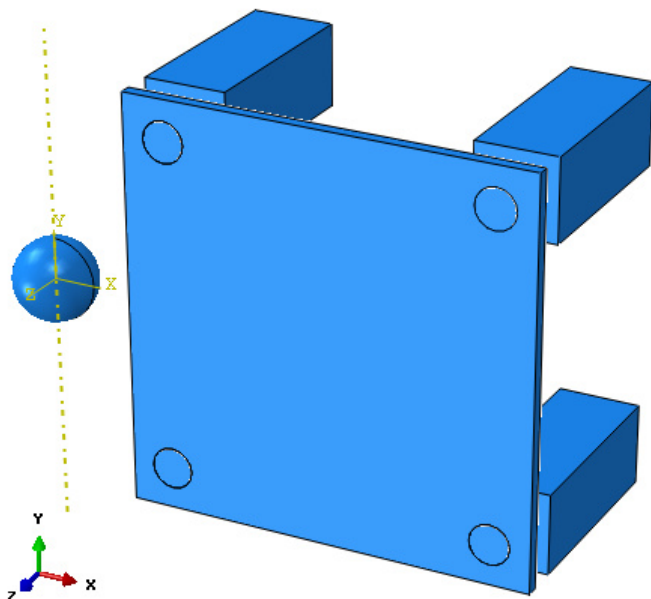


W ramach modułu *Assembly* konieczne jest dokonanie złożenia wstawionych instancji. Po wczytaniu elementów należy je złożyć odpowiednio w przestrzeni, używając opcji *Translate Instance* , a następnie wybrać jeden z elementów *Podpora* oraz zatwierdzić opcją *Done*. Po tej operacji pojawią się punkty charakterystyczne na wszystkich elementach. Należy wybrać odpowiedni punkt z jednego elementu względem punktu na drugim elemencie, zgodnie z poniższym rys. 2.11 i wybrać polecenie *OK*, aby nastąpiło odpowiednie złożenie.




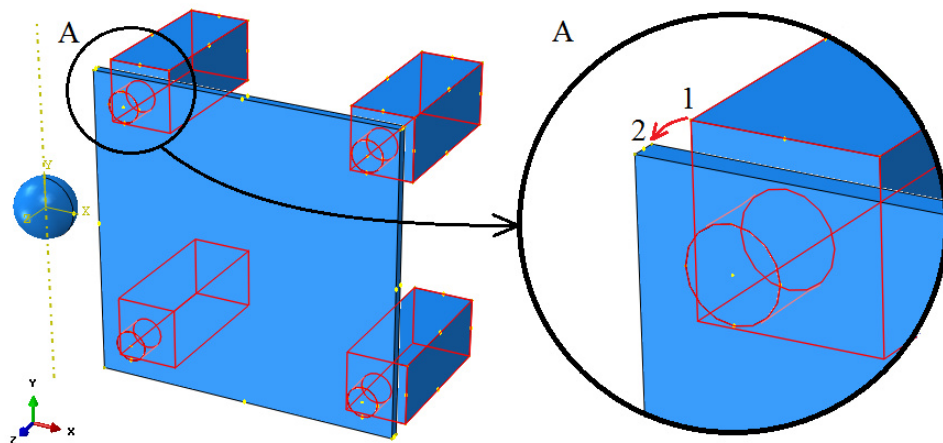
**Rys. 2.11.** Wybór punktów względem pierwszej translacji

Dalszy etap stanowi wykonanie analogicznych translacji pozostałych trzech elementów *Podpora*, do pozostałych otworów, przy dowolnej kolejności. Przy trzykrotnym użyciu opcji *Translate Instance* , należy wybierać pojedynczo pozostałe jednakowe części oraz ustawiać je w przestrzeni w sposób zgodny z realizacją pierwszej translacji. Po dokonaniu wszystkich analogicznych przemieszczeń podzespołów całego modelu, niezbędne będzie dalsze przeprowadzenie czynności złożeniowych na wszystkich jednocześnie elementach *Podpora*, względem głównego podzespołu o nazwie *Płyta*. Po zrealizowaniu omawianych translacji graficzna prezentacja przeprowadzonych czynności będzie adekwatna do postaci częściowego złożenia, którą przedstawiono na rys. 2.12.



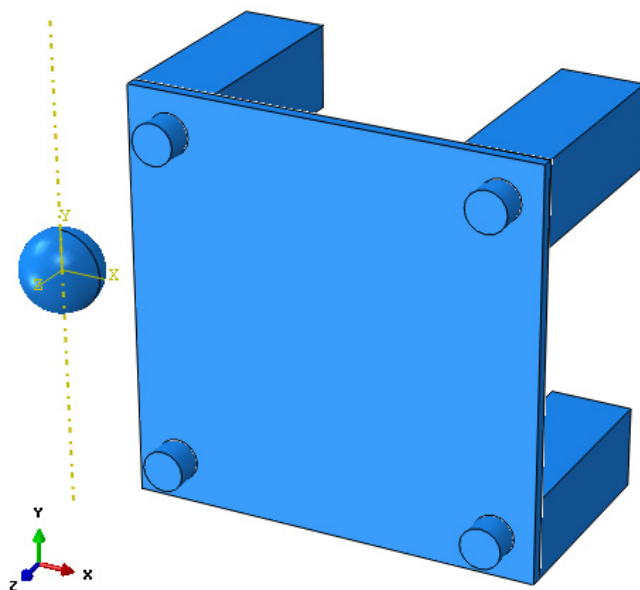
Rys. 2.12. Graficzna prezentacja modelu po szeregu dokonanych translacji

Kolejny etap stanowi wspomniane wcześniej przeprowadzenie translacji zbiorowej w odniesieniu do czterech elementów *Podpora*. Używając opcji *Translate Instance* , należy wybrać z wciśniętym klawiszem *Shift*, wszystkie cztery jednakowe części, po czym wybór zbiorczy zatwierdzić poleceniem *Done*. Następnie, konieczność stanowi wybór odpowiednich punktów dostępnych z szeregu punktów w przestrzeni roboczej, celem przeprowadzenia odpowiedniego jednoczesnego przemieszczenia kilku podzespołów. Należy wybrać odpowiedni punkt z przestrzeni roboczej, bezpośrednio przyporządkowany do elementu *Podpora*, po czym konkretny punkt przynależny do elementu *Płyta*. Kolejność wyboru punktów ma znaczenie, zatem nie można postępować w żadnym wypadku zamiennie. Konsekwencją dobrze zrealizowanej translacji czterech jednakowych elementów względem głównej części, będzie możliwość dalszego przypisywania wszelkich cech kontaktowych, pomiędzy współzależnymi elementami złożenia. Graficzna prezentacja wyboru odpowiednich punktów, wraz ze szczegółowym przedstawieniem poprawnej kolejności postępowania, w ramach realizowanej translacji obiektów, została przedstawiona na rys. 2.13.





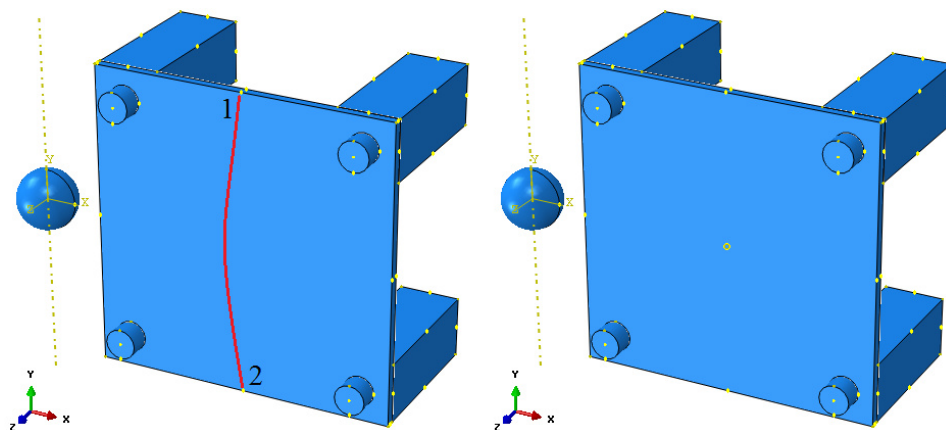
**Rys. 2.13.** Wybór punktów w ramach zbiorowej translacji

Po określeniu punktów do translacji oraz zatwierdzeniu wyboru poleceniem *OK* w dolnej części okna roboczego, postać złożenia, będzie zgodna z rys. 2.14.




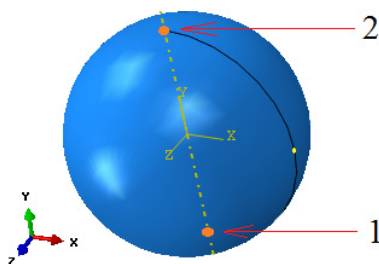
**Rys. 2.14.** Graficzna prezentacja modelu po zrealizowanej translacji

Następnie konieczne jest utworzenie punktu w centralnej części elementu *Płyta*. Niezbędne jest wybranie i przytrzymanie lewym klawiszem myszy opcji *Create Datum Point: Enter Coordinates* , po czym w ramach wyboru podopcji *Create Datum Point: Midway Between 2 Points* , należy zaznaczyć dwa punkty, pomiędzy którymi zostanie wygenerowany nowo utworzony kolejny punkt. Wybór punktów należy przeprowadzić zgodnie z rys. 2.15, na którym jednocześnie przedstawiono miejsce utworzenia punktu.




**Rys. 2.15.** Wybór punktów do utworzenia punktu centralnego wraz z jego przedstawieniem

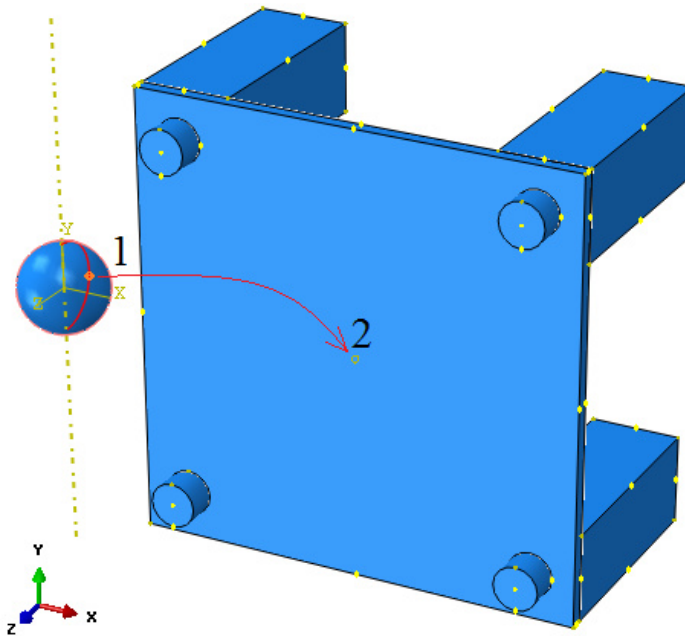
Celem możliwości dalszego przeprowadzania złożenia, niezbędne będzie początkowo obrócenie elementu *Kulka* względem osi *Y* o  $90^\circ$ . Konieczne jest użycie opcji *Rotate Instance* , zaznaczenie omawianego podzespołu oraz wybranie polecenia *Done*. Kolejny krok stanowi wybór dwóch punktów celem obrotu elementu. Punkty powinny być wybrane w kolejności przedstawionej na rys. 2.16.



**Rys. 2.16.** Wybór punktów do obrotu części

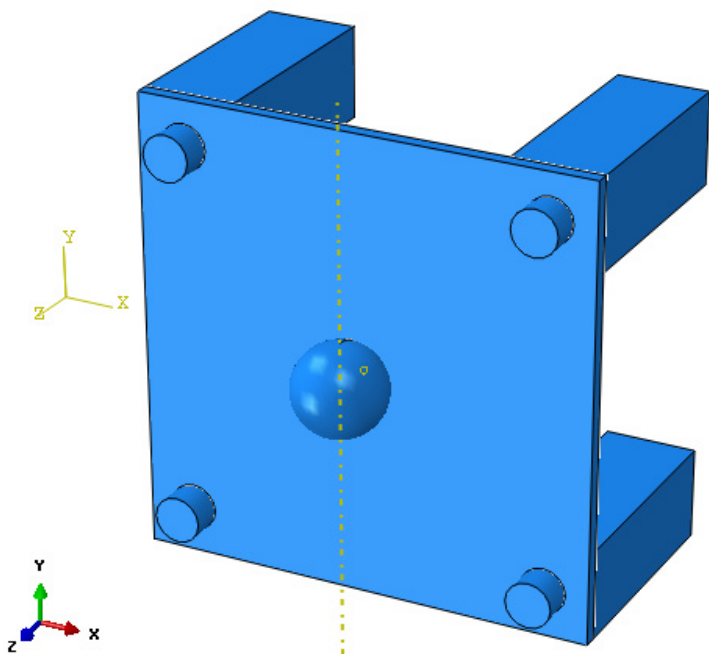
Po wyborze odpowiednich punktów, w dolnej części okna roboczego, pojawi się komenda *Angle of rotation: 90*, co akurat odpowiada kątowi obrotu, o jaki należy obrócić element. Finalnie, należy dokonać akceptacji klawiszem *Enter* oraz wybrać polecenie *OK* znajdujące się w dolnej części okna roboczego.

Kolejny etap stanowi umieszczenie skrajnego punktu elementu *Kulka*, znajdującego się na osi *Z*, w centralnej części elementu *Płyta*. Przy użyciu opcji *Translate Instance* , należy wybrać element *Kulka* oraz zatwierdzić opcję *Done*. Po tej operacji pojawią się punkty charakterystyczne na wszystkich elementach. Należy wybrać w odpowiedniej kolejności punkt z jednego elementu względem punktu na drugim elemencie i wybrać polecenie *OK*, aby nastąpiło odpowiednie złożenie, zgodnie z rys. 2.17.




**Rys. 2.17.** Wybór punktów do translacji części

Wybór punktów w zadanej kolejności zgodnej z rysunkiem, pozwoli na precyzyjne usytuowanie ostatniego z elementów w przestrzeni roboczej. Po przeprowadzeniu odpowiedniej, a zarazem ostatniej translacji, przygotowany model przestrzenny w odniesieniu do zrealizowanego złożenia, powinien być zgodny z rys. 2.18, na którym zawarto graficzną prezentację całego złożenia.




Rys. 2.18. Kompletnie złożenie modelu

## 2.5 Definicja analizy numerycznej – *moduł Step*

Analiza numeryczna przeprowadzona zostanie jako zadanie dynamiczne. Wybierając narzędzie *Create Step* , należy ustalić nazwę kroku obliczeniowego jako *Dynamika* i wybrać typ analizy jako *Dynamic, Explicit* oraz zatwierdzić wybór poleceniem *Continue*. W nowo otwartym oknie w pierwszej z zakładek *Basic*, należy nanieść wyłącznie wartość czasu trwania analizy numerycznej w polu *Time period: 0.015* oraz włączyć opcję *Nlgeom* na *ON*. Podana wartość jest wyrażona w sekundach. Ze względu na długi okres oczekiwania towarzyszący skomplikowanym obliczeniom dynamicznym, czas analizy jest możliwie najkrótszy oraz wcześniejsze złożenie uwzględnia od razu styk elementu *Kulka* z uderzonym elementem *Płyta*. W trzeciej z zakładek *Mass scaling*, konieczne jest użycie opcji *Use scaling definitions below* oraz wybranie w dolnej części otwartego okna roboczego polecenia *Create*. W okienku *Scale by factor*, należy nanieść wartość *625* oraz zatwierdzić opcją *OK*. Okno związane z określaniem procesu dynamicznego również powinno być zaakceptowane poleceniem *OK*. Zgodnie z zasadą przyspieszenia procesu obliczeniowego związanego ze skalowaniem masy obiektów poddanych procesom dynamicznym, naniesiona wartość skalowania ma wpływ na przebieg samej analizy i otrzymany

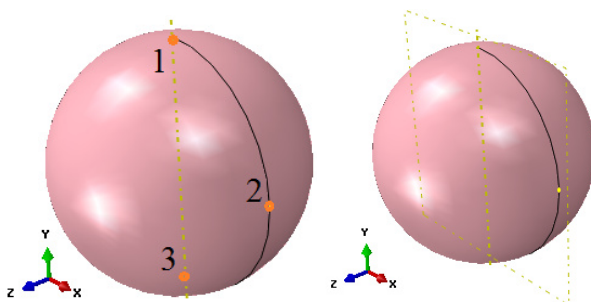
wynik powinien zostać przeanalizowany. W przypadku wykorzystywania w obliczeniach procesu skalowania masy, przyspieszy znacząco realizacja obliczeń. Skalowanie masy, często wiąże się z występowaniem niepożądanych błędów numerycznych, jednak przy niewielkim współczynniku skalowania, błędy symulacyjne są często niezauważalne.

Dodatkowo w ramach opcji *Field Output Manager* , należy wybrać opcję *Created* (dwukrotnym kliknięciem myszy), po czym z okna dostępnych wyników wybrać dodatkowo z opcji *Failure/Fracture* podopcję *DMICRT*. Podobnie z opcji *State/Field/User/Time*, należy wybrać podopcję *STATUS* oraz wszelkie wybory zatwierdzić poleceniem *OK*, a także następnie poleceniem *Dismiss* zamknąć kolejne okno. Wybór powyższych opcji pozwoli na odwzorowanie procesu przebiecia w ramach elementu *Płyta*.

Po zdefiniowaniu typu realizowanej analizy, niezbędne jest wcześniejsze przejście do modułu związanego z dyskretyzacją modelu numerycznego oraz przeprowadzeniu procesu partycjonowania, celem uniknięcia komunikatów o błędach w ramach definiowania interakcji i warunków brzegowych.

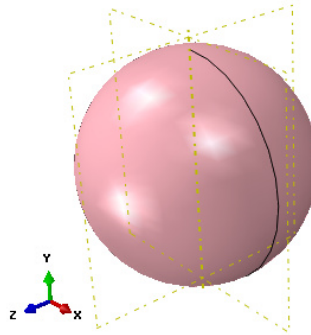
## 2.6 Budowa siatki elementów skończonych – *moduł Mesh*

Proces dyskretyzacji odbędzie się kilku etapowo. Początkowo niezbędne jest przeprowadzenie odpowiedniego partycjonowania, w odniesieniu do zaprojektowanych elementów. Za pomocą zrealizowanego podziału elementów na mniejsze regularne geometrycznie podobne, możliwe będzie przypisanie najlepszego dostępnego równomiernie rozłożonego typu siatki. Należy wybrać z górnej części programu zakładkę *Object: Part: Kulka*, tak by został wyświetlony tylko element *Kulka*. Z zakładki zawartej w górnej części programu, należy wybrać kolejno *Tools/Datum/Plane/3 points*. Po wyborze punktów zgodnych z poniższym rysunkiem, zostanie utworzona pierwsza płaszczyzna podziału.





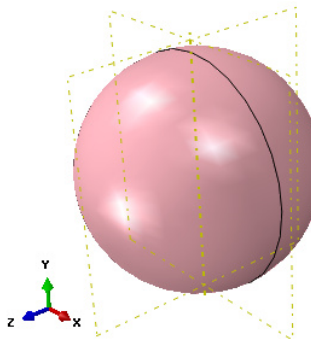
Rys. 2.19. Tworzenie pierwszej płaszczyzny podziału

Następnym etapem jest wybór z dostępnego okna *Create Datum*, opcji *Rotate from plane*. Po wyborze omawianej opcji, konieczne jest wybranie pierwszej utworzonej płaszczyzny podziału oraz kolejno osi elementu sferycznego. Pojawienie się w dolnej części okna roboczego programu komunikatu *Angle of rotation: 90*, świadczy o wykonaniu drugiej płaszczyzny podziału elementu obróconej o  $90^\circ$ , względem pierwszej, co finalnie należy akceptować klawiszem *Enter*. Wizualizacja elementu z obydwoma płaszczyznami podziału została przedstawiona na rys. 2.20.



Rys. 2.20. Tworzenie drugiej płaszczyzny podziału

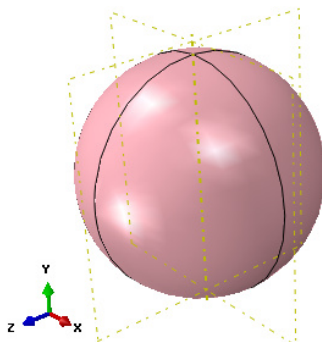
Ostatni etap stanowi wykonanie partycji, przy użyciu utworzonych uprzednio płaszczyzn podziału. W celu utworzenia odpowiednich partycji konieczne jest przytrzymanie lewym klawiszem myszy opcji *Partition Face: Sketch* , oraz wybór dostępnej podopcji *Partition Face: Use Datum Plane* . Po wyborze wskazanej opcji, należy dokonać wyboru pierwszej z dwóch dostępnych płaszczyzn podziału elementu, przy czym operację sfinalizować opcją *Create Partition*. Wykonanie partycji powinno być zgodne z rys. 2.21.




Rys. 2.21. Utworzenie pierwszej partycji





Następnym krokiem jest dokonanie wyboru całej powierzchni sferycznej, zatwierdzenie wyboru opcją *Done* oraz podział drugą płaszczyzną podziału, sfinalizowany użyciem polecenia *Create Partition*. Graficzna prezentacja w ramach wykonania drugiej partycji została przedstawiona na rys. 2.22.




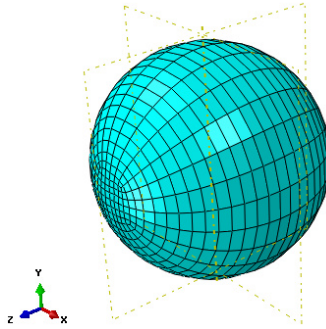
Rys. 2.22. Utworzenie drugiej partycji

Proces przypisania siatki sprowadza się początkowo do wykorzystania narzędzia *Assign Mesh Controls* , przy czym niezbędne jest zaznaczenie całego elementu *Kulka* oraz zatwierdzenie poleceniem *Done*. W nowo otwartym oknie konieczność stanowi ustawienie parametrów siatki na *Quad/Free* z algorytmem jej tworzenia względem osi centralnej modelu *Medial axis* oraz zatwierdzenie całości poleceniem *OK*.


Za pomocą opcji *Seed Part* , należy ustalić globalną gęstość siatki dyskretyzowanej części w poleceniu *Approximate global size* na wartość *0.5* i zatwierdzić poleceniem *OK*.

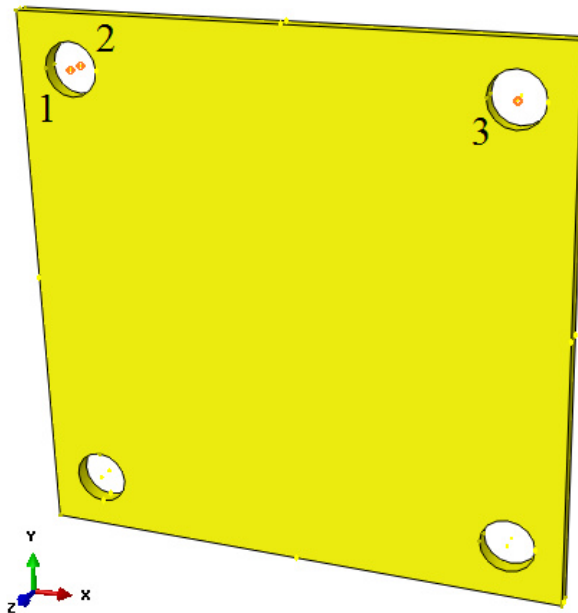
Przy pomocy narzędzia *Assign Element Type* , konieczne jest określenie typu elementów skończonych opisujących siatkę dyskretyzowanej części. Należy dokonać zaznaczenia całego elementu *Kulka* oraz zatwierdzić wybór poleceniem *Done*. W nowo otwartym oknie kolejno wybrać *Element Library: Explicit* o typie elementu z dostępnej listy *Shell* oraz liniowej funkcji kształtu *Geometric Order: Linear*, przy czym pozostałe opcje bez zmian. Okno należy zamknąć poleceniem dostępnym w jego dolnej części o nazwie *OK*.

Ostatni etap stanowi przypisanie zdefiniowanej siatki. W tym celu wykorzystując narzędzie *Mesh Part* , i zatwierdzając wybór polecenia opcją dostępną w dolnej części okna roboczego *Yes*, nastąpi przypisanie siatki elementów skończonych na cały element *Kulka*. Opisywany element po procesie dyskretyzacji będzie zaprezentowany zgodnie z rys. 2.23.



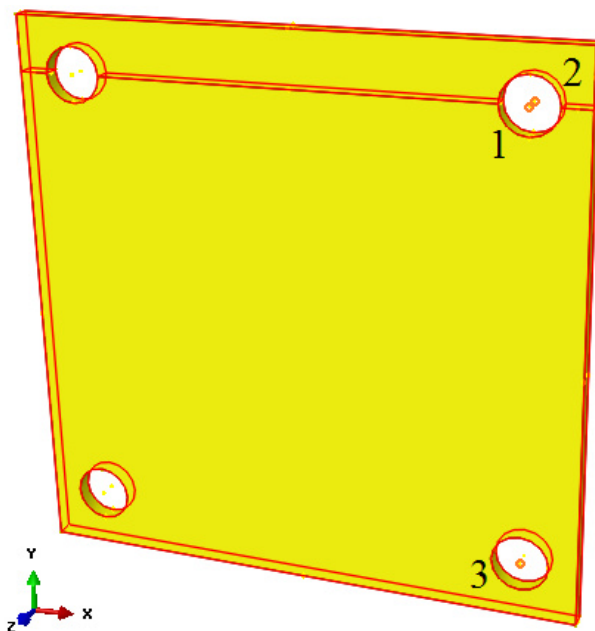
Rys. 2.23. Model dyskretny elementu *Kulka*

Kolejny etap stanowi dyskretyzacja części o nazwie *Płyta*. Należy wybrać w górnej części programu zakładkę *Object: Part: Płyta*, tak by został wyświetlony tylko element *Płyta*. Następnie konieczne jest użycie opcji *Partition Cell: Define Cutting Plane* . Z dolnej części okna roboczego z dostępnych trzech opcji, niezbędne jest wybranie środkowej *3 Points*. Po wybraniu trzech punktów, celem utworzenia płaszczyzny podziału, finalnie wybór zgodny z rys. 2.24, należy zaakceptować poleceniem *Create Partition*.



Rys. 2.24. Wybór punktów w ramach pierwszej partycji

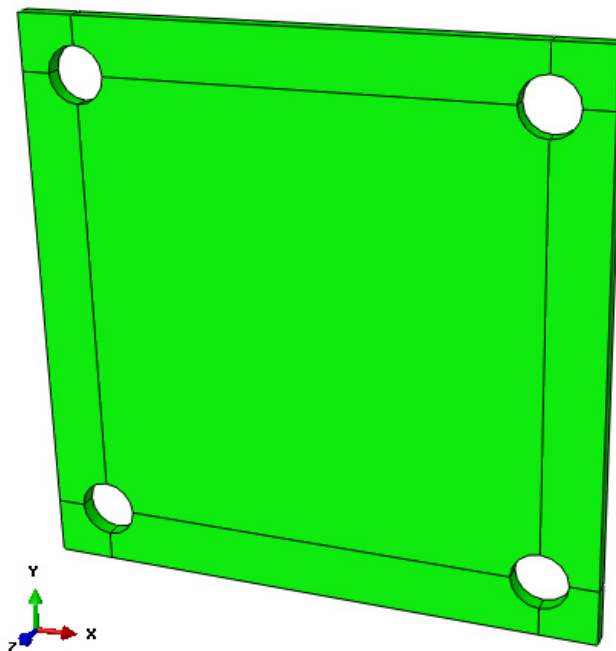
Następnie konieczne jest zaznaczenie całego modelu, części oddzielonej partycją, a także niepodzielonej oraz wybranie z dolnej części okna roboczego polecenia *Done*. Ponownie należy wybrać opcję podziału *3 Points*, po czym wybrać trzy kolejne punkty, zgodne z rys. 2.25 oraz użyć finalnie polecenia *Create Partition*.




Rys. 2.25. Wybór punktów w ramach drugiej partycji

Analogicznie należy postąpić w przypadku dwóch kolejnych partycji, zatem konieczne jest ponowne zaznaczenie całego modelu, zarówno części oddzielonych partycjami, a także części niepodzielonej oraz wybranie z dolnej części okna roboczego polecenia *Done*. Ponownie należy wybrać opcję podziału *3 Points*, po czym wybrać trzy kolejne punkty, związane tym razem z dwoma dolnymi okręgami (nie stanowi różnicy czy zostaną wybrane najpierw dwa punkty tworzące oś okręgu w prawej dolnej części modelu, czy okręgu znajdującego się w lewej dolnej części modelu, a następnie dowolny punkt z osi kolejnego z okręgów) oraz użyć finalnie polecenia *Create Partition*.

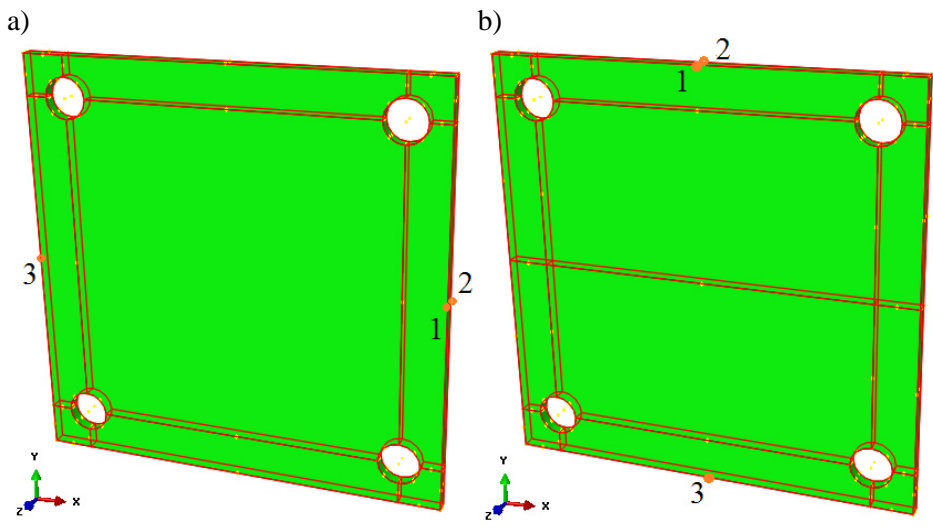
Proces partycjonowania należy powtórzyć ponownie, celem wygenerowania ostatniej partycji, przy użyciu tych samych opcji, co w przypadku poprzednich partycji. Jedyną różnicą to wybór odpowiednich punktów zawartych w ramach osi okręgów znajdujących się w dolnej i górnej lewej części elementu *Płyta*. Po kompletnym partycjonowaniu model będzie zgodny z rys. 2.26.



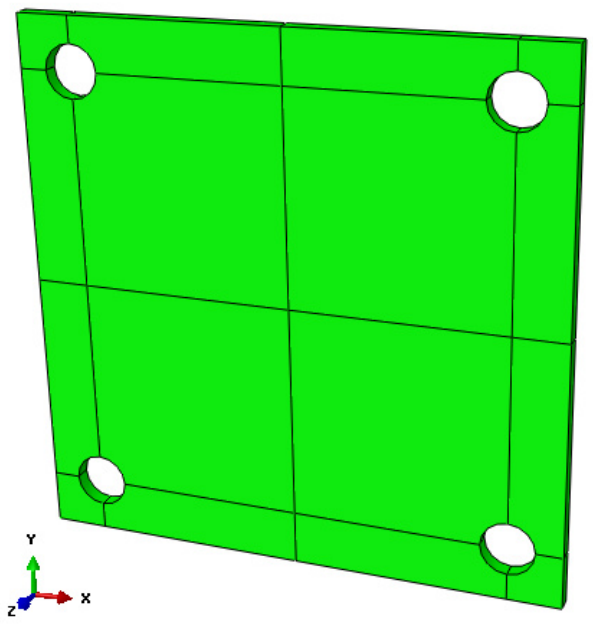
Rys. 2.26. Wybór punktów w ramach drugiej partycji

Pomimo możliwości przypisania siatki elementów skończonych najlepszego typu po przeprowadzonym partycjonowaniu, dodatkowo zostaną wygenerowane dwie dodatkowe partycje, które podzielią element symetrycznie na cztery jednakowe podobszary. W przypadku aktywności opcji *Partition Cell: Define Cutting Plane* , należy ponownie zaznaczyć cały element, wybór zatwierdzić poleceniem *Done*, celem przeprowadzenia dwóch ostatnich partycji (w przypadku braku aktywności opcji partycjonowania należy ją uaktywnić). Wybierając opcję *3 Points*, konieczne jest wybranie trzech punktów zgodnych z rys. 2.27a, umożliwiających poprzez opcję *Create Partition*, symetryczny podział elementu.


Z uwagi na konieczność analogicznego powtórzenia procesu partycjonowania względem pionowych punktów ulokowanych w ramach środkowej części modelu, niezbędne jest ponowne zaznaczenie całego elementu oraz zatwierdzenie wyboru poleceniem *Done*. W odniesieniu do wyboru opcji *3 Points* po raz ostatni, konieczny jest wybór odpowiednich trzech punktów zgodnych z rys. 2.27b oraz użycie opcji *Create Partition*, celem finalnej możliwości wygenerowania kompletnego zestawu partycji zgodnie z rys. 2.28.





Rys. 2.27. Wybór punktów podziału elementu: a) pozioma partycja, b) pionowa partycja




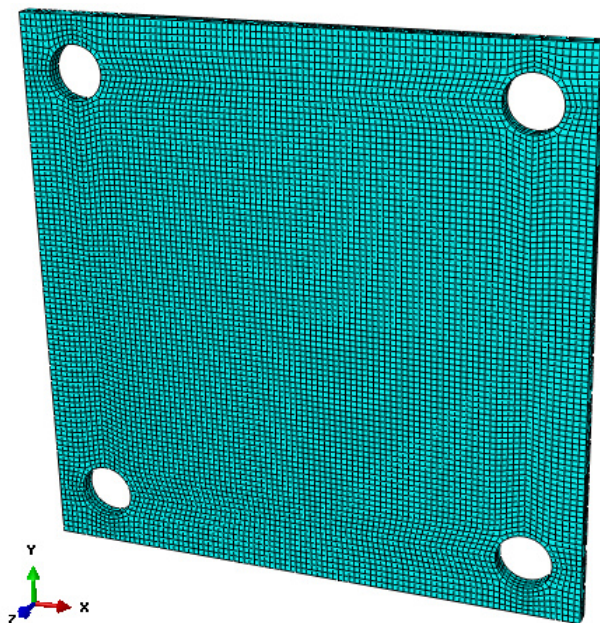
Rys. 2.28. Model po pełnym partycjonowaniu

Następnie wykorzystując narzędzie *Assign Mesh Controls*  należy zaznaczyć cały obiekt oraz zatwierdzając poleceniem *Done*, ustawić parametry siatki na *Hex/Structured* oraz zatwierdzić całość poleceniem *OK*.

Wykorzystując narzędzie *Seed Part*  należy ustalić globalną gęstość siatki elementów skończonych dyskretyzowanej części w poleceniu *Approximate global size* na wartość *0.5* i zatwierdzić poleceniem *OK*. Z uwagi na pierwotną grubość elementu wynoszącą *1.5* [mm], możliwe będzie odwzorowanie zginania podczas uderzenia, ze względu na przypisanie trzech elementów po grubości obiektu.



Kolejny krok stanowi ustalenie rodzaju elementu skończonego zastosowanego w dyskretyzacji modelu *Plyta*. Używając narzędzia *Assign Element Type* , konieczność stanowi zaznaczenie całego obiektu oraz zatwierdzenie poleceniem *Done*, po czym należy dokonać następujących wyborów w ramach dostępnych opcji *Element Library: Explicit*, *Geometric Order: Linear*, typ *Family: 3D Stress* oraz w zakładce *Hex*, niezbędne jest włączenie opcji *Element deletion: Yes*. Akceptacji dokonanych zmian należy dokonać za pomocą polecenia *OK*.

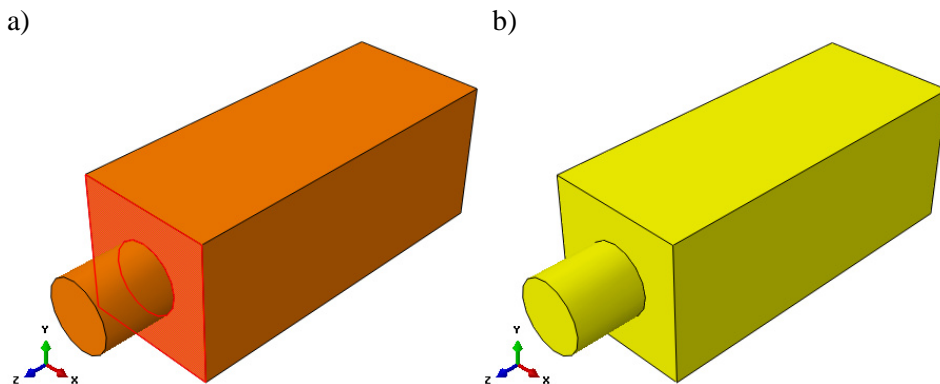
Ostatni etap stanowi przypisanie zdefiniowanej siatki. W tym celu wykorzystując narzędzie *Mesh Part* , i zatwierdzając wybór polecenia opcją dostępną w dolnej części okna roboczego *Yes*, nastąpi przypisanie siatki elementów skończonych na cały element *Plyta*. Opisany element po procesie dyskretyzacji będzie zaprezentowany zgodnie z rys. 2.29.




Rys. 2.29. Model dyskretny elementu *Plyta*


Ostatni etap stanowi dyskretyzacja elementu o nazwie *Podpora*. Należy wybrać z górnej części programu zakładkę *Object: Part: Podpora*, tak by został wyświetlony tylko element *Podpora*.


Celem wykonania niezbędnej partycji, konieczne jest użycie opcji *Partition Cell: Define Cutting Plane* . Przytrzymując zaznaczoną opcję należy wybrać podopcję *Partition Cell: Extend Face* . Następnie należy zaznaczyć powierzchnię zgodną z rys. 2.30a oraz użyć polecenia *Create Partition*.




**Rys. 2.30.** Partycja elementu *Podpora*: a) wybór płaszczyzny, b) wykonanie partycji

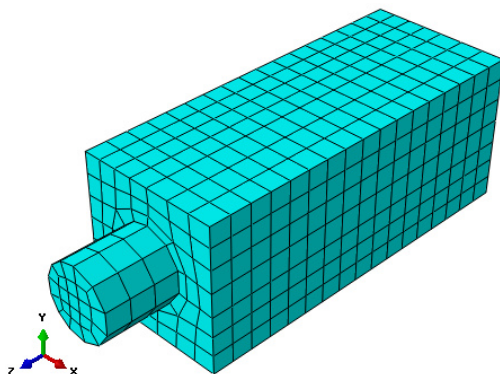
W celu określenia typu i parametrów siatki elementów skończonych należy wykorzystując narzędzie *Assign Mesh Controls*  zaznaczyć cały element *Podpora* oraz zatwierdzając poleceniem *Done* ustawić parametry siatki na *Hex/Sweep* z algorytmem jej tworzenia względem osi symetrii modelu *Medial axis* oraz zatwierdzić całość poleceniem *OK*.

Wykorzystując narzędzie *Seed Part* , należy ustalić globalną gęstość siatki dyskretyzowanej części w poleceniu *Approximate global size* na wartość *1.5* i zatwierdzić poleceniem *OK*.

Kolejny krok stanowi ustalenie rodzaju elementu skończonego zastosowanego w dyskretyzacji modelu *Podpora*. Używając narzędzia *Assign Element Type* , konieczność stanowi zaznaczenie całego obiektu oraz zatwierdzenie poleceniem *Done*, po czym należy dokonać następujących wyborów w ramach dostępnych opcji *Element Library: Explicit*, *Geometric Order: Linear*, typ *Family: 3D Stress*. Akceptacji dokonanych zmian należy dokonać za pomocą polecenia *OK*.

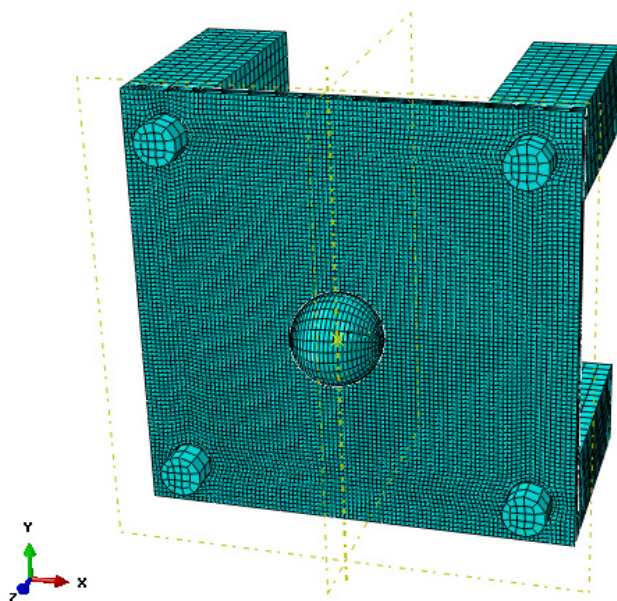
Ostatni etap stanowi przypisanie zdefiniowanej siatki w ramach bieżącego elementu. W tym celu wykorzystując narzędzie *Mesh Part* , i zatwierdzając wybór narzędzia opcją dostępną w dolnej części okna roboczego *Yes*, nastąpi przypisanie siatki elementów skończonych na cały element *Podpora*. Opisany obiekt numeryczny po pełnym procesie dyskretyzacji, będzie prezentować się

zgodnie z postacią modelu przedstawioną na rys. 2.31. Element *Podpora*, stanowi ostatni z dyskretyzowanych podzespołów.



Rys. 2.31. Model dyskretny elementu *Podpora*


Celem przedstawienia graficznej prezentacji przypisanej siatki elementów skończonych w odniesieniu do wszystkich podzespołów, należy wybrać z górnej części programu zakładkę *Object: Assembly*.




Rys. 2.32. Model dyskretny



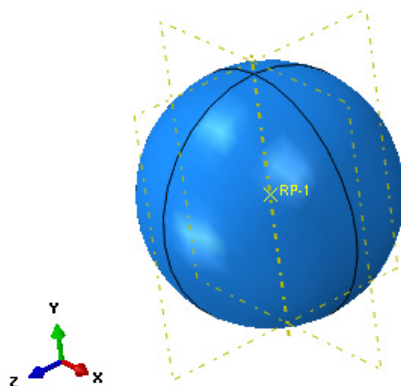
## 2.7 Interakcje modelu numerycznego – moduł *Interaction*

W module związanym z interakcjami należy początkowo ustalić typ kontaktu oraz miejsca współpracy podzespołów, wchodzących w skład całego modelu. W tym celu niezbędne jest wstępne zdefiniowanie rodzaju kontaktu, jaki ma występować na powierzchniach styku elementów. Należy wybrać polecenie *Create Interaction Property* , nazwę zdefiniować jako *Kontakt* oraz wybrać typ współpracy powierzchni z listy o nazwie *Contact* i zatwierdzić wybór przyciskiem *Continue*.



W nowo otwartym oknie niezbędne jest określenie cech wybranego kontaktu. Należy, zatem wybrać zakładkę *Mechanical/Tangential Behavior* i zaznaczyć opcję *Frictionless* ze względu na pominięcie współczynnika tarcia przy uderzeniu. Kolejno w zakładce *Mechanical/Normal Behavior* powinna zostać wybrana opcja „*Hard*” *Contact* oraz *Default* w odpowiednich oknach wyboru, z faktu uwzględnienia niezbędnego rodzaju kontaktu na powierzchniach normalnych współpracujących podzespołów. Dodatkowo zaznaczenie opcji *Allow separation after contact* spowoduje współpracę oddzielonych elementów skończonych na skutek uderzenia z elementem uderzającym. Wszelkie wybory zatwierdzić należy opcją *OK*. Określone właściwości kontaktowe stanowią niezbędne relacje, jakie należy uwzględnić, w ramach przeprowadzanego procesu związanego z analizą przebicia materiału.

Następnym zagadnieniem do zdefiniowania będzie określenie miejsca współpracy zaprojektowanych podzespołów kompletnego modelu. Należy początkowo wybrać opcję *Create Interaction* , zdefiniować nazwę jako *Kontakt*, z informacji *Step* wybrać z rozwinięcia utworzony krok obliczeniowy o nazwie *Initial* i typ kontaktu *General contact (Explicit)* oraz zatwierdzić wszystkie wybory poleceniem *Continue*. W nowo otwartym oknie bez zmian należy pozostawić typ kontaktu jako *All\* with self*, przy czym w dolnej części okna roboczego z właściwości kontaktowych *Contact properties*, konieczny jest wybór w podopcji *Global property assignment*, wcześniej utworzonej relacji o nazwie *Kontakt*. Wszelkie operacje ostatecznie należy zatwierdzić dostępnym poleceniem *OK*.


Dodatkowo w module *Interaction*, niezbędne jest utworzenie punktu referencyjnego w centralnej części elementu *Kulka*. Celem wygenerowania omawianego punktu referencyjnego należy przejść kolejno do zakładki *Tools/Reference Point*, po czym wskazać środkowy punkt na omawianym podzespole, zgodnie z rys. 2.33.

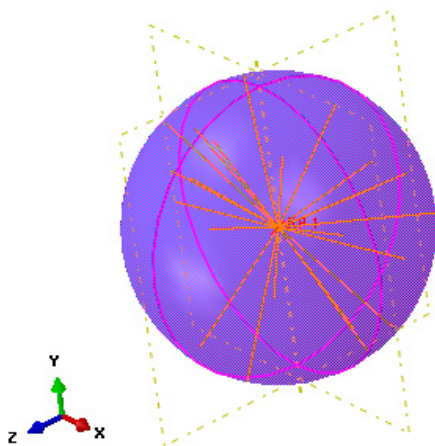


Rys. 2.33. Utworzenie punktu referencyjnego

Finalny etap w module interakcji stanowi sprzężenie utworzonego punktu referencyjnego o automatycznie zdefiniowanej nazwie *RP-1* z zewnętrzną powierzchnią sferyczną elementu *Kulka*. W przypadku, gdy w przestrzeni roboczej są wyświetlane wszystkie elementy, zalecane jest użycie opcji *Create Display Group* , przejście do zakładki *Part/Model instances* oraz zaznaczenie elementu *Płyta* oraz wszystkich części o zdefiniowanej nazwie *Podpora* jednocześnie. Z dolnej części otwartego okna należy wybrać polecenie *Remove* oraz na zakończenie *Dismiss*. Jeżeli wyświetlony był tylko element sferyczny o nazwie *Kulka*, zabieg opisany w poprzednim zdaniu jest zbędny. Celem utworzenia niezbędnego sprzężenia punktu referencyjnego z powierzchnią sferyczną elementu, niezbędne jest użycie opcji *Create Constraint* . Po jej wybraniu, należy zdefiniować nazwę jako *Sprzezenie* oraz wybrać dostępną podopcję *Coupling* i polecenie *Continue*.

Początkowo konieczne jest zaznaczenie punktu referencyjnego oraz zatwierdzenie go opcją *Done*. Następnie po wyborze z dolnej części okna roboczego opcji *Surface*, należy wybrać całą powierzchnię sferyczną oraz zatwierdzić wybór poleceniem *Done*. Po wyświetleniu trzech możliwości wyboru związanego z określeniem oddziaływań sprzężenia wewnątrz lub zewnątrz elementu *Kulka*, należy wybrać opcję *Brown*, oznaczającą kolorystykę zewnętrznej powierzchni części. W nowo otwartym oknie niezbędne jest wybranie opcji sprzężenia jako *Kinematic* i wybranie polecenia *OK*.


Sprawdzenie poprawności przypisania omawianego więzu odbywa się za pomocą narzędzia *Constraint Manager* , dwukrotnie wybierając jedyną z utworzonych relacji sprzężenia. Po dokonaniu powyższej czynności graficzna reprezentacja przypisanej relacji będzie zgodna z rys. 2.34.




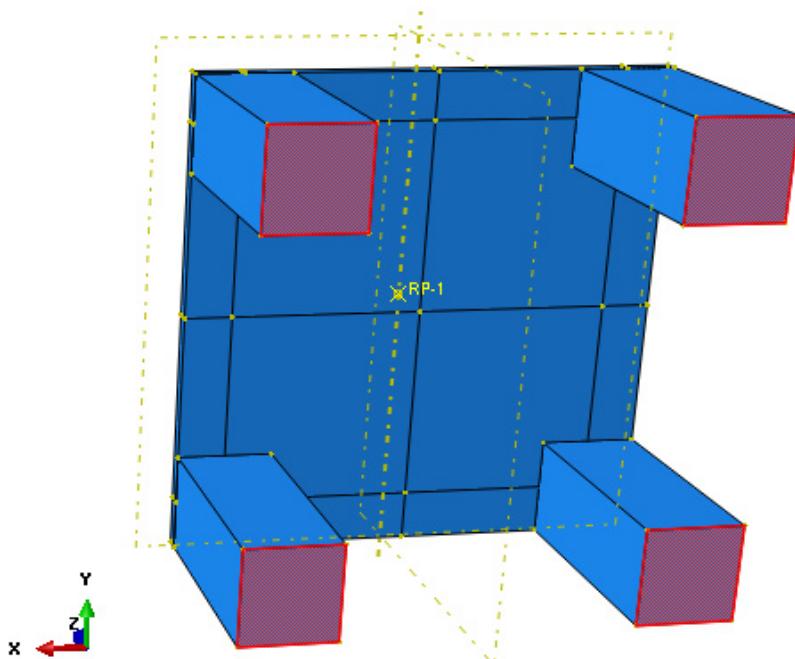
Rys. 2.34. Relacja typu *Coupling*

Opisana powyżej relacja, sprzężenia punktu referencyjnego *RP-1* z powierzchnią sferyczną, stanowi fundamentalny etap, celem przeprowadzenia procesu uderzenia, w ramach dalszej możliwości definicji odpowiednich dla procesu warunków brzegowych.


## 2.8 Definicja warunków brzegowych – *moduł Load*

Warunki brzegowe modelu numerycznego stanowią określenie odpowiedniego utwierdzenia elementów o nazwie *Podpora* oraz ustalenie prędkości, z jaką poruszać się musi część o nazwie *Kulka*. Przy użyciu opcji *Replace All* , nastąpi wyświetlenie wszelkich wcześniej ukrytych elementów w ramach modułu *Interaction*.

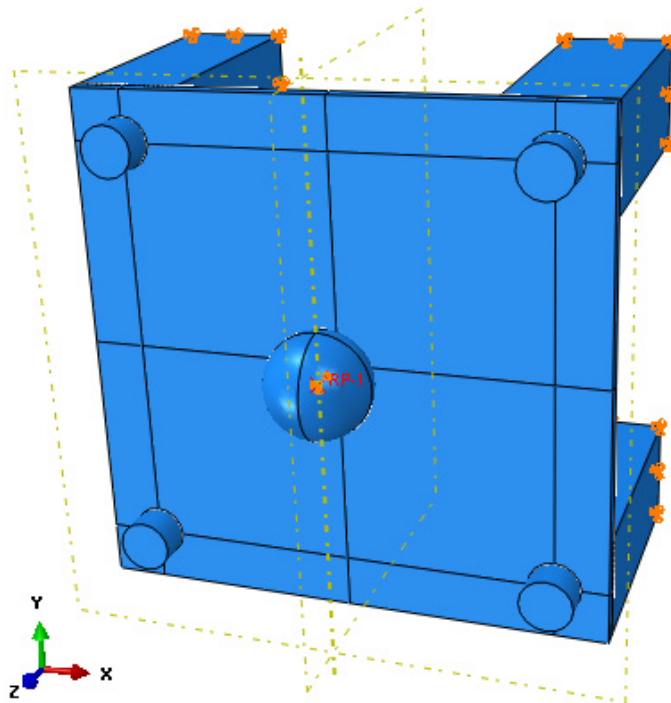
Definicję warunków brzegowych należy rozpocząć od utwierdzenia odpowiednich elementów podpierających płytę. W tym celu konieczny jest wybór opcji *Create Boundary Condition* , nadając nazwę *Utwierdzenie*, w kroku analizy *Step: Initial*, wybierając metodę definicji warunków brzegowych *Displacement/Rotation*. Po zatwierdzeniu ustawień poleceniem *Continue*, należy zaznaczyć i zatwierdzić poleceniem *Done*, wszystkie dolne powierzchnie płaskie czterech części o nazwie *Podpora*, z jednoczesnym użyciem klawisza *Shift*. Następnie konieczne jest zablokowanie trzech translacyjnych stopni swobody (elementy bryłowe posiadają wyłącznie trzy pierwsze stopnie swobody), wybierając *U1*, *U2* oraz *U3*, po czym akceptacji wyboru dokonuje się opcją *OK*, co zostało przedstawione na rys. 2.35.



Rys. 2.35. Wybór płaszczyzn celem utwierdzenia elementów typu *Podpora*


Określenie warunku brzegowego dotyczącego nadania prędkości w odniesieniu do elementu uderzającego, następuje poprzez ponowne użycie opcji *Create Boundary Condition* . Po zdefiniowaniu nazwy jako *Prędkosc*, w kroku analizy *Step: Dynamika*, należy wybrać metodę definicji warunków brzegowych *Velocity/Angular velocity*.


Po zatwierdzeniu ustawień poleceniem *Continue*, należy zaznaczyć i zatwierdzić poleceniem *Done* utworzony wcześniej punkt referencyjny o nazwie *RP-1* przynależny do części *Kulka*. Następnie konieczne jest zablokowanie wszystkich trzech translacyjnych stopni swobody, wybierając w tym celu składowe *V1*, *V2* oraz *V3*. Dodatkowo przy zaznaczonym stopniu swobody *V3*, niezbędne jest naniesienie wartości *-1000* (zdefiniowana wartość jednocześnie oznacza prędkość elementu w przeciwnym kierunku do osi *Z* w jednostce [mm/s]). Finalny etap stanowi akceptacja zdefiniowanego warunku brzegowego poleceniem *OK*. Poprawnie przypisany warunek brzegowy będzie zgodny z prezentacją graficzną jak na rys. 2.36.



Rys. 2.36. Graficzna prezentacja warunku prędkości elementu *Kulka*

## 2.9 Wykonanie obliczeń numerycznych – moduł *Job*

W celu przygotowania zadania obliczeniowego należy wykorzystując narzędzie *Create Job* , nadać nazwę zadania *Name: Przebicie\_kontakt*, zatwierdzić poleceniem *Continue*. W przypadku możliwości równoległego wykorzystania w procesie obliczeń numerycznych większej liczby rdzeni procesora, można w zakładce *Parallelization* wybrać opcję *Use multiple processors* wpisując odpowiednią liczbę rdzeni (np. 2 lub 4). Następnie należy zatwierdzić zadanie obliczeniowe z ustawieniami domyślnymi poleceniem *OK*.

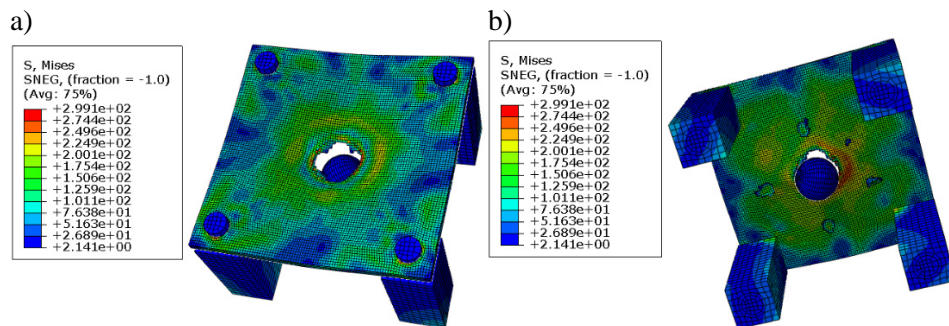
Obliczenia numeryczne należy uruchomić wykorzystując narzędzie *Job Manager* , poprzez wybranie polecenia *Submit*. Przebieg procesu obliczeń numerycznych można obserwować poprzez włączenie polecenia *Monitor*.

Zakończenie procesu obliczeń numerycznych zostanie zasygnalizowane odpowiednim komunikatem w oknie dialogowym *Monitor* oraz przez osiągnięcie w zakładce *Total Time* wartości zgodnej w parametrem czasu analizy zdefiniowanym w kroku obliczeniowym *0.015*. Po zakończeniu procesu obliczeń w celu prezentacji wyników należy włączyć polecenie *Results*.

## 2.10 Wyniki obliczeń numerycznych – *moduł Visualization*

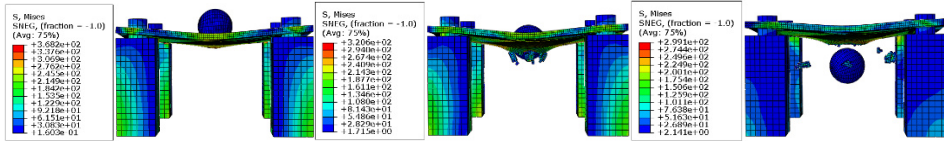
Analiza otrzymanych wyników przeprowadzona zostanie na podstawie rozkładów naprężeń zredukowanych z uwzględnieniem zjawiska przebicia materiału, zgodnie z hipotezą wytrzymałościową Hubera-Misesa-Hencky'ego (H-M-H). Wizualizację rozkładów naprężenia zredukowanego H-M-H przy jednoczesnym wystąpieniu procesu przebicia otrzymamy aktywując narzędzie *Plot Contours on Deformed Shape*. Zwiększenie czcionki wyświetlanych wartości liczbowych można uzyskać wykorzystując narzędzie z górnego menu programu *Viewport/Viewport Annotation Options*. W tym celu należy w nowo otwartym oknie dialogowym w zakładce *Legend* zaznaczyć polecenie *Set Font*, po czym podopcję *Size*, zmieniając rozmiar czcionki wyświetlanej na ekranie – zmianę należy zatwierdzić poleceniem *OK*. W celu obserwacji zachowania się modelu krok po kroku w trakcie procesu obciążania należy posługiwać się przewijaniem klatek animacji przy użyciu opcji *Previous* lub *Next*, znajdujących się nad oknem roboczym programu. Wyświetlane wartości naprężenia zredukowanego podawane są w tym przypadku w [MPa], co wynika bezpośrednio z jednostek wprowadzanych w trakcie przygotowania modelu numerycznego.

Ogólną mapę naprężenia zredukowanego w modelu numerycznym, w odniesieniu do całkowitego przebicia materiału, przedstawiono na rys. 2.37. Maksymalne wartości naprężeń osiągają poziom 299.1 MPa ( $+2.991e+02$  oznacza  $2.991 \times 10^2 = 299.1$ ).



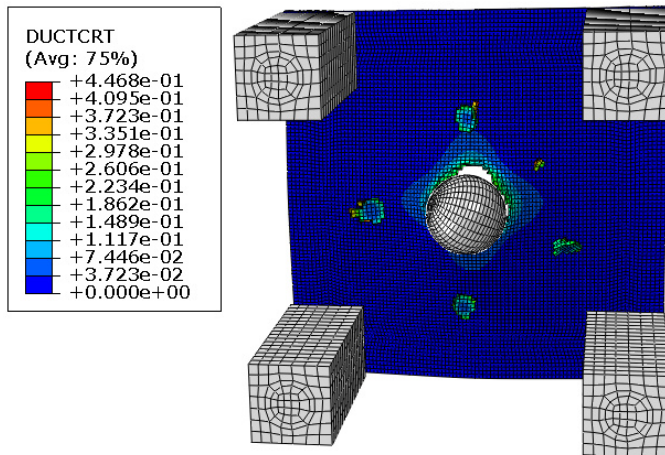
Rys. 2.37. Wynik analizy MES: a) wizualizacja przebicia od strony uderzonej, b) wizualizacja przebicia od strony nieuderzonej

Mapę naprężenia zredukowanego w odniesieniu do procesu przebicia przedstawiono dodatkowo w postaci etapowo pogłębianego trwałego uszkodzenia struktury elementu *Płyta*, zgodnie z rys. 2.38.



Rys. 2.38. Wizualizacja postępującego przebiecia

W odniesieniu do zastosowanego kryterium zniszczenia *Ductile Damage*, wynik poziomu zniszczenia może zostać wyświetlony za pomocą mapy prezentującej stan zniszczenia. W celu wyświetlenia mapy zniszczenia w oparciu o zastosowane kryterium zniszczenia materiałów ciągliwych/plastycznych w ramach modelu numerycznego, należy w oknie znajdującym się nad ekranem roboczym zmienić opcję z *S* (oznaczającą naprężenia – *Stress*) na opcję *DUCTCRT* oznaczającą poziom uszkodzenia elementów skończonych, poddanych procesowi uderzenia.



Rys. 2.39. Wizualizacja poziomu zniszczenia


Dodatkowo, występuje możliwość przeprowadzenia analizy numerycznej przy zmienionej postaci złożenia w module *Assembly*. W ramach próby przesunięcia elementu *Kulka* o 5-10 mm względem osi *X* lub *Y*, możliwa jest obserwacja nowych wyników symulacji, po ponownym przeliczeniu zagadnienia, w odniesieniu do całkowicie innego zachowania materiału płyty oraz jego zniszczenia w ramach zamocowania na podporach.






## 3. SYMULACJA GRY W GOLFA

### 3.1 Wprowadzenie

Przedmiotem analizy numerycznej jest model numeryczny zjawiska symulującego prosty przypadek gry w golfa. Proces zostanie zrealizowany w oparciu o wykorzystanie zarówno ciał odkształcalnych oraz nieodkształcalnych. Symulacja uwzględni dodatkowo złożone zagadnienie kontaktowe. W realizowanym przykładzie przeprowadzona zostanie dyskretyzacja konstrukcji przy wykorzystaniu trójwymiarowych elementów bryłowych typu C3D8R (elementy ośmiowęzłowe o 3 stopniach swobody w każdym węźle, z liniową funkcją kształtu oraz zredukowanym całkowaniem) oraz R3D4 (elementy czterowęzłowe nieodkształcalne). W odniesieniu do zagadnień statycznych, gdzie czas analizy był pomijalny, w przypadku zagadnień dynamicznych definicja czasu realizowanego zagadnienia, stanowi parametr fundamentalny.

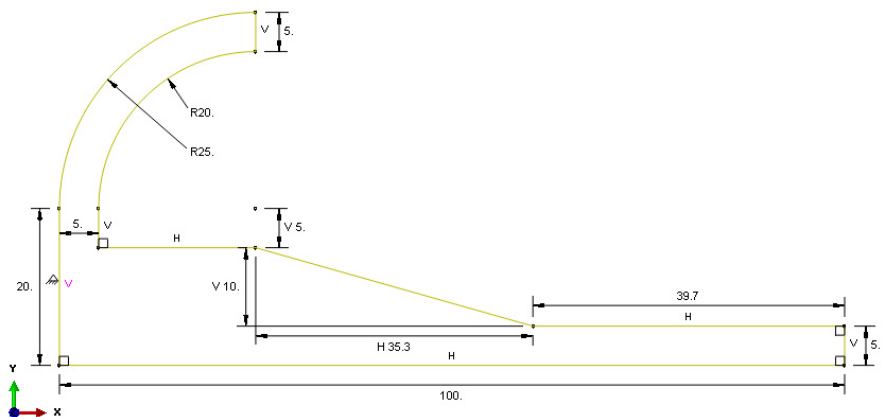
### 3.2 Budowa modelu geometrycznego – *moduł Part*

Model geometryczny pierwszego elementu zostanie wykonany za pomocą narzędzia *Create Part* . Nazwę elementu należy zdefiniować jako *Platforma* oraz ustalić parametry geometryczne części jako element 3D, ciało nieodkształcalne typu *Discrete Rigid*, wykonane jako element bryłowy typu *Solid* metodą wyciągnięcia profilu *Extrusion*, akceptując ustawienia poleceniem *Continue*.

Po automatycznym przekierowaniu do szkicownika, należy skorzystać z opcji *Create Lines: Connected*  oraz *Create Circle: Center and Perimeter* . Niepotrzebne części okręgów należy przyciąć poleceniem *Auto-Trim* . Niezbędne wymiary należy nanieść przy użyciu narzędzia *Add Dimension* , natomiast edycji oraz modyfikacji wymiarów przeprowadzić narzędziem *Edit Dimension Value* , poprzez zaznaczenie danego wymiaru i zadeklarowanie poprawnej jego wartości.

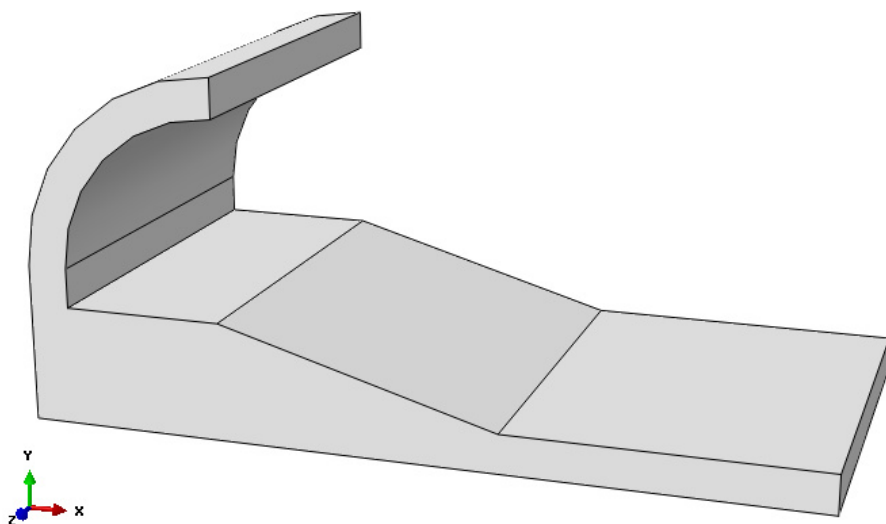
Na rys. 3.1 przedstawiono sparametryzowany szkic profilu bocznego elementu *Platforma*.






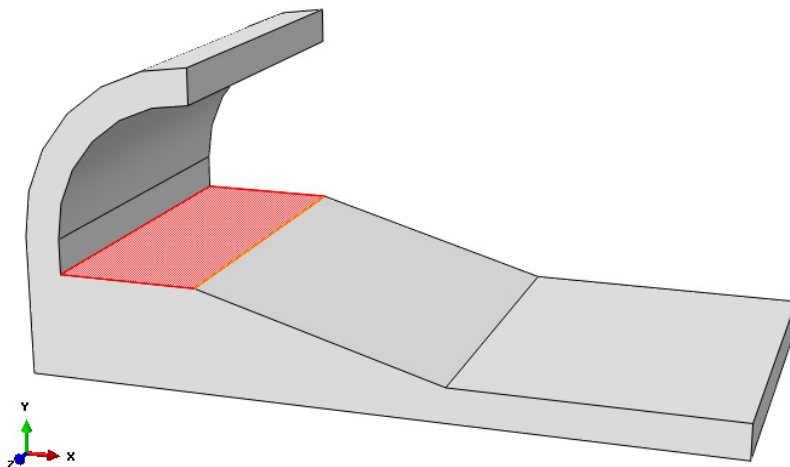
**Rys. 3.1.** Szkic bocznego profilu elementu *Platforma*

Po zatwierdzeniu narysowanego profilu poleceniem *Done* w nowo otwartym oknie należy wprowadzić długość wyciągnięcia *Depth: 50*, ustalając tym samym grubość modelu przestrzennego oraz zatwierdzając poleceniem *OK*. Wszelkie wymiary geometryczne dotyczące tworzenia modelu podane są w [mm].





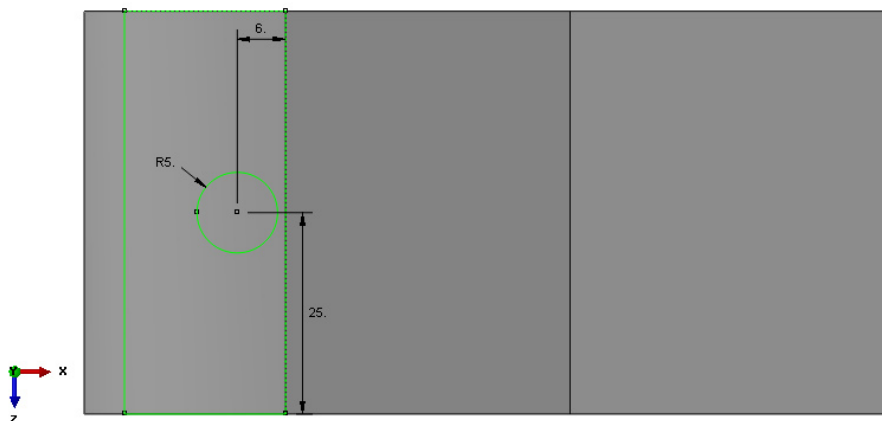
**Rys. 3.2.** Model bryłowy elementu *Platforma*

Kolejny krok stanowi wykonanie wycięcia w wygenerowanej bryle. W tym celu należy użyć opcji *Create Cut: Extrude* , oraz wybrać płaską powierzchnię wyciągniętej bryły, a także dłuższą krawędź tej powierzchni, zgodnie z rys. 3.3.



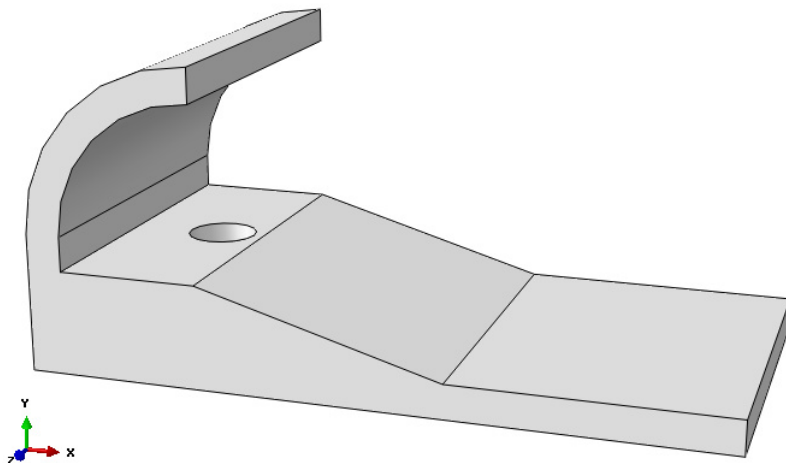
Rys. 3.3. Wybór powierzchni i krawędzi celem wycięcia otworu

Szkic wycięcia należy nanieść za pomocą narzędzia *Create Circle: Center and Perimeter* . Niezbędne wymiary należy nanieść przy użyciu narzędzia *Add Dimension* . Sparametryzowany szkic przedstawiono na rys. 3.4.



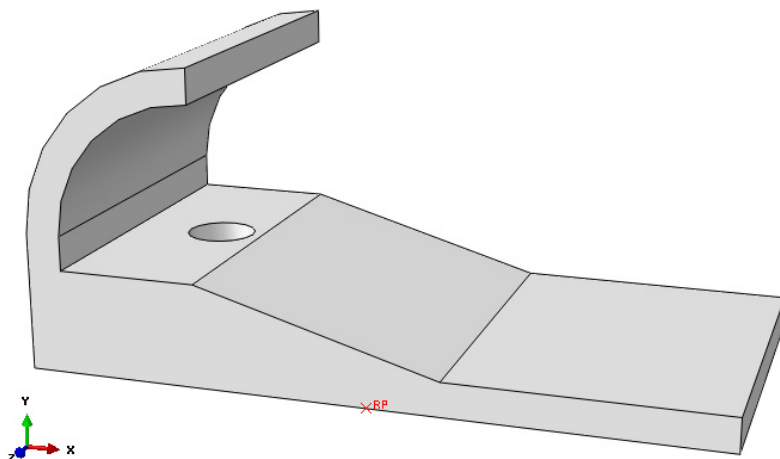
Rys. 3.4. Szkic pod wycięcie otworu

Po zatwierdzeniu narysowanego szkicu poleceniem *Done*, niezbędne jest w nowo otwartym oknie wybranie opcji *Blind* oraz określenie wartości wycięcia *Depth: 10 [mm]* i zatwierdzenie operacji poleceniem *OK*. Graficzną prezentację modelu z wycięciem ukazano na rys. 3.5.



Rys. 3.5. Model bryłowy z wycięciem

Dodatkowo konieczne jest wygenerowanie punktu referencyjnego, do którego będą przypisane przyszłe warunki brzegowe. W tym celu, należy przejść do zakładki *Tools/Reference Point*, po czym wskazać środkowy punkt na dolnej krawędzi podzespołu, zgodnie z rys. 3.6.



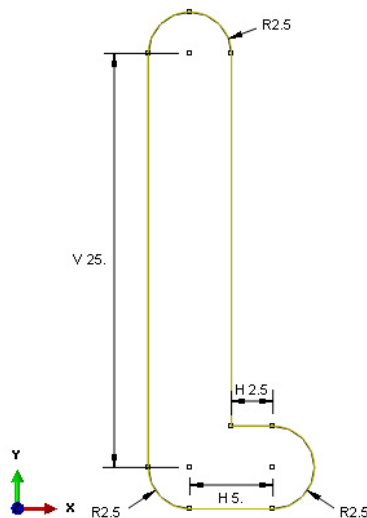
Rys. 3.6. Utworzenie punktu referencyjnego

Ostatni etap związany z elementem *Platforma*, stanowi modyfikacja elementu bryłowego, na element powłokowy. Zabieg ten ma na celu możliwość przypisania lepszego typu siatki elementów skończonych oraz przyspieszenie czasu realizacji zagadnienia, ze względu na mniejszą ilość elementów skończonych, jaka będzie obejmować powłokowy element *Platforma*. Celem modyfikacji należy przejść do zakładki *Shape/Shell/From Solid*. Następnie konieczne jest zaznaczenie całego elementu bryłowego oraz zatwierdzenie poleceniem *Done*. Element zostanie zmodyfikowany automatycznie na typ powłokowy.

Model geometryczny drugiego elementu zostanie wykonany za pomocą narzędzia *Create Part*. Nazwę elementu należy zdefiniować jako *Kij* oraz ustalić parametry geometryczne części jako element 3D, ciało nieodkształcalne typu *Discrete Rigid*, wykonane jako element bryłowy typu *Solid* metodą wyciągnięcia profilu *Extrusion*, akceptując ustawienia poleceniem *Continue*.

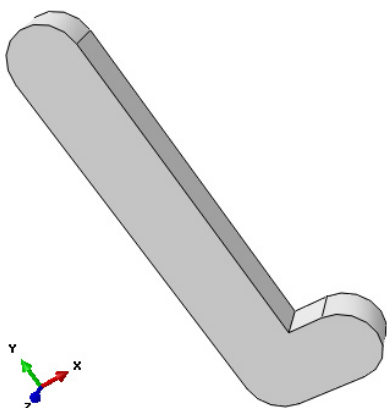
Po automatycznym przekierowaniu do szkicownika, należy skorzystać z opcji *Create Lines: Connected* oraz *Create Circle: Center and Perimeter*. Niepotrzebne części okręgów należy przyciąć poleceniem *Auto-Trim*. Niezbędne wymiary należy nanieść przy użyciu narzędzia *Add Dimension*, natomiast edycji oraz modyfikacji wymiarów przeprowadzić narzędziem *Edit Dimension Value*, poprzez zaznaczenie danego wymiaru i zadeklarowanie poprawnej jego wartości.

Na rys. 3.7 przedstawiono sparametryzowany szkic profilu bocznego elementu o nazwie *Kij*.



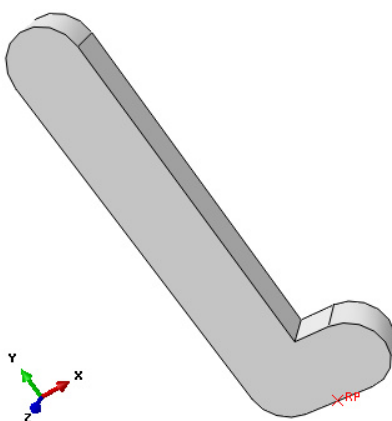
Rys. 3.7. Szkic elementu o nazwie *Kij*

Po zatwierdzeniu narysowanego profilu poleceniem *Done* w nowo otwartym oknie należy wprowadzić długość wyciągnięcia *Depth*: 2.5, ustalając tym samym grubość modelu przestrzennego oraz zatwierdzając poleceniem *OK*. Wszelkie wymiary geometryczne dotyczące tworzenia modelu podane są w [mm].



**Rys. 3.8.** Model bryłowy elementu *Kij*

Dodatkowo konieczne jest wygenerowanie punktu referencyjnego, do którego będą przypisane przyszłe warunki brzegowe. W tym celu, należy przejść do zakładki *Tools/Reference Point*, po czym wskazać środkowy punkt na dolnej krawędzi podzespołu, zgodnie z rys. 3.9.

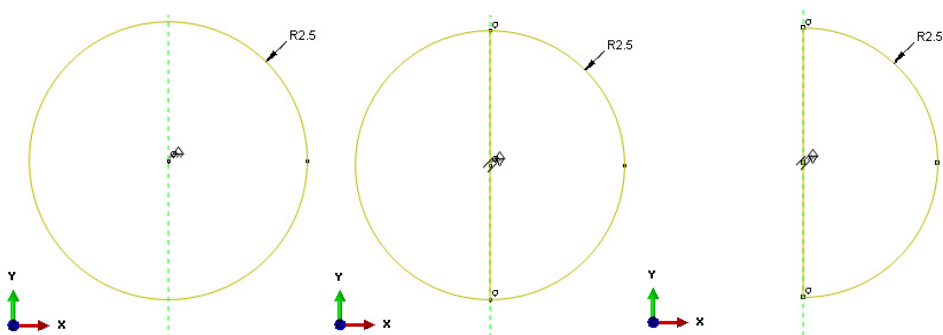


**Rys. 3.9.** Utworzenie punktu referencyjnego

Ostatni etap związany z elementem *Kij*, stanowi modyfikacja elementu bryłowego, na element powłokowy. Zabieg ten ma na celu możliwość przypisania lepszego typu siatki elementów skończonych oraz przyspieszenie czasu realizacji zagadnienia, ze względu na mniejszą ilość elementów skończonych, jaka będzie obejmować powłokowy element *Kij*. Celem modyfikacji należy przejść do zakładki *Shape/Shell/From Solid*. Następnie konieczne jest zaznaczenie całego elementu bryłowego oraz zatwierdzenie poleceniem *Done*. Element zostanie zmodyfikowany automatycznie na typ powłokowy.

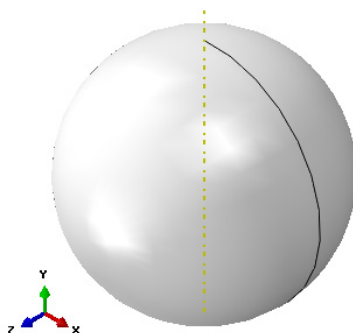
Model geometryczny trzeciego elementu zostanie wykonany za pomocą narzędzia *Create Part*. Nazwę elementu należy zdefiniować jako *Pilka* oraz ustalić parametry geometryczne części jako element 3D, ciało odkształcalne typu *Deformable*, wykonane jako element bryłowy *Solid* metodą obrotu profilu *Revolution*, akceptując ustawienia poleceniem *Continue*.

Po automatycznym przekierowaniu do szkicownika, należy skorzystać z opcji *Create Circle: Center and Perimeter*. Niezbędne wymiary w postaci promienia okręgu należy nanieść przy użyciu narzędzia *Add Dimension*. Po narysowaniu okręgu z początku układu współrzędnych istotne jest, żeby punkt końcowy rysowanego okręgu, był zgodny z kierunkiem osi *X*. Następnym etapem jest narysowanie pionowej linii w centralnej części okręgu. Szkic linii prostej należy wykonać z wykorzystaniem jednego narzędzia *Create Lines: Connected*. Konieczne jest narysowanie linii w pionie względem osi *Y*, poczynając od najniższego położonego punktu na okręgu do najwyższego. Ostatni etap stanowi docięcie lewej części okręgu, celem dalszej możliwości obrotu jego fragmentu względem naszkicowanej pionowej linii. Niepotrzebną część okręgu należy przyciąć poleceniem *Auto-Trim*, poprzez zaznaczenie lewej zewnętrznej części okręgu, która ma zostać przycięta. Na poniższym rys. 3.10 przedstawiono etapowo tworzenie w pełni funkcjonalnego szkicu.




**Rys. 3.10.** Element *Pilka*: a) szkic okręgu, b) szkic pionowej linii wewnątrz okręgu, c) docięcie zbędnej lewej połowy okręgu


Po zatwierdzeniu środkowym klawiszem myszy narysowanego szkicu, lub poprzez wyłączenie polecenia *Auto-Trim*  $\dagger\dagger$ , należy wybrać z dolnej części okna projektowego opcję *Done*. Program poprosi o wprowadzenie kąta obrotu narysowanego półokręgu, względem pionowej linii stanowiącej oś obrotu. Przy parametrze *Angle* w nowo otwartym oknie, konieczne jest wpisanie pełnego kąta obrotu wynoszącego 360 stopni. Po zatwierdzeniu poleceniem *OK* wprowadzonego parametru, nastąpi wygenerowanie powłokowego elementu sferycznego.




Rys. 3.11. Model przestrzenny elementu *Pilka*

### 3.3 Definicja właściwości materiałowych – *moduł Property*


Właściwości materiałowe przypisuje się w module *Property* poprzez użycie opcji *Create Material* . W nowo otwartym oknie następuje określenie nazwy materiału jako *Aluminium*. Następnie, należy przejść do zakładki *Mechanical/Elasticity/Elastic*, w celu określenia podstawowych cech opisujących materiał. Moduł odkształcalności liniowej wynosi *Young's Modulus: 70000* [MPa] oraz współczynnik Poissona stanowiący stosunek odkształcenia poprzecznego do podłużnego *Poisson's Ratio: 0.33*. Właściwości związane z plastycznością nie są konieczne do definiowania, ze względu na prostą symulację numeryczną. Z uwagi na realizację zagadnienia dynamicznego, niezbędne jest określenie gęstości materiału. Celem określenia pożądanej gęstości, należy przejść do zakładki *General/Density*. W polu *Mass Density*, konieczne jest wpisanie gęstości w poprawnej jednostce. Z uwagi na to, iż model był tworzony w [mm], gęstość musi być podana w jednostce zgodnej jako [t/mm<sup>3</sup>]. Gęstość z reguły podawana jest w jednostce [kg/m<sup>3</sup>], jednak do celów numerycznych poprawnie zamodelowanego procesu, niezbędne jest przeliczenie 2700 [kg/m<sup>3</sup>] na poprawny typ jednostki. W omawianym polu należy nanieść wartość 2.7E-009.

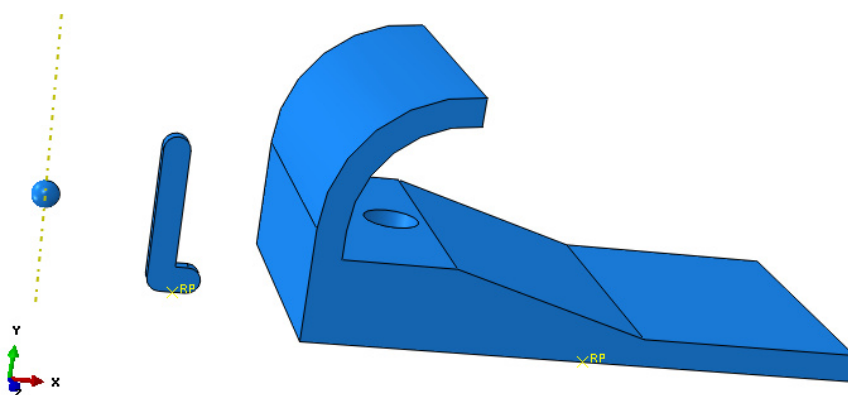
W ramach następnego etapu należy utworzyć sekcje z odpowiednio przypisanymi właściwościami materiałowymi za pomocą narzędzia *Create Section* , definiując nazwę sekcji jako *Aluminium* oraz właściwości *Solid/Homogeneous*, zatwierdzając wprowadzone dane poleceniem *Continue*. W nowo otwartym oknie należy wybrać *Material: Aluminium*, zatwierdzając *OK*.

Utworzoną w powyższy sposób sekcję należy przypisać do wykonanego modelu o nazwie *Pilka*, wybierając kolejno nad ekranem roboczym w okienku *Part* poszczególną część i wykorzystując narzędzie *Assign Section* . Po zaznaczeniu odpowiedniej części i zatwierdzeniu wyboru poleceniem *Done*, należy wybrać odpowiednią sekcję *Aluminium* o typie *Solid* i zaakceptować przypisanie sekcji poleceniem *OK*. Po poprawnym przypisaniu sekcji materiałowej element zmienia barwę na kolor zielony.

Z uwagi na fakt, iż dwa pozostałe elementy stanowią nieodkształcalne obiekty w odniesieniu do realizowanej analizy numerycznej, nie zostaje w ramach obydwu elementów definiowany materiał.


### 3.4 Tworzenie instancji części – *moduł Assembly*

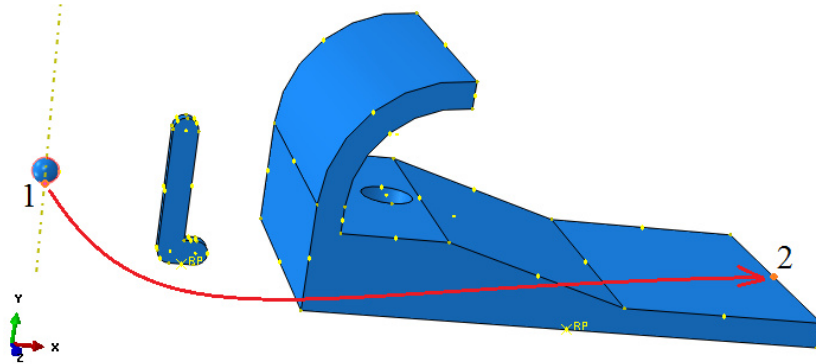
W bieżącym module należy dokonać utworzenia instancji wykonanych elementów w ramach wcześniejszego projektowania. Model numeryczny składa się zaledwie z trzech elementów, zatem każdy zostanie zaimportowany jednokrotnie. W tym celu należy wykorzystać narzędzie *Create Instance* , zaznaczając w oknie listy części wszystkie elementy, przy uwzględnieniu opcji *Auto-offset from other instances*, co finalnie należy zatwierdzić poleceniem *OK*. Utworzona instancja części przedstawiona jest na rys. 3.12.




Rys. 3.12. Wstawienie instancji części

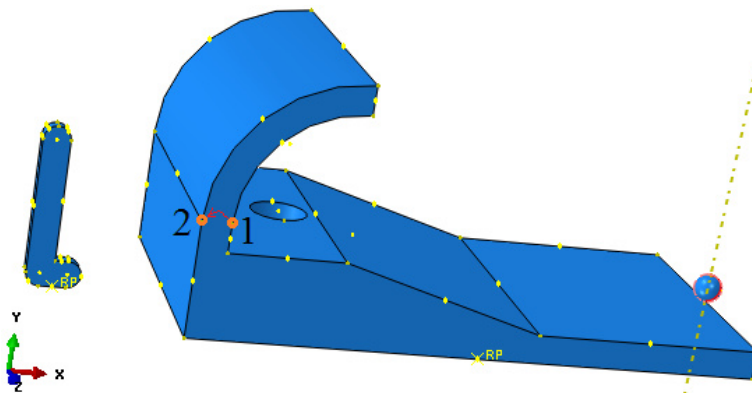


W ramach modułu *Assembly* konieczne jest dokonanie złożenia wstawionych instancji. Po wczytaniu elementów należy je złożyć odpowiednio w przestrzeni, używając wstępnie opcji *Translate Instance* , a następnie wybrać jeden z wstawionych elementów o nazwie *Pilka* oraz zatwierdzić opcją *Done*. Po tej operacji pojawiają się punkty charakterystyczne na wszystkich elementach. Należy wybrać odpowiedni punkt z jednego elementu względem punktu na drugim elemencie zgodnie z poniższym rys. 3.13 i wybrać polecenie *OK*, aby nastąpiło odpowiednie złożenie.




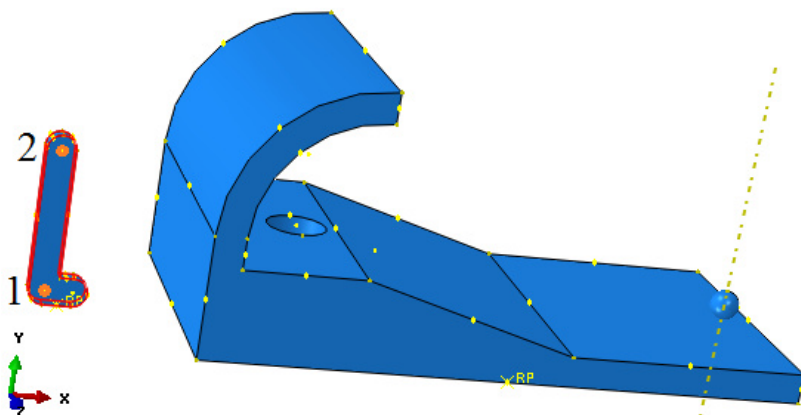
Rys. 3.13. Wybór punktów względem pierwszej translacji

Następnie konieczne jest ponowne użycie opcji *Translate Instance* , wybór elementu *Pilka* oraz zatwierdzenie opcją *Done*. Po wyborze odpowiednich punktów (z elementu *Platforma*) celem translacji zgodnie z rys. 3.14 i zatwierdzeniu wyboru opcją *OK*, nastąpi realizacja przemieszczenia.




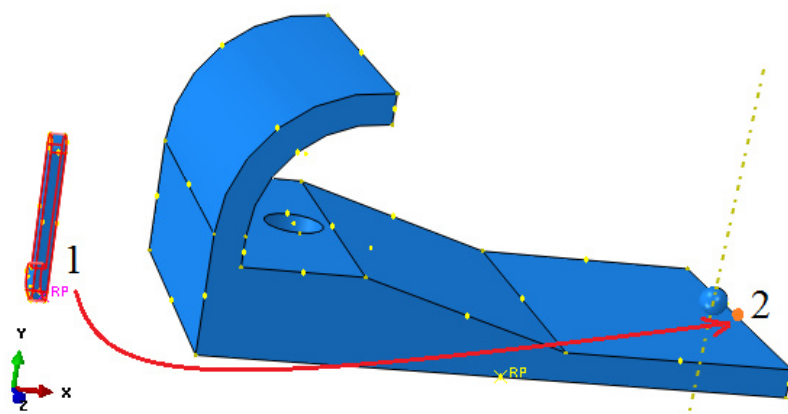
Rys. 3.14. Wybór punktów względem drugiej translacji

Po zrealizowaniu translacji, konieczne jest użycie opcji *Rotate Instance* , zaznaczenie elementu *Kij* oraz wybranie polecenia *Done*. Kolejny krok stanowi wybór dwóch punktów, wzdłuż których będzie ustalona oś obrotu elementu. Punkty powinny być wybrane w kolejności przedstawionej na rys. 3.15, po czym należy wybór zatwierdzić klawiszem *Enter* w ramach zdefiniowanego kąta obrotu *Angle of rotation: 90* oraz poleceniem *OK*.




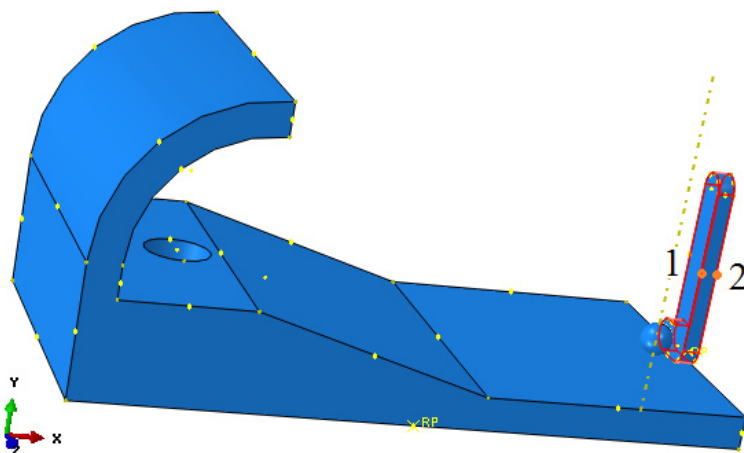
Rys. 3.15. Wybór punktów względem rotacji

Niezbędne jest kolejno użycie opcji *Translate Instance* , wybór elementu *Kij* oraz zatwierdzenie opcją *Done*. Po wyborze odpowiednich punktów zgodnie z rys. 3.16 (punktu *RP* z elementu *Kij* oraz punktu z elementu *Platforma*) i zatwierdzeniu wyboru opcją *OK*, nastąpi realizacja translacji.



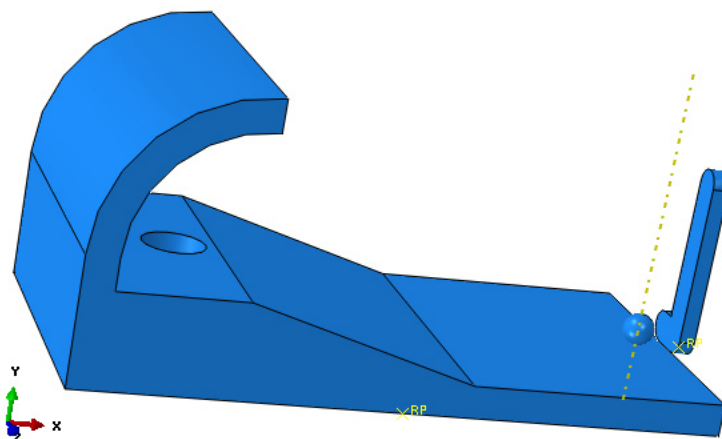
Rys. 3.16. Wybór punktów względem pierwszej translacji elementu *Kij*

Finalny etap złożenia stanowi przeprowadzenie ostatniej translacji. W tym celu należy dokonać ponownego użycia opcji *Translate Instance* , wyboru elementu *Kij* oraz zatwierdzenia opcją *Done*. Po wyborze odpowiednich punktów w określonej kolejności, zgodnie z rys. 3.17 (punktów na elemencie *Kij*) i zatwierdzeniu wyborem opcją *OK*, nastąpi ostateczna translacja.




**Rys. 3.17.** Wybór punktów względem drugiej translacji elementu *Kij*


Graficzna prezentacja przeprowadzonego złożenia została przedstawiona poniżej zamieszczonym rys. 3.18.




**Rys. 3.18.** Złożenie modelu


### 3.5 Definicja analizy numerycznej – *moduł Step*

Analiza numeryczna przeprowadzona zostanie jako zadanie dynamiczne. Wybierając narzędzie *Create Step* , należy ustalić nazwę kroku obliczeniowego jako *Dynamika\_1* i wybrać typ analizy jako *Dynamic, Explicit* oraz zatwierdzić wybór poleceniem *Continue*. W nowo otwartym oknie w pierwszej z zakładek *Basic*, należy nanieść wyłącznie wartość czasu trwania analizy numerycznej w polu *Time period: 0.0075* oraz włączyć opcję *Nlgeom* na *ON*. Podana wartość jest wyrażona w sekundach. Ze względu na długi okres oczekiwania towarzyszący skomplikowanym obliczeniom dynamicznym, czas analizy jest możliwie najkrótszy oraz wcześniejsze złożenie uwzględni niemalże od razu styk elementu *Kij* z uderzonym elementem *Pilka*. W trzeciej z zakładek *Mass scaling*, konieczne jest użycie opcji *Use scaling definitions below* oraz wybranie w dolnej części otwartego okna roboczego polecenia *Create*. W okienku *Scale by factor*, należy nanieść wartość *100* oraz zatwierdzić opcją *OK*. Okno związane z określaniem procesu dynamicznego również powinno być zaakceptowane poleceniem *OK*. Zgodnie z zasadą przyspieszenia procesu obliczeniowego związanego ze skalowaniem masy obiektów poddanych procesom dynamicznym, naniesiona wartość skalowania ma wpływ na przebieg samej analizy i otrzymany wynik powinien zostać przeanalizowany. W przypadku wykorzystywania w obliczeniach procesu skalowania masy, przyspieszy znacząco realizacja obliczeń. Skalowanie masy, często wiąże się z występowaniem niepożądanych błędów numerycznych, jednak przy niewielkim współczynniku skalowania, błędy symulacyjne są często niezauważalne.

Z uwagi na złożoność procesu dynamicznego, pierwszy utworzony krok analizy stanowi wyłącznie początkowy etap symulacji, związany z samym uderzeniem. Dodatkowo konieczne jest zdefiniowanie drugiego kroku obliczeniowego pozwalającego na symulację odbicia elementu uderzonego *Pilka*, przy jednoczesnym powrocie do stanu początkowego elementu uderzającego, jakim jest *Kij*. Wybierając ponownie narzędzie *Create Step* , należy ustalić nazwę kroku obliczeniowego jako *Dynamika\_2* i wybrać typ analizy jako *Dynamic, Explicit* oraz zatwierdzić wybór poleceniem *Continue*. W nowo otwartym oknie w pierwszej z zakładek *Basic*, należy nanieść wyłącznie wartość czasu trwania analizy numerycznej w polu *Time period: 0.035* oraz włączyć opcję *Nlgeom* na *ON*. W trzeciej z zakładek *Mass scaling*, konieczne jest analogiczne do pierwszego kroku obliczeniowego zdefiniowanie zjawiska skalowania masy, celem znacznego przyspieszenia czasu obliczeń numerycznych.


### 3.6 Interakcje modelu numerycznego – moduł *Interaction*

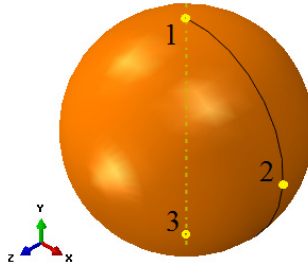
W module związanym z interakcjami należy początkowo ustalić typ kontaktu oraz miejsca współpracy podzespołów, wchodzących w skład całego modelu. W tym celu niezbędne jest wstępne zdefiniowanie rodzaju kontaktu, jaki ma występować na powierzchniach styku elementów. Należy wybrać polecenie *Create Interaction Property* , nazwę zdefiniować jako *Kontakt* oraz wybrać typ współpracy powierzchni z listy o nazwie *Contact* i zatwierdzić wybór przyciskiem *Continue*. W nowo otwartym oknie niezbędne jest określenie cech wybranego kontaktu. Należy, zatem wybrać zakładkę *Mechanical/Tangential Behavior* i zaznaczyć opcję *Frictionless* ze względu na pominięcie współczynnika tarcia przy uderzeniu. Kolejno w zakładce *Mechanical/Normal Behavior* powinna zostać wybrana opcja „*Hard*” *Contact* oraz *Default* w odpowiednich oknach wyboru, z faktu uwzględnienia niezbędnego rodzaju kontaktu na powierzchniach normalnych współpracujących podzespołów. Dodatkowo zaznaczenie opcji *Allow separation after contact* spowoduje współpracę zaprojektowanych elementów w ramach uderzenia, odbicia elementu *Pilka* oraz kontaktu z elementem *Platforma*. Wszelkie wybory zatwierdzić należy opcją *OK*.

Następnym zagadnieniem do zdefiniowania będzie określenie miejsca współpracy zaprojektowanych podzespołów kompletnego modelu. Należy początkowo wybrać opcję *Create Interaction* , zdefiniować nazwę jako *Kontakt*, z informacji *Step* wybrać z rozwinięcia utworzony krok obliczeniowy o nazwie *Initial* i typ kontaktu *General contact (Explicit)* oraz zatwierdzić wszystkie wybory poleceniem *Continue*. W nowo otwartym oknie bez zmian pozostawić należy typ kontaktu jako *All\* with self*, przy czym w dolnej części okna roboczego z właściwości kontaktowych *Contact properties*, konieczny jest wybór w podopcji *Global property assignment*, wcześniej utworzonej relacji o nazwie *Kontakt*. Wszelkie operacje należy zatwierdzić poleceniem *OK*.


### 3.7 Budowa siatki elementów skończonych – moduł *Mesh*

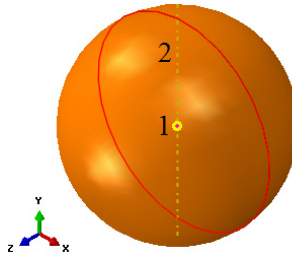
Proces dyskretyzacji odbędzie się kilku etapowo. Początkowo niezbędne jest przeprowadzenie odpowiedniego partycjonowania, w odniesieniu do zaprojektowanych elementów. Po przełączeniu wyświetlania *Object: Part: Pilka*, będzie możliwe rozpoczęcie partycjonowania.

W tym celu konieczne jest użycie opcji *Partition Cell: Define Cutting Plane* . Następnie należy wybrać opcję *3 Points* oraz zaznaczyć kolejno trzy punkty zgodnie z rys. 3.19 oraz użyć polecenia *Create Partition*.



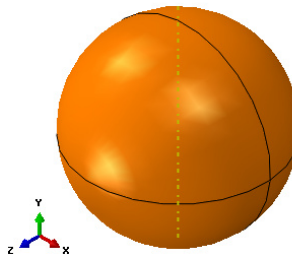
**Rys. 3.19.** Wybór punktów celem wykonania partycji

Po utworzeniu pierwszej partycji, konieczne jest ponowne użycie opcji *Partition Cell: Define Cutting Plane* , zaznaczenie całego obiektu i zatwierdzenie poleceniem *Done*. W ramach wyboru podopcji z dolnej listwy programu *Point & Normal*, zostanie utworzona druga partycja przebiegająca zgodnie z płaszczyzną XZ. Należy wybrać kolejno punkt ze środka elementu *Pilka*, następnie oś elementu przebiegającą wzdłuż osi Y zgodnie z rys. 3.20 oraz użyć polecenia *Create Partition*.





**Rys. 3.20.** Wybór punktu i osi celem wykonania partycji


Po wykonaniu drugiej partycji, graficzna prezentacja elementu *Pilka* będzie zgodna z rys. 3.21.




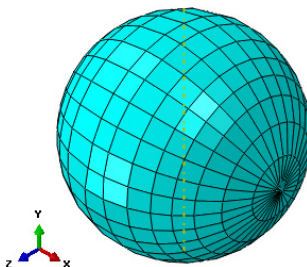
**Rys. 3.21.** Model po partycjonowaniu

Proces przypisania siatki sprowadza się początkowo do wykorzystania narzędzia *Assign Mesh Controls* , przy czym niezbędne jest zaznaczenie całego elementu *Kulka* oraz zatwierdzenie poleceniem *Done*. W nowo otwartym oknie konieczność stanowi ustawienie parametrów siatki na *Hex-dominated/Sweep* z algorytmem jej tworzenia względem osi symetrii modelu *Medial axis* oraz zatwierdzenie całości poleceniem *OK*.

Za pomocą opcji *Seed Part* , należy ustalić globalną gęstość siatki dyskretyzowanej części w poleceniu *Approximate global size* na wartość *0.5* i zatwierdzić poleceniem *OK*.


Przy pomocy narzędzia *Assign Element Type* , konieczne jest określenie typu elementów skończonych opisujących siatkę dyskretyzowanej części. Należy dokonać zaznaczenia całego elementu *Pilka* oraz zatwierdzić wybór poleceniem *Done*. W nowo otwartym oknie kolejno wybrać *Element Library: Explicit* o typie elementu z dostępnej listy *3D Stress* oraz liniowej funkcji kształtu *Geometric Order: Linear*, przy czym pozostałe opcje bez zmian. Okno należy zamknąć poleceniem dostępnym w jego dolnej części o nazwie *OK*.


Ostatni etap stanowi przypisanie zdefiniowanej siatki. W tym celu wykorzystując narzędzie *Mesh Part* , i zatwierdzając wybór polecenia opcją dostępną w dolnej części okna roboczego *Yes*, nastąpi przypisanie siatki elementów skończonych na cały element *Pilka*. Opisywany element po procesie dyskretyzacji będzie zaprezentowany zgodnie z rys. 3.22.





Rys. 3.22. Model dyskretny elementu *Pilka*

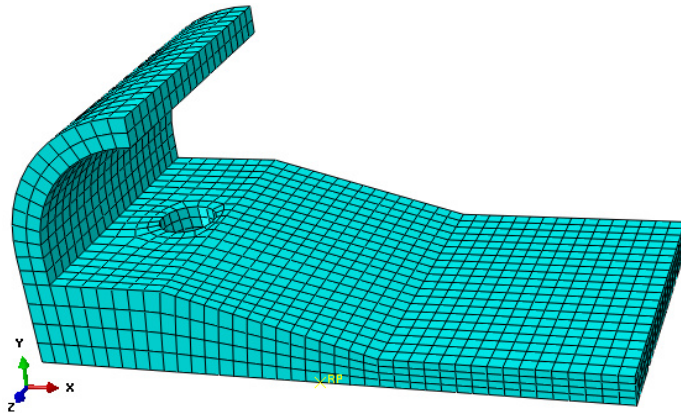
Następny etap stanowi przypisanie siatki elementów skończonych w ramach dwóch nieodkształcalnych podzespołów. Po przełączeniu wyświetlania *Object Part: Platforma*, możliwy będzie dalszy etap dyskretyzacji.

Proces przypisania siatki sprowadza się początkowo do wykorzystania narzędzia *Assign Mesh Controls* , przy czym niezbędne jest zaznaczenie całego elementu *Platforma* oraz zatwierdzenie poleceniem *Done*. W nowo otwartym oknie konieczność stanowi ustawienie parametrów siatki na *Quad/Free* z algorytmem jej tworzenia względem osi centralnej modelu *Medial axis* oraz zatwierdzenie całości poleceniem *OK*.

Za pomocą opcji *Seed Part* , należy ustalić globalną gęstość siatki dyskretyzowanej części w poleceniu *Approximate global size* na wartość 2.5 i zatwierdzić poleceniem *OK*.

Przy pomocy narzędzia *Assign Element Type* , konieczne jest określenie typu elementów skończonych opisujących siatkę dyskretyzowanej części. Należy dokonać zaznaczenia całego elementu *Platforma* oraz zatwierdzić wybór poleceniem *Done*. W nowo otwartym oknie kolejno wybrać *Element Library: Explicit* o typie elementu z dostępnej listy *Discrete Rigid Element* oraz liniowej funkcji kształtu *Geometric Order: Linear*, przy czym pozostałe opcje bez zmian. Okno należy zamknąć poleceniem dostępnym w jego dolnej części o nazwie *OK*.

Ostatni etap stanowi przypisanie zdefiniowanej siatki. W tym celu wykorzystując narzędzie *Mesh Part* , i zatwierdzając wybór polecenia opcją dostępną w dolnej części okna roboczego *Yes*, nastąpi przypisanie siatki elementów skończonych na cały element *Platforma*. Opisany element po procesie dyskretyzacji będzie zaprezentowany zgodnie z rys. 3.23.

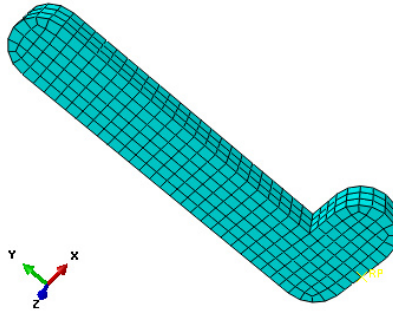


Rys. 3.23. Model dyskretny elementu *Platforma*

Analogiczność postępowania w ramach procesu dyskretyzacji dotyczy ostatniego elementu. Po przełączeniu wyświetlania *Object: Part: Kij*, możliwa będzie dyskretyzacja.


Początkowo należy adekwatnie do modelu *Platforma* ustalić parametry siatki, typ zastosowanego elementu siatki, przy czym jedyna różnica polega na zmianie globalnej wartości zagęszczenia siatki na 1. Pozostałe parametry, w odniesieniu do elementu *Platforma* należy pozostawić bez zmian. W ramach przeprowadzenia procesu dyskretyzacji elementu o nazwie *Kij*, graficzna prezentacja modelu z przypisaną siatką elementów skończonych, będzie zgodna z rys. 3.24.




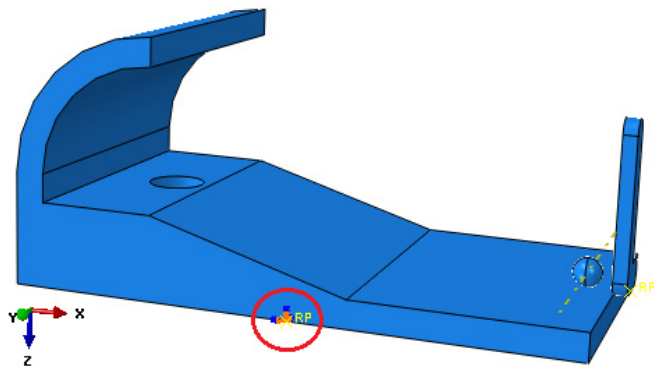


Rys. 3.24. Model dyskretny elementu *Kij*


### 3.8 Definicja warunków brzegowych – moduł *Load*

Warunki brzegowe modelu numerycznego stanowią określenie odpowiedniego utwierdzenia elementu o nazwie *Platforma* oraz ustalenie prędkości, z jaką poruszać się musi część o nazwie *Kij*. W razie konieczności przy użyciu opcji *Replace All* , nastąpi wyświetlenie wszystkich elementów.

Definicję warunków brzegowych należy rozpocząć od utwierdzenia elementu *Platforma*. W tym celu konieczny jest wybór opcji *Create Boundary Condition* , nadając nazwę *Utwierdzenie*, w kroku analizy *Step: Initial*, wybierając metodę definicji warunków brzegowych *Displacement/Rotation*. Po zatwierdzeniu ustawień poleceniem *Continue*, należy zaznaczyć i zatwierdzić poleceniem *Done*, punkt referencyjny *RP* przypisany do obiektu. Następnie konieczne jest zablokowanie wszystkich stopni swobody, po czym akceptacji wyboru dokonuje się opcją *OK*, co zostało przedstawione na rys. 3.25.

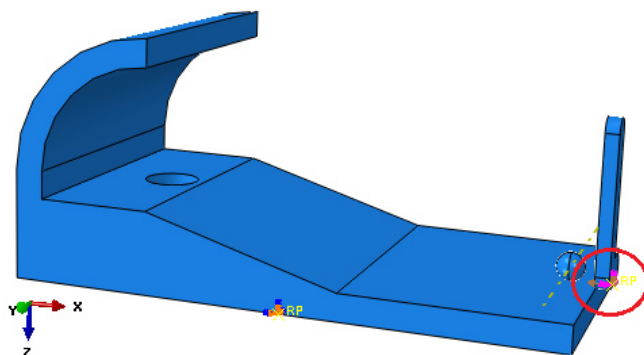


Rys. 3.25. Utwierdzenie elementu *Platforma*


Kolejny etap stanowi zdefiniowanie warunku brzegowego związanego z prędkością elementu *Kij*. Określenie warunku brzegowego dotyczącego nadania prędkości w odniesieniu do elementu uderzającego, następuje poprzez ponowne użycie opcji *Create Boundary Condition* . Po zdefiniowaniu nazwy jako *Predkosc*, w kroku analizy *Step: Dynamika\_1*, należy wybrać metodę definicji warunków brzegowych *Velocity/Angular velocity*.

Po zatwierdzeniu ustawień poleceniem *Continue*, należy zaznaczyć i zatwierdzić poleceniem *Done* utworzony wcześniej punkt referencyjny o nazwie *RP* przynależny do części *Kij*. Następnie konieczne jest zablokowanie wszystkich stopni swobody, wybierając w tym celu składowe *V1*, *V2*, *V3* oraz *VR1*, *VR2*, *VR3*. Dodatkowo przy zaznaczonym stopniu swobody *V1*, niezbędne jest naniesienie wartości *-1500* (zdefiniowana wartość jednocześnie oznacza prędkość elementu w przeciwnym kierunku do osi *X* w jednostce [mm/s]). Finalny etap stanowi akceptacja zdefiniowanego warunku brzegowego poleceniem *OK*.


Poprawnie przypisany warunek brzegowy będzie zgodny z prezentacją graficzną jak na rys. 3.26.




**Rys. 3.26.** Przypisanie prędkości w odniesieniu do elementu *Kij*

Dodatkowo jednak, ze względu na symulacje procesu uderzenia, należy edytować wartość prędkości w drugim kroku obliczeniowym. W celu zmiany warunków prędkości należy przejść do opcji *Boundary Condition Manager* . W nowo otwartym oknie niezbędna jest zmiana warunku brzegowego o nazwie *Predkosc*. Konieczne jest przejście do trybu modyfikacji odpowiedniej komórki (poprzez dwukrotne wciśnięcie lewego klawisza myszy), dotyczącej jednocześnie warunku brzegowego określonego jako *Predkosc* oraz kroku obliczeniowego o nazwie *Dynamika\_2*. W ramach widniejących stopni swobody związanych z prędkością przy parametrze *V1*, należy dokonać edycji wartości na *300*, po czym wprowadzoną modyfikację zatwierdzić poleceniem *OK*. Opisany sposób definicji warunków brzegowych, pozwoli na realizację procesu uderzenia z odbiciem.


### 3.9 Wykonanie obliczeń numerycznych – moduł *Job*


W celu przygotowania zadania obliczeniowego należy wykorzystując narzędzie *Create Job* , nanieść nazwę zadania *Name: Dynamika\_golf*, po czym zatwierdzić poleceniem *Continue*. W przypadku możliwości równoległego wykorzystania w procesie obliczeń numerycznych większej liczby rdzeni procesora, można w zakładce *Parallelization* wybrać opcję *Use multiple processors* wpisując odpowiednią liczbę rdzeni (np. 2 lub 4). Następnie należy zatwierdzić zadanie obliczeniowe z ustawieniami domyślnymi poleceniem *OK*.

Obliczenia numeryczne należy uruchomić wykorzystując narzędzie *Job Manager* , poprzez wybranie polecenia *Submit*. Przebieg procesu obliczeń numerycznych można obserwować poprzez włączenie polecenia *Monitor*.

Zakończenie procesu obliczeń numerycznych zostanie zasygnalizowane odpowiednim komunikatem w oknie dialogowym *Monitor* oraz przez osiągnięcie w zakładce *Total Time* wartości zgodnej w parametrem czasu analizy zdefiniowanym w ramach ustalonych kroków obliczeniowych 0.0425. Po zakończeniu procesu obliczeń w celu prezentacji wyników należy włączyć polecenie *Results*.

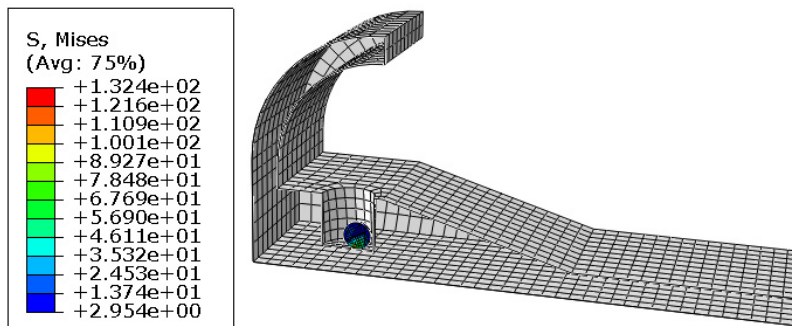
### 3.10 Wyniki obliczeń numerycznych – moduł *Visualization*

Analiza otrzymanych wyników przeprowadzona zostanie w głównej mierze na podstawie rozkładów naprężeń zredukowanych z uwzględnieniem postępujących zjawisk dynamicznych, zgodnie z hipotezą wytrzymałościową Hubera-Misesa-Hencky'ego (H-M-H). Wizualizację rozkładów naprężenia zredukowanego H-M-H przy jednoczesnym wystąpieniu procesu dynamiki otrzymamy aktywując narzędzie *Plot Contours on Deformed Shape* . Zwiększenie czcionki wyświetlanych wartości liczbowych można uzyskać wykorzystując narzędzie z górnego menu programu *Viewport/Viewport Annotation Options*. W tym celu należy w nowo otwartym oknie dialogowym w zakładce *Legend* zaznaczyć polecenie *Set Font*, po czym podopcję *Size*, zmieniając rozmiar czcionki wyświetlanej na ekranie – zmianę należy zatwierdzić poleceniem *OK*.

W celu obserwacji zachowania się modelu krok po kroku w trakcie procesu dynamicznego należy posługiwać się przewijaniem klatek animacji przy użyciu opcji *Previous* lub *Next* , znajdujących się nad oknem roboczym programu. Wyświetlane wartości naprężenia zredukowanego podawane są w tym przypadku w [MPa], co wynika bezpośrednio z jednostek wprowadzanych w trakcie przygotowania modelu numerycznego.

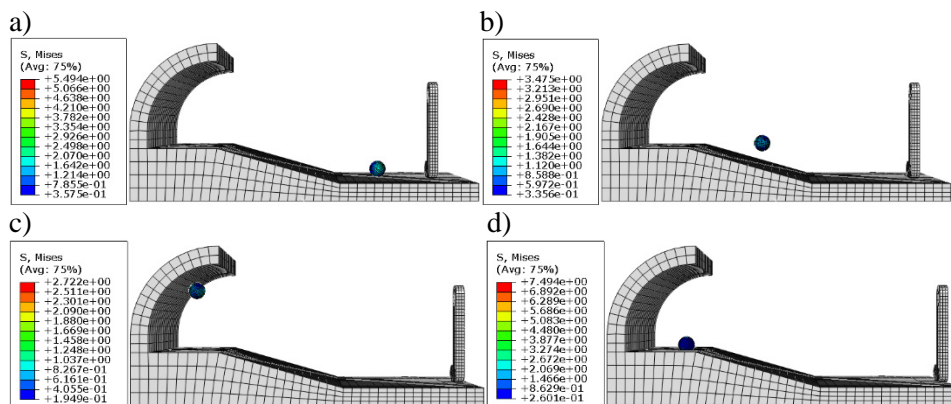
Ogólną mapę naprężenia zredukowanego w modelu numerycznym, w odniesieniu do ostatniego kroku obliczeniowego – uderzenia elementu *Pilka* w dolną część wydrążonego otworu na elemencie *Platforma*, przedstawiono na

rys. 3.27. Maksymalne wartości naprężeń osiągają poziom 132.4 MPa (+1.324e+02 oznacza  $1.324 \times 10^2 = 132.4$ ). Wynik naprężeń dotyczy wyłącznie elementu *Pilka*, ze względu na fakt, iż pozostałe elementy stanowią nieodkształcalne bryły sztywne.



Rys. 3.27. Wynik naprężeń maksymalnych – przekrój modelu numerycznego

Wynik obliczeń numerycznych, w odniesieniu do głównych etapów procesu dynamicznego (uderzenia elementem *Kij* o element *Pilka*, w konsekwencji, czego nastąpiła interakcja z obiektem *Platforma*), przedstawiono na rys. 3.28.



Rys. 3.28. Symulacja procesu dynamiki:


- a) uderzenie elementu *Kij* w odkształcalny element *Pilka*,
- b) pierwsze odbicie elementu *Pilka* od obiektu *Platforma*,
- c) drugie odbicie elementu *Pilka* od obiektu *Platforma*,
- d) uderzenie elementu *Pilka* w otwór w obiekcie *Platforma*






## 4. SYMULACJA GRY W KRĘGLE

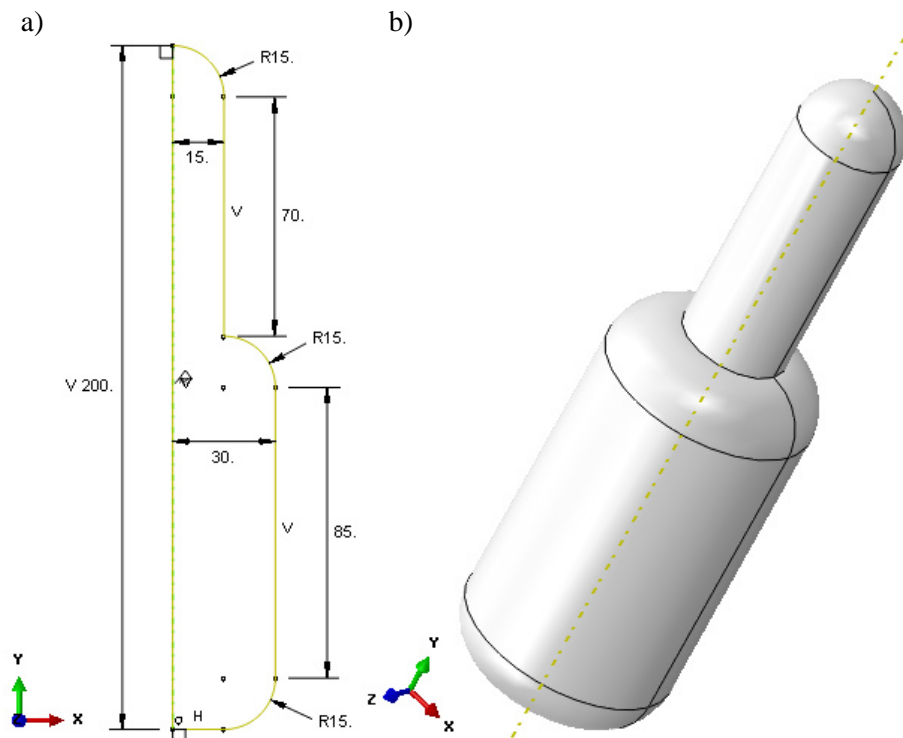
### 4.1 Wprowadzenie

Przedmiotem analizy numerycznej jest model numeryczny zjawiska dynamicznego procesu uderzenia (symulacja gry w kręgle). Proces zostanie zrealizowany w oparciu o wykorzystanie zarówno ciał odkształcalnych oraz nieodkształcalnych. Symulacja uwzględni dodatkowo złożone zagadnienie kontaktowe oraz warunki oddziaływania grawitacyjnego. W realizowanym przykładzie przeprowadzona zostanie dyskretyzacja modelu przy wykorzystaniu trójwymiarowych elementów bryłowych typu C3D8R (elementy ośmiowęzłowe o 3 stopniach swobody w każdym węźle, z liniową funkcją kształtu oraz zredukowanym całkowaniem) oraz R3D4 (elementy czterowęzłowe nieodkształcalne). W odniesieniu do zagadnień statycznych, gdzie czas analizy był pomijalny, w przypadku zagadnień dynamicznych definicja czasu realizowanego zagadnienia, stanowi parametr fundamentalny.


### 4.2 Budowa modelu geometrycznego – *moduł Part*

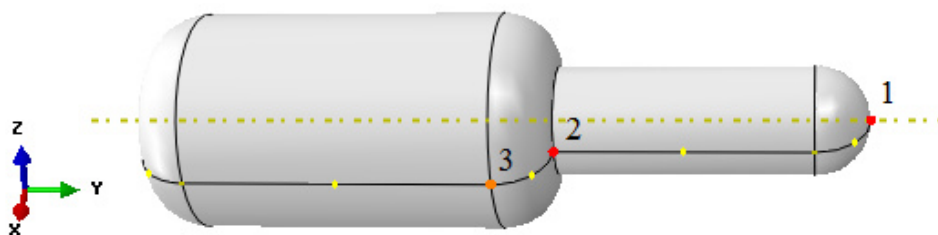
Model geometryczny pierwszego elementu zostanie wykonany za pomocą narzędzia *Create Part* . Nazwę elementu należy zdefiniować jako *Kregiel* oraz ustalić parametry geometryczne części jako element *3D*, ciało odkształcalne typu *Deformable*, wykonane jako element bryłowy typu *Solid* metodą obrotu profilu *Revolution*, akceptując ustawienia poleceniem *Continue*.

Po automatycznym przekierowaniu do szkicownika, należy skorzystać z opcji *Create Lines: Connected*  oraz *Create Circle: Center and Perimeter* . Niepotrzebne części okręgów należy przyciąć poleceniem *Auto-Trim* . Niezbędne wymiary należy nanieść przy użyciu narzędzia *Add Dimension* , natomiast edycji oraz modyfikacji wymiarów przeprowadzić narzędziem *Edit Dimension Value* . Po zatwierdzeniu narysowanego szkicu poleceniem *Done* w dolnej części okna roboczego programu, lub po dwukrotnym użyciu środkowego przycisku myszy, nastąpi automatyczne opuszczenie szkicownika. Następnie należy wprowadzić kąt obrotu narysowanego profilu, względem pionowej linii stanowiącej oś obrotu. Przy parametrze *Angle* w nowo otwartym oknie, konieczne jest naniesienie pełnego kąta obrotu wynoszącego 360 stopni. Po zatwierdzeniu poleceniem *OK* wprowadzonego parametru, nastąpi wygenerowanie modelu przestrzennego zgodnie z rys. 4.1.




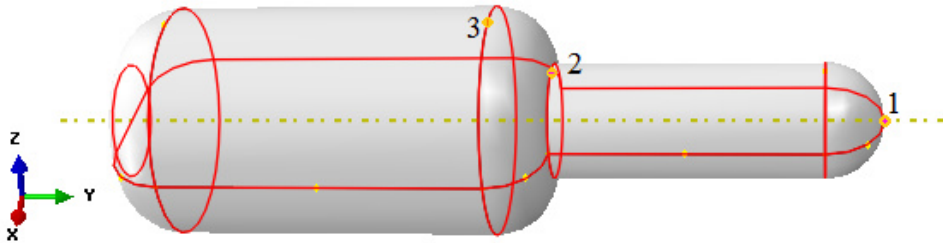
Rys. 4.1. Graficzna prezentacja elementu *Kregiel*: a) szkic, b) model bryłowy

W dalszej części projektowania elementu niezbędne jest wykonanie szeregu partycji, celem dalszej możliwości przypisania korzystnego typu siatki elementów skończonych. W tym celu konieczne jest użycie opcji *Partition Cell: Define Cutting Plane* . Następnie należy wybrać opcję *3 Points* oraz zaznaczyć kolejno trzy punkty zgodnie z rys. 4.2 oraz użyć polecenia *Create Partition*.



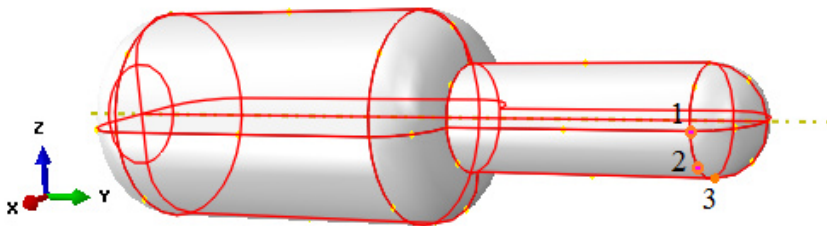
Rys. 4.2. Wybór punktów celem wykonania pierwszej partycji

Po utworzeniu pierwszej partycji, konieczne jest ponowne użycie opcji *Partition Cell: Define Cutting Plane* , następnie zaznaczenie całego obiektu i zatwierdzenie wyboru poleceniem *Done*. W kolejnym kroku należy wybrać opcję *3 Points* oraz zaznaczyć trzy punkty zgodnie z rys. 4.3 oraz użyć polecenia *Create Partition*.

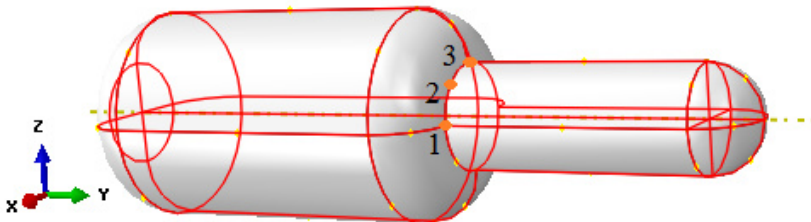


Rys. 4.3. Wybór punktów celem wykonania drugiej partycji

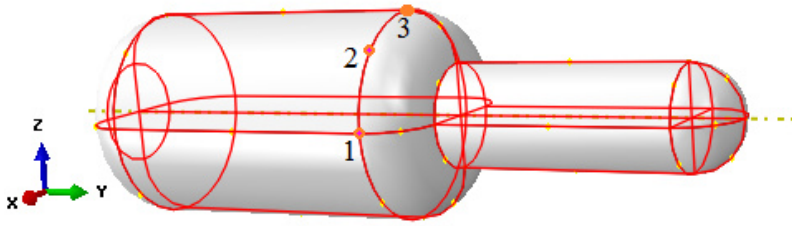
Analogicznie postępując należy wykonać wszystkie pozostałe partycje, zgodnie z wcześniejszym tokiem postępowania, w oparciu o wybór punktów przedstawionych na rys. 4.4–4.7.



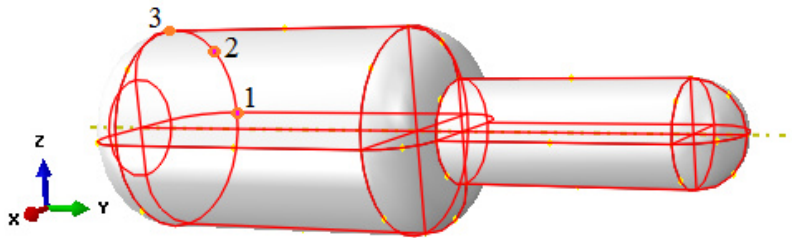
Rys. 4.4. Wybór punktów celem wykonania trzeciej partycji





Rys. 4.5. Wybór punktów celem wykonania czwartej partycji

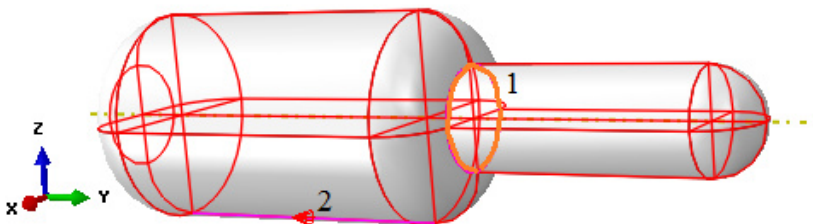


Rys. 4.6. Wybór punktów celem wykonania piątej partycji



Rys. 4.7. Wybór punktów celem wykonania szóstej partycji

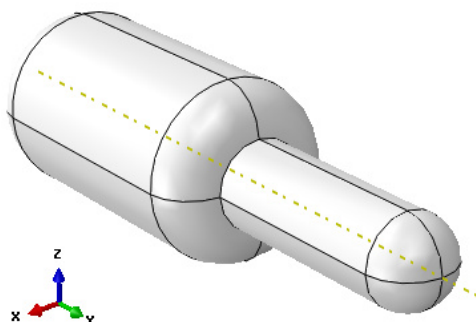
Ostatni etap w przypadku pierwszego elementu stanowi wykonanie partycji, przy użyciu opcji *Partition Cell: Define Cutting Plane* . Przytrzymując zaznaczoną opcję należy skorzystać z podopcji *Partition Cell: Extrude/Sweep Edges* . Po wyborze opisanej opcji partycjonowania konieczność stanowi zaznaczenie całego obiektu i zatwierdzenie wyboru poleceniem *Done*. Kolejno należy zaznaczyć odpowiedni okrąg, zatwierdzić wybór poleceniem *Done* oraz wybrać jedną z dwóch dostępnych opcji w dolnej części okna roboczego o nazwie *Extrude Along Direction*. Następnie, konieczne jest wybranie dowolnej pionowej krawędzi, usytuowanej w kierunku wysokości profilu (oraz sprawdzenie zgodności kierunku partycjonowania – w głąb materiału), zgodnie z rys. 4.8.




Rys. 4.8. Wybór profilu i krawędzi celem wykonania ostatniej partycji







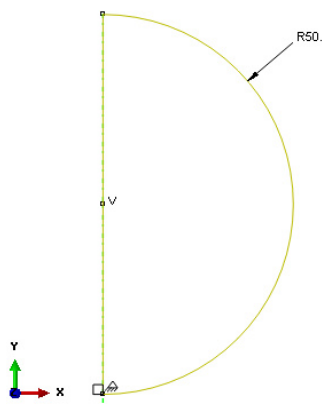
Graficzna prezentacja zaprojektowanego elementu *Kregiel* po poprawnym procesie partycjonowania jest zgodna z rys. 4.9.




Rys. 4.9. Graficzna prezentacja elementu *Kregiel*

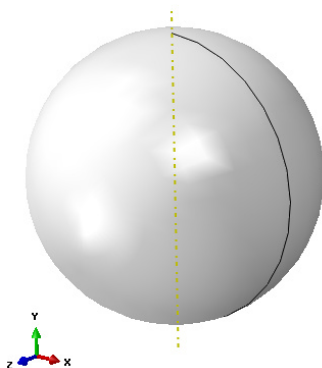
Następny etap stanowi zaprojektowanie drugiej części przy użyciu narzędzia *Create Part* . Nazwę elementu należy zdefiniować jako *Kula* oraz ustalić parametry geometryczne części jako element *3D*, ciało odkształcalne typu *Deformable*, wykonane jako element bryłowy *Solid* metodą obrócenia profilu *Revolution*, akceptując ustawienia poleceniem *Continue*.

Po automatycznym przekierowaniu do szkicownika, należy skorzystać z opcji *Create Circle: Center and Perimeter*  oraz *Create Lines: Connected* . Niezbędne wymiary należy nanieść przy użyciu narzędzia *Add Dimension* . Niepotrzebną część okręgu należy przyciąć poleceniem *Auto-Trim* . Na rys. 4.10 przedstawiono sparametryzowany szkic.






Rys. 4.10. Szkic elementu *Kula*

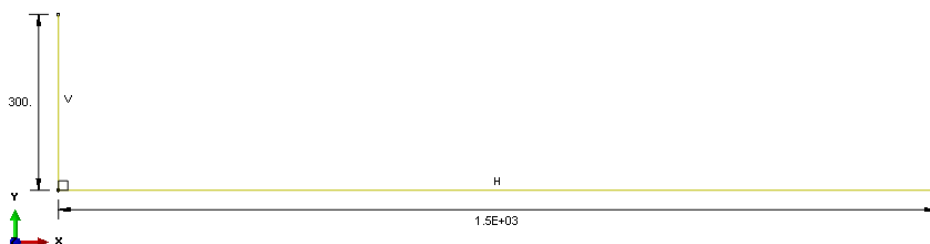
Po zatwierdzeniu środkowym klawiszem myszy narysowanego szkicu lub poprzez wyłączenie polecenia *Auto-Trim* , należy wybrać z dolnej części okna projektowego opcję *Done*. Program poprosi o wprowadzenie kąta obrotu narysowanego półokręgu, względem pionowej linii stanowiącej oś obrotu. Przy parametrze *Angle* w nowo otwartym oknie, konieczne jest wpisanie pełnego kąta obrotu wynoszącego 360 stopni. Po zatwierdzeniu poleceniem *OK* wprowadzonego parametru, nastąpi wygenerowanie elementu bryłowego.



Rys. 4.11. Model bryłowy elementu *Kula*

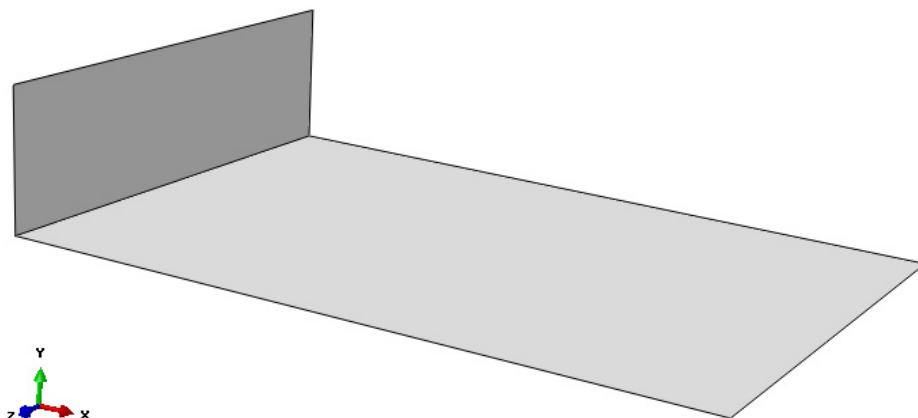
Model zostanie spartycjonowany na etapie modułu *Mesh*. Następny etap stanowi zaprojektowanie trzeciej części przy użyciu narzędzia *Create Part* . Nazwę elementu należy zdefiniować jako *Platforma* oraz ustalić parametry geometryczne części jako element 3D, ciało nieodkształcalne typu *Discrete rigid*, wykonane jako element powłokowy *Shell* metodą wyciągnięcia profilu *Extrusion*, akceptując ustawienia poleceniem *Continue*.

Po automatycznym przekierowaniu do szkicownika, należy skorzystać z opcji *Create Lines: Connected* . Niezbędne wymiary należy nanieść przy użyciu narzędzia *Add Dimension* , zgodnie z rys. 4.12.




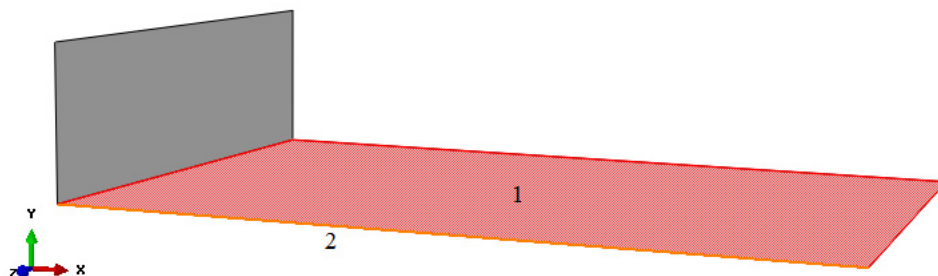
Rys. 4.12. Szkic elementu *Platforma*

Po zatwierdzeniu narysowanego szkicu poleceniem *Done*, w dolnej części okna roboczego programu lub po dwukrotnym użyciu środkowego przycisku myszy, nastąpi automatyczne opuszczenie szkicownika. W nowo otwartym oknie należy wprowadzić długość wyciągnięcia *Depth: 1000*, ustalając tym samym szerokość wyciągnięcia zgodnie z rys. 4.13 oraz zatwierdzając poleceniem *OK*.



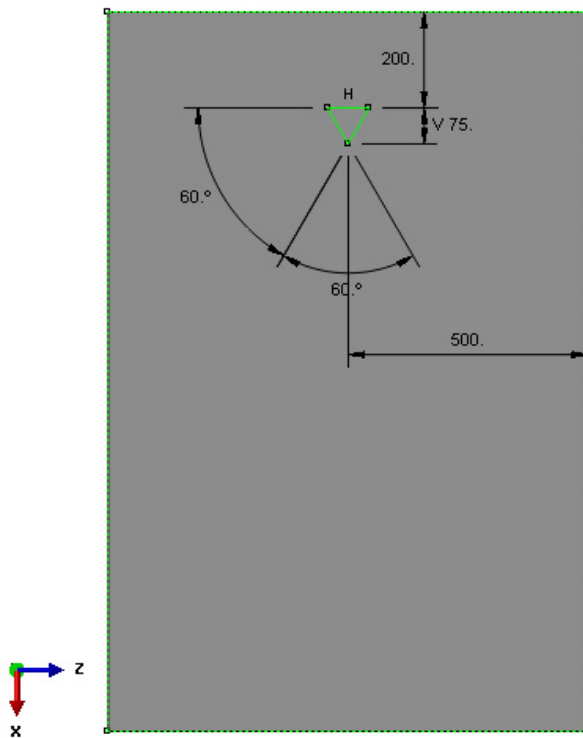
Rys. 4.13. Model powłokowy elementu *Platforma*

Dodatkowo konieczne jest wykonanie partycji, wydzielającej odpowiedni obszar, na którym będą usytuowane elementy typu *Kregiel*. Za pomocą dostępnego narzędzia *Partition Face: Sketch* , możliwe będzie przeprowadzenie odpowiedniego partycjonowania. Po wyborze omawianej opcji niezbędny jest wybór płaskiej prostokątnej powierzchni elementu, zatwierdzenie poleceniem *Done* oraz wybór krawędzi, stanowiącej dowolną boczną krawędź wybranej powierzchni, po czym nastąpi automatycznie przekierowanie do szkicownika.



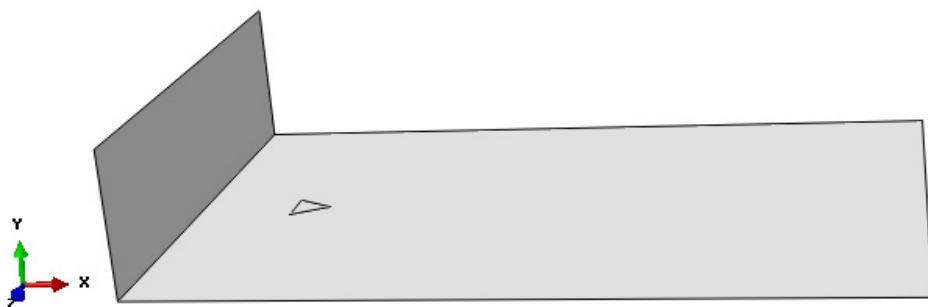
Rys. 4.14. Model powłokowy elementu *Platforma*

Po skorzystaniu z opcji *Create Lines: Connected* należy narysować i zwymiarować szkic o profilu trójkąta zgodnie z rys. 4.15.



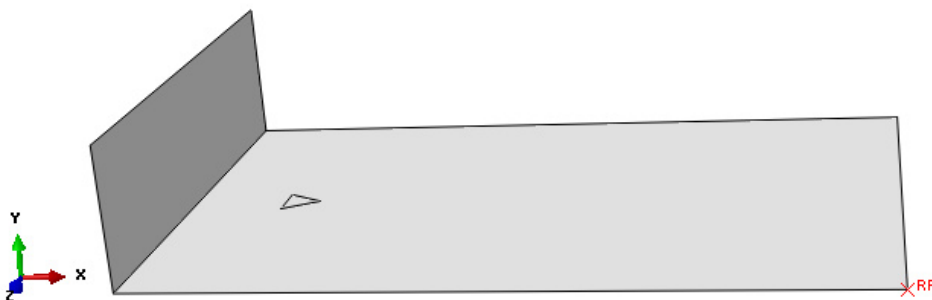
**Rys. 4.15.** Szkic służący do wykonania partycji

Po opuszczeniu szkicownika poleceniem *Done*, lub dwukrotnym użyciu środkowego klawisza myszy, nastąpi przejście do głównych opcji projektowania.




**Rys. 4.16.** Obiekt z wykonana partycją


Dodatkowo konieczne jest wygenerowanie punktu referencyjnego, do którego będą przypisane przyszłe warunki brzegowe. W tym celu, należy przejść do zakładki *Tools/Reference Point*, po czym wskazać skrajny punkt elementu *Platforma*, zgodnie z rys. 4.17.




Rys. 4.17. Utworzenie punktu referencyjnego

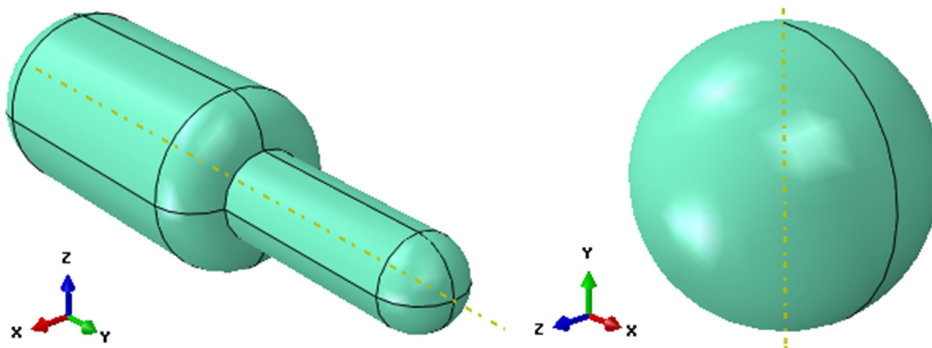
### 4.3 Definicja właściwości materiałowych – moduł *Property*

Właściwości materiałowe są definiowane w module *Property* poprzez użycie opcji *Create Material* . W nowo otwartym oknie następuje określenie nazwy materiału jako *Tworzywo\_Sztuczne*. Następnie, należy przejść do zakładki *Mechanical/Elasticity/Elastic*, w celu określenia podstawowych cech opisujących materiał. Moduł odkształcalności liniowej wynosi *Young's Modulus: 2250 [MPa]* oraz współczynnik Poissona stanowiący stosunek odkształcenia poprzecznego do podłużnego *Poisson's Ratio: 0.4*. Z uwagi na realizację zagadnienia dynamicznego, niezbędne jest określenie gęstości materiału. Celem określenia pożądanej gęstości, należy przejść do zakładki *General/Density*. W polu *Mass Density*, konieczne jest wpisanie gęstości w poprawnej jednostce. Z uwagi na to, iż model był tworzony w [mm], gęstość musi być podana w jednostce zgodnej jako [t/mm<sup>3</sup>]. W omawianym polu należy nanieść wartość *3E-009* oraz zatwierdzić wprowadzone dane poleceniem *OK*.

W odniesieniu do zaprojektowanego elementu o nazwie *Kregiel i Kula* należy utworzyć sekcję z odpowiednio przypisanymi właściwościami materiałowymi za pomocą narzędzia *Create Section* , definiując nazwę sekcji jako *Tworzywo\_Sztuczne* oraz właściwości *Solid/Homogeneous*, zatwierdzając wprowadzone dane poleceniem *Continue*. W nowo otwartym oknie należy wybrać *Material: Tworzywo\_Sztuczne*, zatwierdzając *OK*.


Utworzoną w powyższy sposób sekcję należy przypisać do wykonanych modeli o nazwie *Kregiel oraz Kula*, wybierając nad ekranem roboczym w okienku *Part* poszczególne części i wykorzystując narzędzie *Assign Section* .

Po zaznaczeniu odpowiedniej części i zatwierdzeniu wyboru poleceniem *Done*, należy wybrać odpowiednią sekcję *Tworzywo\_Sztuczne* o typie *Solid* i zaakceptować przypisanie sekcji poleceniem *OK* w przypadku obydwu części.




Rys. 4.18. Graficzna prezentacja poprawnie przypisanych cech materiałowych

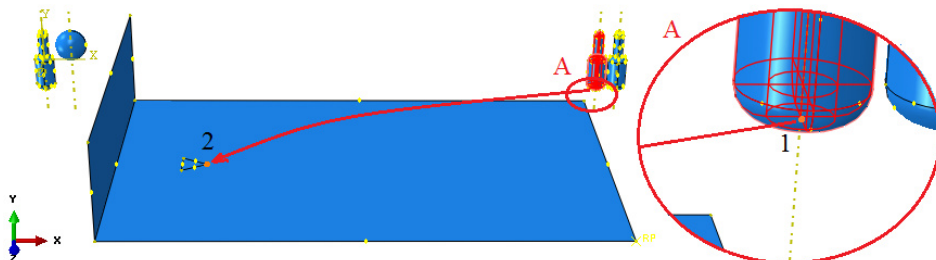
#### 4.4 Tworzenie instancji części – *moduł Assembly*

W bieżącym module należy dokonać utworzenia instancji wykonanych elementów. Model numeryczny składa się z trzech różnych podzespołów, przy czym jeden z elementów należy wczytać trzykrotnie. W tym celu należy początkowo wykorzystać narzędzie *Create Instance* , zaznaczając w oknie listy części zarówno element *Kregiel*, *Kula* i *Platforma* (z wciśniętym klawiszem *Shift*), przy jednoczesnym wybraniu opcji *Auto-offset from other instances* i zatwierdzić wybór poleceniem *OK*. Do wczytanych części należy dwukrotnie dodać element *Kregiel*. Utworzone instancje przedstawiono na rys. 4.19.




Rys. 4.19. Instancje części

W ramach modułu *Assembly* konieczne jest dokonanie złożenia wstawionych instancji. Po wczytaniu elementów należy je złożyć odpowiednio w przestrzeni, używając wstępnie opcji *Translate Instance* , a następnie wybrać jeden z wstawionych elementów o nazwie *Kregiel* oraz zatwierdzić opcją *Done*. Po tej operacji pojawiają się punkty charakterystyczne na wszystkich elementach. Należy wybrać odpowiedni punkt z jednego elementu względem punktu na drugim elemencie zgodnie z poniższym rys. 4.20 i wybrać polecenie *OK*, aby nastąpiło odpowiednie złożenie.




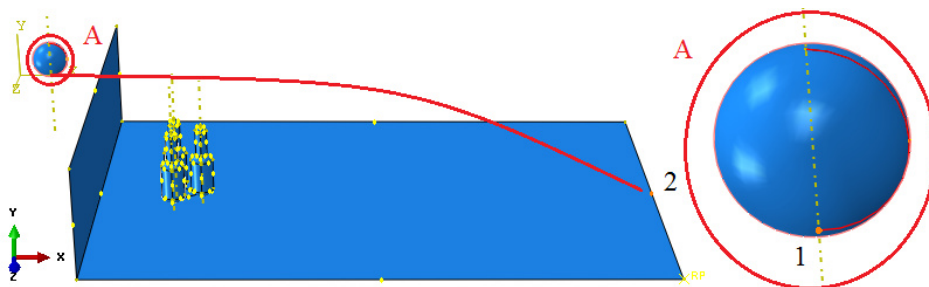
Rys. 4.20. Wybór punktów względem pierwszej translacji

Następnie konieczne jest ponowne użycie opcji *Translate Instance* , wybór drugiego elementu *Kregiel* oraz zatwierdzenie opcją *Done*. Po wyborze odpowiednich punktów celem translacji zgodnie z rys. 4.21 i zatwierdzeniu wyboru opcją *OK*, nastąpi realizacja przemieszczenia. Analogicznie postępując, należy dokonać translacji w przypadku trzeciego elementu *Kregiel*.




Rys. 4.21. Graficzna prezentacja modelu po wykonaniu trzech translacji

Następnie konieczne jest ponowne użycie opcji *Translate Instance* , wybór elementu *Kula* oraz zatwierdzenie opcją *Done*. Po wyborze odpowiednich punktów celem translacji zgodnie z rys. 4.22 i zatwierdzeniu wyboru opcją *OK*, nastąpi realizacja pożądanego przemieszczenia.



Rys. 4.22. Wybór punktów do translacji


Ostatni etap złożenia stanowi podniesienie elementu *Kula* o 25 [mm] względem osi *Y*. W tym celu należy skorzystać z opcji *Translate Instance* , dokonać wyboru podzespołu *Kula* oraz zatwierdzić wybór opcją *Done*. Komunikat w dolnej części okna roboczego *Select a start point for the translation vector*, należy zatwierdzić klawiszem *Enter*. Następnie w ramach komunikatu *Select an end point for the translation vector*, należy w środkowej współrzędnej dotyczącej przemieszczenia po osi *Y*, nanieść wartość 25.0 oraz dokonać akceptacji klawiszem *Enter* i poleceniem *OK*. Graficzna prezentacja poprawnie przygotowanego złożenia modelu numerycznego jest zgodna z rys. 4.23.



Rys. 4.23. Graficzna prezentacja złożenia





## 4.5 Definicja analizy numerycznej – moduł *Step*

Analiza numeryczna przeprowadzona zostanie jako zadanie dynamiczne. Wybierając narzędzie *Create Step* , należy ustalić nazwę kroku obliczeniowego jako *Dynamika* i wybrać typ analizy jako *Dynamic, Explicit* oraz zatwierdzić wybór poleceniem *Continue*. W nowo otwartym oknie w pierwszej z zakładek *Basic*, należy nanieść wyłącznie wartość czasu trwania analizy numerycznej w polu *Time period*: 2 oraz włączyć opcję *Nlgeom* na *ON*. Podana wartość jest wyrażona w sekundach. W trzeciej z zakładek *Mass scaling*, konieczne jest użycie opcji *Use scaling definitions below* oraz wybranie w dolnej części otwartego okna roboczego polecenia *Create*. W okienku *Scale by factor*, należy nanieść wartość 100 oraz zatwierdzić opcją *OK*. Okno związane z określaniem procesu dynamicznego również powinno być zaakceptowane poleceniem *OK*.

Zgodnie z zasadą przyspieszenia procesu obliczeniowego związanego ze skalowaniem masy obiektów poddanych procesom dynamicznym, naniesiona wartość skalowania ma wpływ na przebieg samej analizy i otrzymany wynik powinien zostać przeanalizowany. W przypadku wykorzystywania w obliczeniach procesu skalowania masy, przyspieszy znacząco realizacja obliczeń. Skalowanie masy, często wiąże się z występowaniem niepożądanych błędów numerycznych, jednak przy niewielkim współczynniku skalowania, błędy symulacyjne są często niezauważalne.


## 4.6 Interakcje modelu numerycznego – moduł *Interaction*

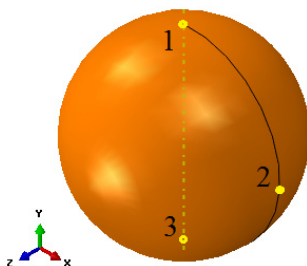
W module związanym z interakcjami należy początkowo ustalić typ kontaktu oraz miejsca współpracy podzespołów, wchodzących w skład całego modelu. W tym celu niezbędne jest wstępne zdefiniowanie rodzaju kontaktu, jaki ma występować na powierzchniach styku elementów. Należy wybrać polecenie *Create Interaction Property* , nazwę zdefiniować jako *Kontakt* oraz wybrać typ współpracy powierzchni z listy o nazwie *Contact* i zatwierdzić wybór przyciskiem *Continue*. W nowo otwartym oknie niezbędne jest określenie cech wybranego kontaktu. Należy, zatem wybrać zakładkę *Mechanical/Tangential Behavior* i zaznaczyć opcję *Frictionless* ze względu na pominięcie współczynnika tarcia przy uderzeniu. Kolejno w zakładce *Mechanical/Normal Behavior* powinna zostać wybrana opcja „*Hard*” *Contact* oraz *Default* w odpowiednich oknach wyboru, z faktu uwzględnienia niezbędnego rodzaju kontaktu na powierzchniach normalnych współpracujących podzespołów. Dodatkowo zaznaczenie opcji *Allow separation after contact* spowoduje współpracę zaprojektowanych elementów w ramach uderzenia. Wszelkie wybory zatwierdzić należy opcją *OK*.

Następnym zagadnieniem do zdefiniowania będzie określenie miejsca współpracy zaprojektowanych podzespołów kompletnego modelu. Należy początkowo wybrać opcję *Create Interaction* , zdefiniować nazwę jako *Kontakt*, z informacji *Step* wybrać z rozwinięcia utworzony krok obliczeniowy o nazwie *Initial* i typ kontaktu *General contact (Explicit)* oraz zatwierdzić wszystkie wybory poleceniem *Continue*. W nowo otwartym oknie bez zmian pozostawić należy typ kontaktu jako *All\* with self*, przy czym w dolnej części okna roboczego z właściwości kontaktowych *Contact properties*, konieczny jest wybór w podopcji *Global property assignment*, wcześniej utworzonej relacji o nazwie *Kontakt*. Wszelkie operacje należy zatwierdzić poleceniem *OK*.


## 4.7 Budowa siatki elementów skończonych – *moduł Mesh*

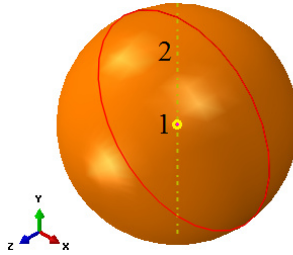
Proces dyskretyzacji odbędzie się kilku etapowo. Początkowo niezbędne jest przeprowadzenie odpowiedniego partycjonowania, w odniesieniu do zaprojektowanego elementu *Kula*. Po przełączeniu wyświetlania *Object: Part: Kula*, będzie możliwe rozpoczęcie partycjonowania.

W tym celu konieczne jest użycie opcji *Partition Cell: Define Cutting Plane* . Następnie należy wybrać opcję *3 Points* oraz zaznaczyć kolejno trzy punkty zgodnie z rys. 4.24 oraz użyć polecenia *Create Partition*.



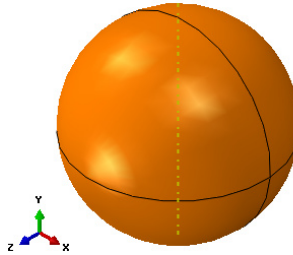
Rys. 4.24. Wybór punktów celem wykonania partycji

Po utworzeniu pierwszej partycji, konieczne jest ponowne użycie opcji *Partition Cell: Define Cutting Plane* , zaznaczenie całego obiektu i zatwierdzenie poleceniem *Done*. W ramach wyboru podopcji z dolnej listwy programu *Point & Normal*, zostanie utworzona druga partycja. Należy wybrać kolejno punkt ze środka elementu *Kula*, następnie oś elementu przebiegającą wzdłuż osi *Y* zgodnie z rys. 4.25 oraz użyć polecenia *Create Partition*.




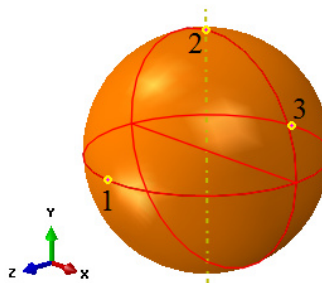
**Rys. 4.25.** Wybór punktu i osi celem wykonania partycji

Po wykonaniu drugiej partycji, graficzna prezentacja elementu *Kula* będzie zgodna z rys. 4.26.



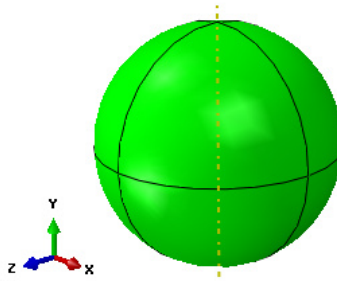
**Rys. 4.26.** Model po wykonaniu drugiej partycji

Następnie, konieczne jest użycie opcji *Partition Cell: Define Cutting Plane* . Następnie należy wybrać podopcję *3 Points* oraz zaznaczyć kolejno trzy punkty zgodnie z rys. 4.27 oraz użyć polecenia *Create Partition*.



**Rys. 4.27.** Wybór punktów celem wykonania trzeciej partycji

Po wykonaniu trzeciej partycji, graficzna prezentacja elementu *Kula* będzie zgodna z rys. 4.28.



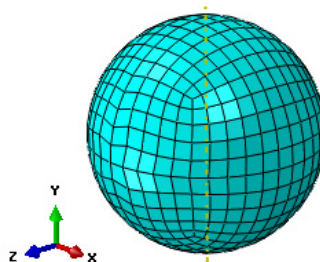
Rys. 4.28. Model po wykonaniu drugiej partycji

Proces przypisania siatki sprowadza się początkowo do wykorzystania narzędzia *Assign Mesh Controls*, przy czym niezbędne jest zaznaczenie całego elementu *Kula* oraz zatwierdzenie poleceniem *Done*. W nowo otwartym oknie konieczność stanowi ustawienie parametrów siatki na *Hex/Structured* oraz zatwierdzenie całości poleceniem *OK*.



Za pomocą opcji *Seed Part* należy ustalić globalną gęstość siatki dyskretyzowanej części w poleceniu *Approximate global size* na wartość 7 i zatwierdzić poleceniem *OK*.


Przy pomocy narzędzia *Assign Element Type*, konieczne jest określenie typu elementów skończonych opisujących siatkę dyskretyzowanej części. Należy dokonać zaznaczenia całego elementu *Kula* oraz zatwierdzić wybór poleceniem *Done*. W nowo otwartym oknie kolejno wybrać *Element Library: Explicit* o typie elementu z dostępnej listy *3D Stress* oraz liniowej funkcji kształtu *Geometric Order: Linear*, przy czym pozostałe opcje bez zmian. Okno należy zamknąć poleceniem dostępnym w jego dolnej części o nazwie *OK*.


Ostatni etap stanowi przypisanie zdefiniowanej siatki. W tym celu wykorzystując narzędzie *Mesh Part* i zatwierdzając wybór polecenia opcją dostępną w dolnej części okna roboczego *Yes*, nastąpi przypisanie siatki elementów skończonych na cały element *Kula*. Opisywany element po procesie dyskretyzacji będzie zaprezentowany zgodnie z rys. 4.29.

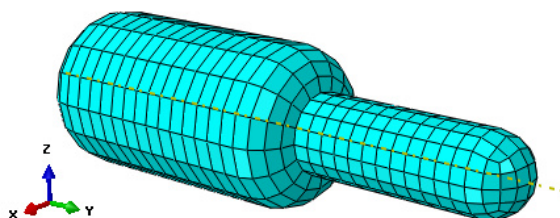


Rys. 4.29. Model dyskretny elementu *Kula*

Po przełączeniu wyświetlania *Object: Part: Kregiel*, będzie możliwe zdefiniowanie siatki elementów skończonych w ramach drugiego podzespołu. Proces przypisania siatki sprowadza się początkowo do wykorzystania narzędzia *Assign Mesh Controls* , przy czym niezbędne jest zaznaczenie całego elementu *Kregiel* oraz zatwierdzenie poleceniem *Done*. W nowo otwartym oknie konieczność stanowi ustawienie parametrów siatki na *Hex/Structured* oraz zatwierdzenie całości poleceniem *OK*. Za pomocą opcji *Seed Part* , należy ustalić globalną gęstość siatki dyskretyzowanej części w poleceniu *Approximate global size* na wartość 6 i zatwierdzić poleceniem *OK*.


Przy pomocy narzędzia *Assign Element Type* , konieczne jest określenie typu elementów skończonych opisujących siatkę dyskretyzowanej części. Należy dokonać zaznaczenia całego elementu *Kregiel* oraz zatwierdzić wybór poleceniem *Done*. W nowo otwartym oknie kolejno wybrać *Element Library: Explicit* o typie elementu z dostępnej listy *3D Stress* oraz liniowej funkcji kształtu *Geometric Order: Linear*, przy czym pozostałe opcje bez zmian. Okno należy zamknąć poleceniem dostępnym w jego dolnej części o nazwie *OK*.


Ostatni etap stanowi przypisanie zdefiniowanej siatki. W tym celu wykorzystując narzędzie *Mesh Part* , i zatwierdzając wybór polecenia opcją dostępną w dolnej części okna roboczego *Yes*, nastąpi przypisanie siatki elementów skończonych na cały element *Kregiel*. W przypadku braku możliwości przypisania siatki, należy dokonać korekt w partycjonowaniu. Opisywany element po procesie dyskretyzacji będzie zaprezentowany zgodnie z rys. 4.30.





Rys. 4.30. Model dyskretny elementu *Kregiel*

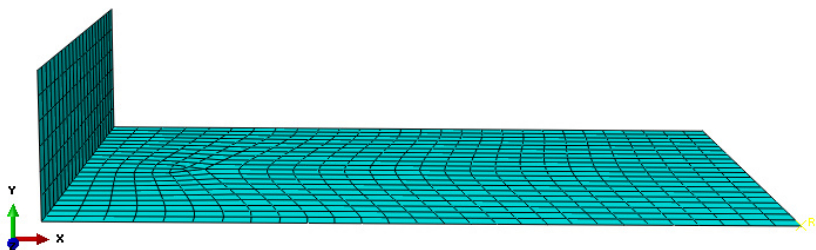
Po przełączeniu wyświetlania *Object: Part: Platforma*, będzie możliwe zdefiniowanie siatki elementów skończonych w ramach trzeciego podzespołu. Następny etap stanowi przypisanie siatki elementów skończonych w ramach nieodkształcalnego podzespołu *Platforma*. Po przełączeniu wyświetlania *Object: Part: Platforma*, możliwy będzie dalszy etap dyskretyzacji.

Proces przypisania siatki sprowadza się początkowo do wykorzystania narzędzia *Assign Mesh Controls* . W nowo otwartym oknie konieczność stanowi ustawienie parametrów siatki na *Quad/Free/Medial axis* oraz zatwierdzenie wyboru poleceniem *OK*.

Za pomocą opcji *Seed Part* , należy ustalić globalną gęstość siatki dyskretyzowanej części w poleceniu *Approximate global size* na wartość 50 i zatwierdzić poleceniem *OK*.

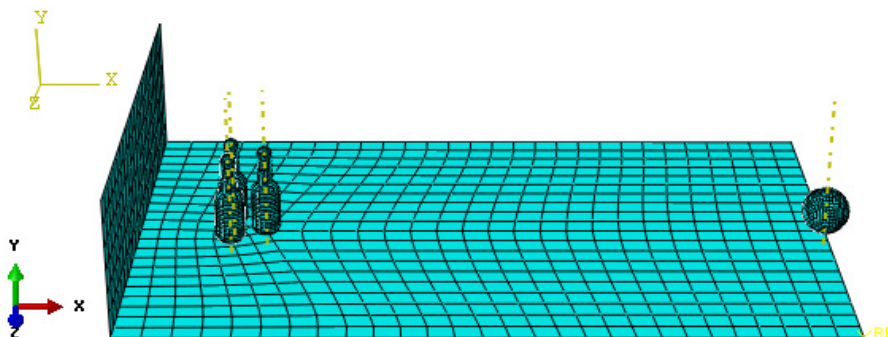
Przy pomocy narzędzia *Assign Element Type* , konieczne jest określenie typu elementów skończonych opisujących siatkę dyskretyzowanej części. W nowo otwartym oknie należy kolejno wybrać *Element Library: Explicit* o typie elementu z dostępnej listy *Discrete Rigid Element* oraz liniowej funkcji kształtu *Geometric Order: Linear*, przy czym pozostałe opcje bez zmian. Okno należy zamknąć poleceniem dostępnym w jego dolnej części o nazwie *OK*.

Ostatni etap stanowi przypisanie zdefiniowanej siatki. W tym celu wykorzystując narzędzie *Mesh Part* , i zatwierdzając wybór polecenia opcją dostępną w dolnej części okna roboczego *Yes*, nastąpi przypisanie siatki elementów skończonych na cały element *Platforma*. Opisywany element po procesie dyskretyzacji będzie zaprezentowany zgodnie z rys. 4.31.



Rys. 4.31. Model dyskretny elementu *Platforma*


Celem przedstawienia graficznej prezentacji przypisanej siatki elementów skończonych w odniesieniu do wszystkich podzespołów, należy wybrać z górnej części programu zakładkę *Object: Assembly*.

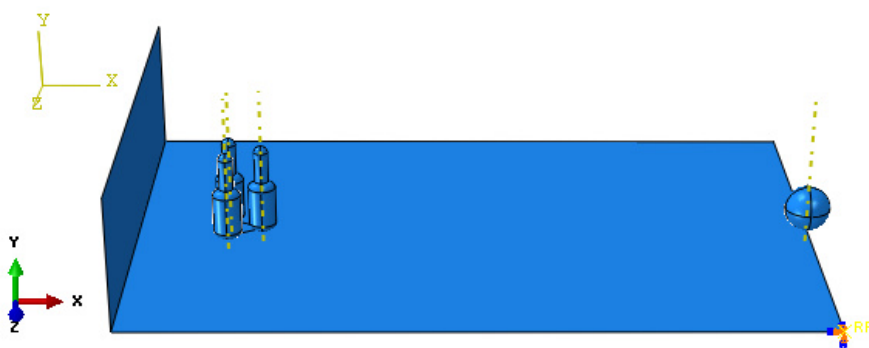


Rys. 4.32. Model dyskretny


## 4.8 Definicja warunków brzegowych – moduł Load

Warunki brzegowe modelu numerycznego stanowią określenie odpowiedniego utwierdzenia elementu o nazwie *Platforma* oraz ustalenie prędkości, z jaką musi się poruszać element o nazwie *Kula*.

Definicję warunków brzegowych należy rozpocząć od utwierdzenia elementu *Platforma*. W tym celu konieczny jest wybór opcji *Create Boundary Condition* , nadając nazwę *Utwierdzenie*, w kroku analizy *Step: Initial*, wybierając metodę definicji warunków brzegowych *Displacement/Rotation*. Po zatwierdzeniu ustawień poleceniem *Continue*, należy zaznaczyć i zatwierdzić poleceniem *Done*, punkt referencyjny *RP* przypisany do obiektu. Następnie konieczne jest zablokowanie wszystkich stopni swobody, po czym akceptacji wyboru dokonuje się opcją *OK*, co zostało przedstawione na rys. 4.33.

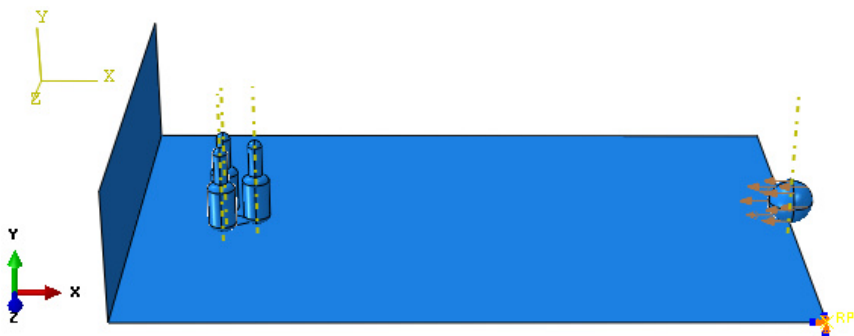


Rys. 4.33. Utwierdzenie elementu *Platforma*


Kolejny etap stanowi zdefiniowanie warunku brzegowego związanego z prędkością elementu *Kula*. Określenie warunku brzegowego dotyczącego nadania prędkości w odniesieniu do elementu uderzającego, następuje poprzez użycie opcji *Create Predefined Field* . Po zdefiniowaniu nazwy jako *Predkosc*, w kroku analizy *Step: Initial*, należy wybrać metodę definicji warunków brzegowych *Mechanical/Velocity*.

Po zatwierdzeniu ustawień poleceniem *Continue*, należy zaznaczyć i zatwierdzić poleceniem *Done* cały element *Kula*. Następnie konieczne jest zdefiniowanie wartości prędkości przemieszczania się podzespołu w ramach pierwszego stopnia swobody – przemieszczanie się względem osi *X*. W tym celu należy nanieść wartość  $-1000$  [mm/s] w pierwszej komórce. Finalny etap stanowi akceptacja zdefiniowanego warunku brzegowego poleceniem *OK*.


Poprawnie zdefiniowane warunki brzegowe będą zgodne z prezentacją graficzną przedstawioną na rys. 4.34.




Rys. 4.34. Graficzna prezentacja warunków brzegowych

Definicję obciążenia w ramach uwzględnienia oddziaływania grawitacji należy wykonać z wykorzystaniem narzędzia *Create Load*  w kroku *Step: Dynamika*, wybierając w kategorii *Mechanical* typ obciążenia *Gravity* i zatwierdzając poleceniem *Continue*. W nowo otwartym oknie konieczne jest zdefiniowanie wartości oddziaływania grawitacyjnego w ramach drugiego stopnia swobody – kierunku przeciwny do osi *Y*. W tym celu należy nanieść wartość  $-9810$  [mm/s<sup>2</sup>] drugiej komórce. Finalny etap stanowi akceptacja zdefiniowanego rodzaju obciążenia (przy uwzględnionej podopcji *Region: Whole Model*) poleceniem *OK*.

## 4.9 Wykonanie obliczeń numerycznych – moduł *Job*

W celu przygotowania zadania obliczeniowego należy wykorzystując narzędzie *Create Job* , nanieść nazwę zadania *Name: Kregle*, po czym zatwierdzić poleceniem *Continue*. W przypadku możliwości równoległego wykorzystania w procesie obliczeń numerycznych większej liczby rdzeni procesora, można w zakładce *Parallelization* wybrać opcję *Use multiple processors* wpisując odpowiednią liczbę rdzeni (np. 2 lub 4). Następnie należy zatwierdzić zadanie obliczeniowe z ustawieniami domyślnymi poleceniem *OK*.

Obliczenia numeryczne należy uruchomić wykorzystując narzędzie *Job Manager* , poprzez wybranie polecenia *Submit*. Przebieg procesu obliczeń numerycznych można obserwować poprzez włączenie polecenia *Monitor*.

Zakończenie procesu obliczeń numerycznych zostanie zasygnalizowane odpowiednim komunikatem w oknie dialogowym *Monitor* oraz przez osiągnięcie w zakładce *Total Time* wartości zgodnej w parametrem czasu analizy zdefiniowanym w ramach ustalonych kroków obliczeniowych 2. Po zakończeniu procesu obliczeń w celu prezentacji wyników należy włączyć polecenie *Results*.

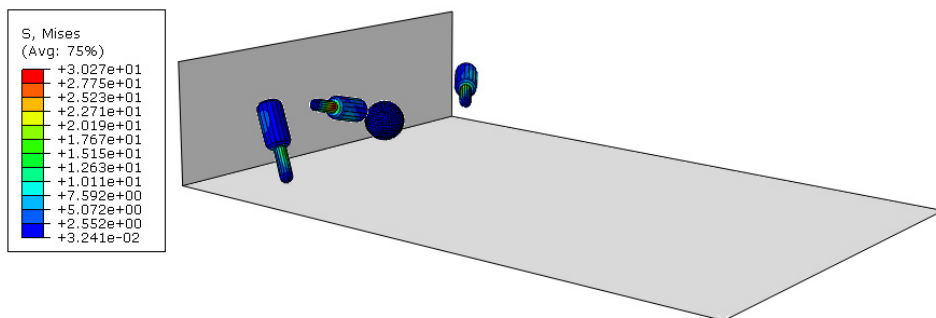


## 4.10 Wyniki obliczeń numerycznych – *moduł Visualization*

Analiza otrzymanych wyników przeprowadzona zostanie w głównej mierze na podstawie rozkładów naprężeń zredukowanych z uwzględnieniem postępujących zjawisk dynamicznych, zgodnie z hipotezą wytrzymałościową Hubera-Misesa-Hencky'ego (H-M-H). Wizualizację rozkładów naprężenia zredukowanego H-M-H przy jednoczesnym wystąpieniu procesu dynamiki otrzymamy aktywując narzędzie *Plot Contours on Deformed Shape*. Zwiększenie czcionki wyświetlanych wartości liczbowych można uzyskać wykorzystując narzędzie z górnego menu programu *Viewport/Viewport Annotation Options*. W tym celu należy w nowo otwartym oknie dialogowym w zakładce *Legend* zaznaczyć polecenie *Set Font*, po czym podopcję *Size*, zmieniając rozmiar czcionki wyświetlanej na ekranie – zmianę należy zatwierdzić poleceniem *OK*.

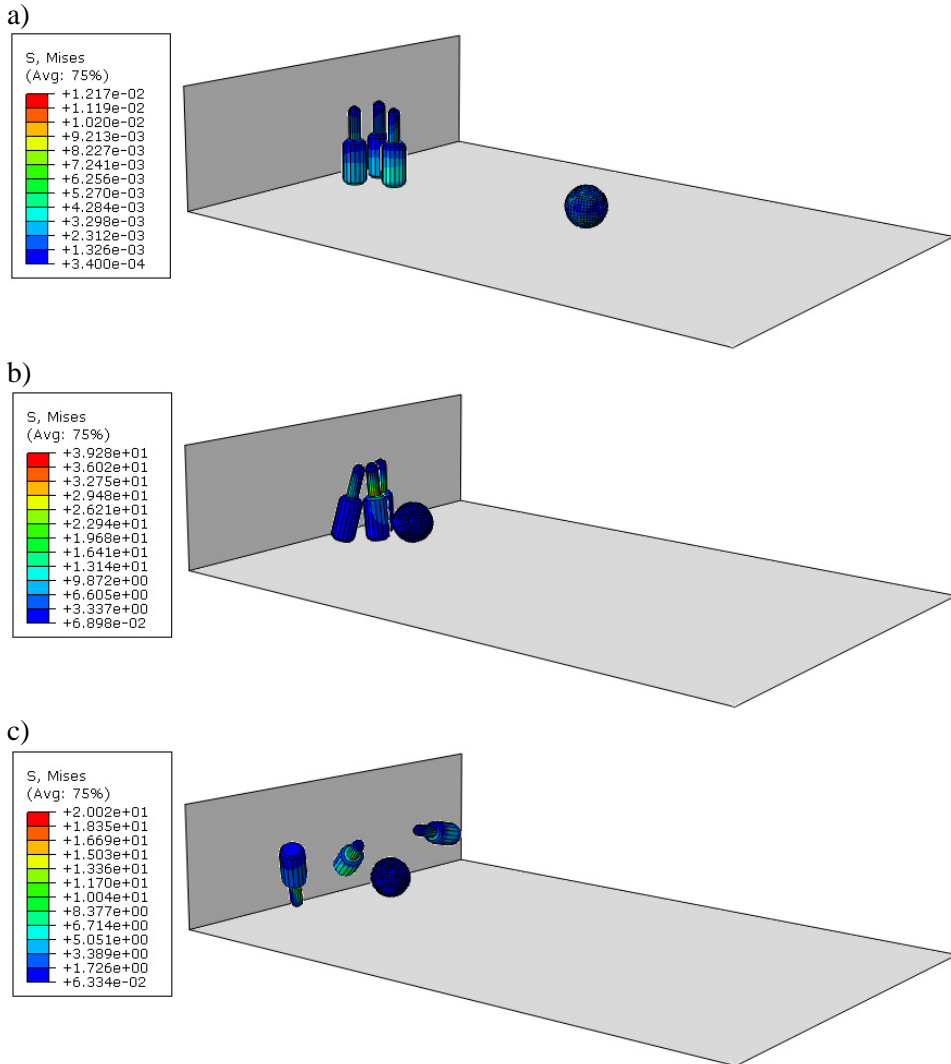
W celu obserwacji zachowania się modelu krok po kroku w trakcie procesu dynamicznego należy posługiwać się przewijaniem klatek animacji przy użyciu opcji *Previous* lub *Next* ◀ ▶, znajdujących się nad oknem roboczym programu. Wyświetlane wartości naprężenia zredukowanego podawane są w tym przypadku w [MPa], co wynika bezpośrednio z jednostek wprowadzanych w trakcie przygotowania modelu numerycznego.

Ogólną mapę naprężenia zredukowanego w modelu numerycznym, w odniesieniu do ostatniego kroku obliczeniowego – uderzenia elementu *Kula* w elementy typu *Kregiel* znajdujące się na sztywnym podspole *Platforma*, przedstawiono na rys. 4.35.



Rys. 4.35. Wynik naprężeń maksymalnych

Wynik obliczeń numerycznych, w odniesieniu do głównych etapów procesu dynamicznego (stan przed uderzeniem, w trakcie oraz po uderzeniu), przedstawiono na rys. 4.36.



**Rys. 4.36.** Symulacja procesu dynamicznego:  
a) stan przed uderzeniem, b) moment uderzenia, c) stan po uderzeniu.

W przypadku uzyskania wyniku końcowego w postaci braku wystąpienia efektu rozbicia elementów typu *Kregiel*, należy zwielokrotnić czas obliczeń w module *Step* lub wartość prędkości elementu *Kula* w module *Load* oraz dokonać ponownego przeliczenia zagadnienia. Dodatkowo, możliwe jest wygenerowanie charakterystyki prędkości w czasie, z dowolnego punktu kuli do kręgli – co umożliwi na dogłębniejsze rozpatrzenie zagadnienia.

## 5. BADANIE PROCESU ZGNIOTU


### 5.1 Wprowadzenie






Przykładem analizy numerycznej jest proces zgniotu, cienkościennej cylindrycznej próbki aluminiowej, stanowiący o rozwiązaniu zagadnienia związanego z wyznaczeniem obszarów złożonej deformacji materiału, jak i uwzględnienia realizacji złożonego zagadnienia kontaktowego. Symulacja zostanie przeprowadzona w oparciu o trzy różne przypadki zgniotu, w zależności od konfiguracji złożenia modelu numerycznego.

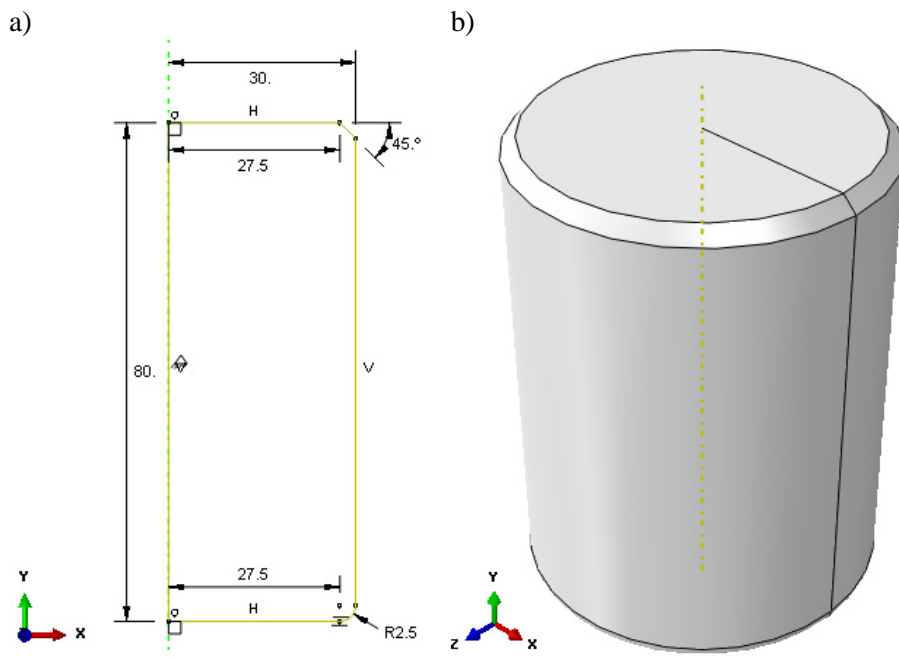
W prezentowanym przykładzie zostanie przeprowadzona dyskretyzacja konstrukcji przy wykorzystaniu elementów powłokowych typu S4R (elementy powłokowe czterowęzłowe). Dodatkowo w ramach projektowania zjawiska numerycznego, zastosowane zostaną nieodkształcalne elementy powłokowe R3D4, w przypadku płaszczyzn realizujących proces zgniotu próbki aluminiowej.

Proces zostanie przeprowadzony jako szybkie zagadnienie dynamiczne, celem osiągnięcia poprawnych rezultatów w jak najkrótszym czasie obliczeniowym. W ramach analizy zostaną rozpatrzone różne postacie deformacji struktury na skutek zmiennych warunków brzegowych.

### 5.2 Budowa modelu geometrycznego – *moduł Part*




Model geometryczny zostanie wykonany jako element powłokowy. Wykorzystując narzędzie *Create Part*  należy nadać nazwę elementu *Puszka* oraz ustalić parametry geometryczne części jako element 3D, ciało odkształcalne typu *Deformable*, wykonane jako element powłokowy *Shell* metodą obrócenia profilu *Revolution*, akceptując ustawienia poleceniem *Continue*.

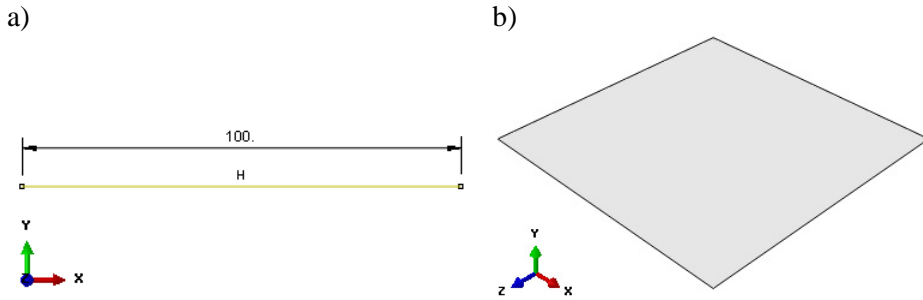
Szkic profilu części należy wykonać z wykorzystaniem zarówno narzędzia *Create Lines: Connected*  oraz narzędzia pozwalającego na rysowanie okręgów *Create Circle: Center and Perimeter* . W przypadku dodatkowo naszkicowanych przedłużeń linii tworzących szkic, możliwe jest docięcie niepotrzebnych części przy wykorzystaniu polecenia *Auto-Trim* . Niezbędne wymiary należy nadać przy użyciu narzędzia *Add Dimension* , natomiast edycji oraz modyfikacji wymiarów przeprowadzić narzędziem *Edit Dimension Value* , poprzez zaznaczenie danego wymiaru i zadeklarowanie poprawnej jego wartości. Zwymiarowany szkic przedstawiono na rys. 5.1a.



**Rys. 5.1.** Graficzna prezentacja elementu *Puszka*:  
a) szkic, b) model przestrzenny

Po zatwierdzeniu narysowanego szkicu poleceniem *Done*, w dolnej części okna roboczego programu, lub po dwukrotnym użyciu środkowego przycisku myszy, nastąpi automatyczne opuszczenie szkicownika. Program poprosi o wprowadzenie kąta obrotu narysowanego profilu, względem pionowej linii stanowiącej oś obrotu. Przy parametrze *Angle* w nowo otwartym oknie, konieczne jest naniesienie pełnego kąta obrotu wynoszącego 360 stopni. Po zatwierdzeniu poleceniem *OK* wprowadzonego parametru, nastąpi wygenerowanie modelu przestrzennego zgodnie z rys. 5.1b.

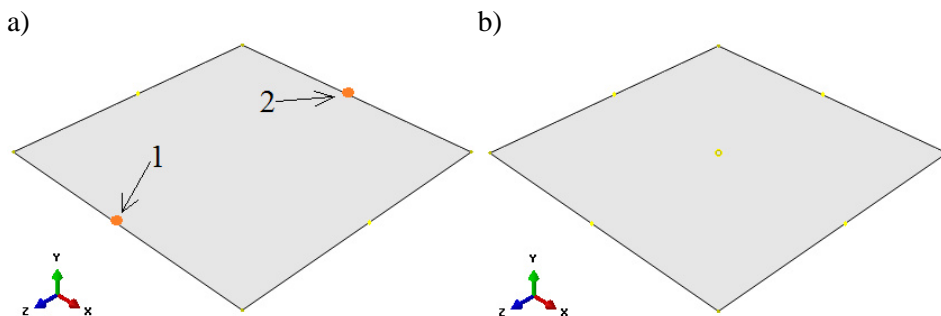
Następny etap stanowi zaprojektowanie nieodkształcalnych płyt realizujących dalszy proces zgniotu. Celem utworzenia omawianych elementów niezbędne jest skorzystanie z narzędzia *Create Part* . W nowo otwartym oknie należy nanieść nazwę elementu *Płyta* oraz ustalić parametry geometryczne części jako element 3D, ciało nieodkształcalne typu *Discrete rigid*, wykonane jako element powłokowy *Shell* metodą wyciągnięcia profilu *Extrusion*, akceptując ustawienia poleceniem *Continue*. Szkic profilu części należy wykonać z wykorzystaniem narzędzia *Create Lines: Connected* . Niezbędny wymiar należy nanieść przy użyciu narzędzia *Add Dimension* . Zwymiarowany szkic przedstawiono na rys. 5.2a.



**Rys. 5.2.** Graficzna prezentacja elementu *Plyta*:  
a) szkic, b) model przestrzenny

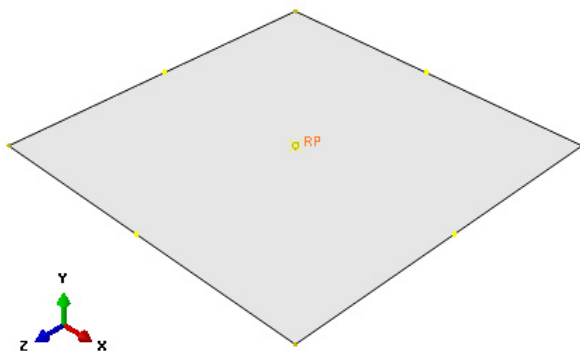
Po zatwierdzeniu narysowanego szkicu poleceniem *Done*, w dolnej części okna roboczego programu, lub po dwukrotnym użyciu środkowego przycisku myszy, nastąpi automatyczne opuszczenie szkicownika. W nowo otwartym oknie należy wprowadzić długość wyciągnięcia *Depth: 100*, ustalając tym samym długość modelu przestrzennego zgodnie z rys. 5.2b oraz zatwierdzając poleceniem *OK*.

Następnie konieczne jest utworzenie punktu w centralnej części elementu *Plyta*. Niezbędne jest wybranie i przytrzymanie lewym klawiszem myszy opcji *Create Datum Point: Enter Coordinates* <sup>(xyz)</sup>, po czym w ramach wyboru podopcji *Create Datum Point: Midway Between 2 Points* należy zaznaczyć dwa punkty, pomiędzy którymi zostanie wygenerowany nowo utworzony kolejny punkt. Wybór punktów należy przeprowadzić zgodnie z rys. 5.3a, na którym jednocześnie przedstawiono miejsce utworzenia punktu (rys. 5.3b).



**Rys. 5.3.** Utworzenie punktu środkowego:  
a) wybór odpowiednich punktów, b) model z punktem środkowym


Dodatkowo konieczne jest wygenerowanie punktu referencyjnego, do którego będą przypisane przyszłe warunki brzegowe. W tym celu, należy przejść do zakładki *Tools/Reference Point*, po czym wskazać środkowy punkt w centralnej części elementu *Plyta*, zgodnie z rys. 5.4.




Rys. 5.4. Utworzenie punktu referencyjnego


Projektowanie części w module *Part*, sprowadza się wyłącznie do wykonania dwóch podzespołów *Puszka* i *Plyta*.

### 5.3 Definicja właściwości materiałowych – *moduł Property*

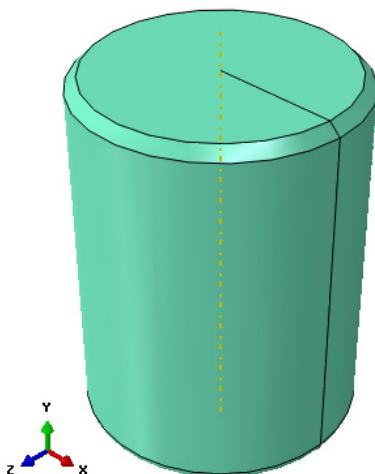
Właściwości materiałowe przypisuje się w module *Property* poprzez użycie opcji *Create Material* . W nowo otwartym oknie następuje określenie nazwy materiału jako *Aluminium*. Następnie, należy przejść do zakładki *Mechanical/Elasticity/Elastic*, w celu określenia podstawowych cech opisujących materiał. Moduł odkształcalności liniowej wynosi *Young's Modulus: 70000* [MPa] oraz współczynnik Poissona stanowiący stosunek odkształcenia poprzecznego do podłużnego *Poisson's Ratio: 0.33*. Po wprowadzeniu danych należy bezpośrednio przejść do zakładki *Mechanical/Plasticity/Plastic*. W pierwszym wierszu w opcji *Yield Stress* należy nanieść wartość granicy plastyczności materiału wynoszącą w tym przypadku *250* [MPa], natomiast odkształcenie plastyczne, odpowiadające poziomowi granicy plastyczności *Plastic Strain* wynosi *0*. Po przejściu klawiszem *Enter* z klawiatury do drugiego wiersza, należy zdefiniować *Yield Stress* jako granicę wytrzymałości materiału równą *300* [MPa], przy odpowiadającym jej wydłużeniu plastycznym próbki przy zerwaniu wynoszącym *9%*, które musi być zdefiniowane liczbowo w podopcji *Plastic Strain* jako *0.09*. Z uwagi na realizację zagadnienia dynamicznego, niezbędne jest określenie gęstości materiału. Celem określenia

pożądaney gęstości, należy przejść do zakładki *General/Density*. W polu *Mass Density*, konieczne jest wpisanie gęstości w poprawnej jednostce. Z uwagi na to, iż model był tworzony w [mm], gęstość musi być podana w jednostce zgodnej jako [t/mm<sup>3</sup>]. Gęstość z reguły podawana jest w jednostce [kg/m<sup>3</sup>], jednak do celów numerycznych poprawnie zamodelowanego procesu, niezbędne jest przeliczenie 2700 [kg/m<sup>3</sup>] na poprawny typ jednostki. W omawianym polu należy nanieść wartość 2.7E-009.

W odniesieniu zaprojektowanego elementu o nazwie *Puszka* należy utworzyć sekcję z odpowiednio przypisanymi właściwościami materiałowymi za pomocą narzędzia *Create Section* , definiując nazwę sekcji jako *Aluminium* oraz właściwości *Shell/Homogeneous*, zatwierdzając wprowadzone dane poleceniem *Continue*. W nowo otwartym oknie należy wybrać *Material: Aluminium* oraz *Shell thickness Value: 0.05*, zatwierdzając *OK*.


W przypadku przypisania sekcji do elementu o nazwie *Puszka*, konieczny jest wybór nad ekranem roboczym w okienku *Part*, odpowiedniej części oraz zastosowanie narzędzia *Assign Section* . Po zaznaczeniu części o nazwie *Puszka* w przestrzeni roboczej i zatwierdzeniu wyboru poleceniem *Done*, należy w nowo otwartym oknie zdefiniować typ sekcji jako *Aluminium* – o składowym typie sekcji *Shell*, z opcją *Shell Offset* w podopcji *Definition* jako *Middle surface*. Okno przypisywania sekcji materiałowej do elementu *Puszka*, należy zatwierdzić poleceniem *OK*. Po poprawnym przypisaniu właściwości materiałowych, element zmieni barwę na kolor zielony, zgodnie z rys. 5.5.

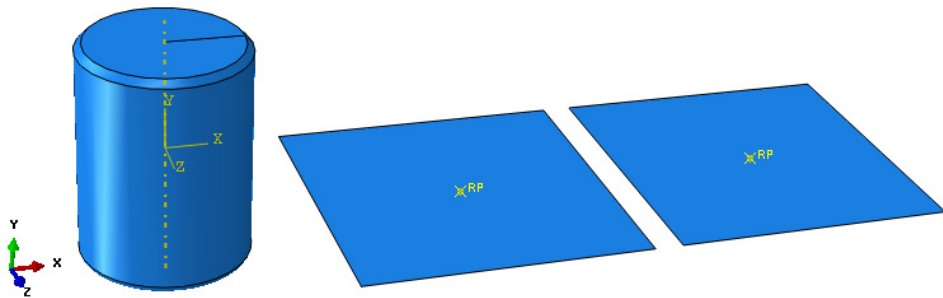
W przypadku elementów nieodkształcalnych nie jest możliwe definiowanie cech materiałowych, zatem pracę w module *Property* należy zakończyć na definicji właściwości materiałowych elementu odkształcalnego.




**Rys. 5.5.** Graficzna prezentacja poprawnie przypisanych cech materiałowych

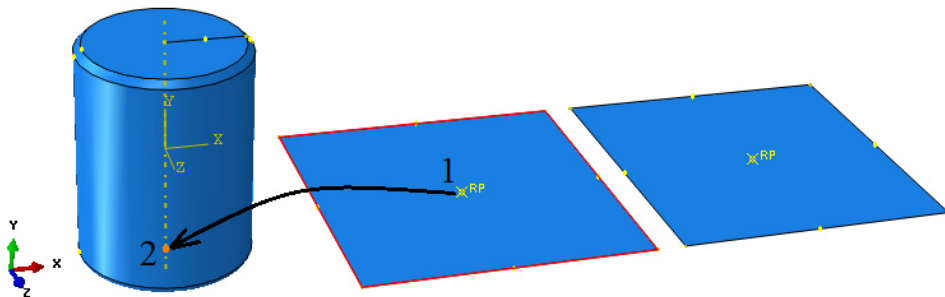
## 5.4 Tworzenie instancji części – *moduł Assembly*

W bieżącym module należy dokonać utworzenia instancji wykonanych elementów powłokowych. Model numeryczny składa się z dwóch podzespołów, przy czym jeden z elementów należy wczytać dwukrotnie. W tym celu należy początkowo wykorzystać narzędzie *Create Instance* , zaznaczając w oknie listy części zarówno element *Puszka* i *Płyta* (z wciśniętym klawiszem *Shift*), przy jednoczesnym wybraniu opcji *Auto-offset from other instances* i zatwierdzić wybór poleceniem *OK*. Do wczytanego podzespołu należy dodać przy ponownym wykorzystaniu powyżej opisywanego narzędzia element *Płyta*. Utworzone instancje części przedstawiono na rys. 5.6.




Rys. 5.6. Instancje części

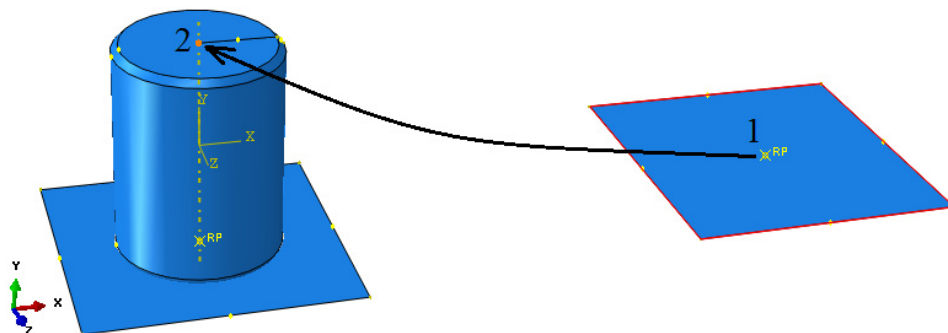
Początkowo należy użyć opcji *Translate Instance* , a następnie wybrać element *Płyta* oraz zatwierdzić opcją *Done*. Po tej operacji pojawią się punkty charakterystyczne na wszystkich elementach. Należy wybrać odpowiedni punkt z jednego elementu względem punktu na drugim elemencie zgodnie z rys. 5.7 i zatwierdzić wybór poleceniem *OK*, aby nastąpiło odpowiednie złożenie.



Rys. 5.7. Wybór punktów celem wykonania pierwszej translacji

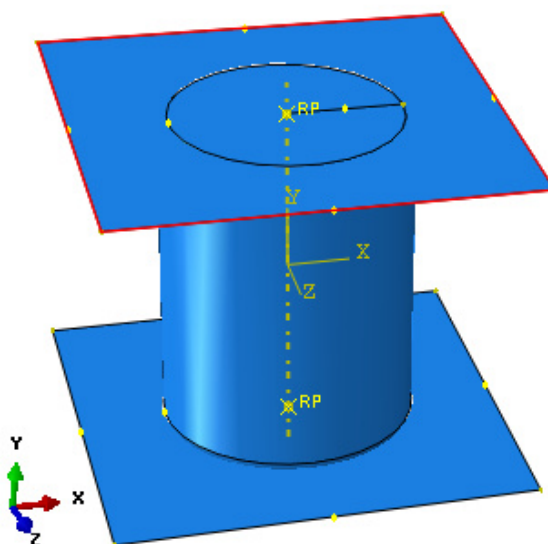


Ponownie używając opcji *Translate Instance* , konieczne jest wybranie drugiego elementu *Płyta* oraz zatwierdzenie wyboru opcją *Done*. Po tej operacji pojawią się punkty charakterystyczne na wszystkich elementach. Należy wybrać odpowiedni punkt z jednego elementu względem punktu na drugim elemencie zgodnie z rys. 5.8 oraz zatwierdzić wybór poleceniem *OK*, aby nastąpiło odpowiednie złożenie.




Rys. 5.8. Wybór punktów celem wykonania drugiej translacji

Po poprawnie zrealizowanym procesie drugiej translacji, dotychczas przeprowadzone złożenie będzie zgodne z rys. 5.9.



Rys. 5.9. Postać modelu numerycznego po drugiej translacji

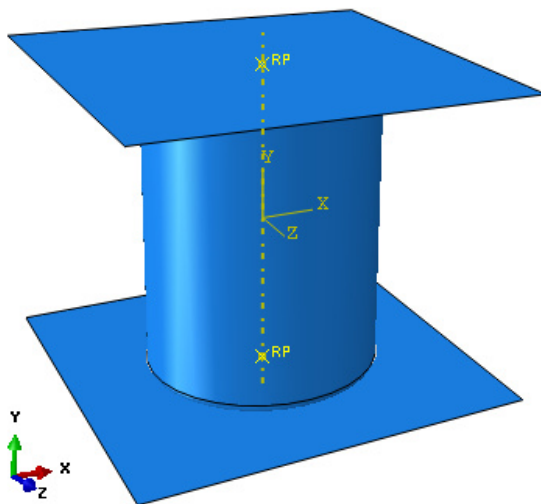
Poraz ostatni używając opcji *Translate Instance* , konieczne jest wybranie elementu *Plyta*, znajdującego się w górnej części elementu *Puszka* oraz zatwierdzenie wyboru opcją *Done*. W dolnej części okna roboczego pojawi się komunikat *Select a start point for the translation vector*, który należy zatwierdzić klawiszem *Enter*. Następnie w ramach komunikatu *Select an end point for the translation vector*, należy w środkowej współrzędnej dotyczącej przemieszczenia po osi *Y*, nanieść wartość *1.0* zgodnie z rys. 5.10 oraz zatwierdzić klawiszem *Enter*. Finalnie, translację należy zatwierdzić poleceniem *OK* w dolnej części okna roboczego, po czym nastąpi odpowiednia modyfikacja złożenia modelu.

Graficzna prezentacja poprawnej definicji przeprowadzonej translacji, w odniesieniu do wprowadzenia koniecznej współrzędnej przemieszczenia elementu *Plyta*, została przedstawiona poniżej.

Select an end point for the translation vector--or enter X,Y,Z:


Rys. 5.10. Definicja trzeciej translacji

Model numeryczny poprawnie przeprowadzonego procesu złożenia w odniesieniu do wszystkich trzech zrealizowanych translacji, przedstawiono w ramach prezentacji graficznej na rys. 5.11.

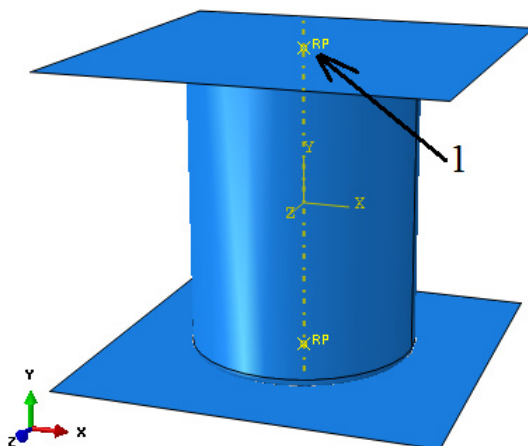


Rys. 5.11. Złożenie modelu numerycznego


## 5.5 Definicja analizy numerycznej – *moduł Step*


Analiza numeryczna przeprowadzona zostanie jako zagadnienie dynamiczne. Wybierając narzędzie *Create Step* , należy ustalić nazwę kroku obliczeniowego jako *Dynamika* i wybrać typ analizy jako *Dynamic, Explicit* oraz zatwierdzić wybór poleceniem *Continue*. W nowo otwartym oknie w pierwszej z zakładek *Basic*, należy nanieść wyłącznie wartość czasu trwania analizy numerycznej w polu *Time period: 0.5* oraz włączyć opcję *Nlgeom* na *ON*. Podana wartość jest wyrażona w sekundach. Ze względu na długi okres oczekiwania towarzyszący skomplikowanym obliczeniom dynamicznym, czas analizy jest możliwie najkrótszy oraz wcześniejsze złożenie uwzględnia niemalże od razu styk elementu *Płyta* ze zgniatanym podzespołem *Puszka*. W trzeciej z zakładek *Mass scaling*, konieczne jest użycie opcji *Use scaling definitions below* oraz wybranie w dolnej części otwartego okna roboczego polecenia *Create*. W okienku *Scale by factor*, należy nanieść wartość *2500* oraz zatwierdzić opcją *OK*. Okno związane z określaniem procesu dynamicznego również powinno być zaakceptowane poleceniem *OK*.

Dodatkowo w bieżącym module, konieczne jest utworzenie punktu pomiarowego, w odniesieniu do którego będą zbierane wyniki obciążenia potrzebnego do zgniotu próbki, w odniesieniu do elementu *Płyta*. Celem utworzenia omawianego punktu pomiarowego, niezbędne jest wybranie zakładki *Tools/Set/Create*. W nowo otwartym oknie należy zdefiniować nazwę *Pomiar*, wybrać typ *Geometry* oraz polecenie *Continue*. Następnym krokiem jest wskazanie punktu referencyjnego *RP* znajdującego się w środkowej części górnego elementu *Płyta*, zgodnie z rys. 5.12.




Rys. 5.12. Wybór odpowiedniego punktu *RP* celem utworzenia punktu pomiarowego

Wybór omawianego punktu należy finalnie zatwierdzić poleceniem *Done*. W opisany sposób został zdefiniowany punkt pomiarowy. Następnym krokiem jest przypisanie do utworzonego punktu pomiarowego, odpowiednich właściwości, związanych ze zbieraniem pożądanego wyników. W tym celu należy przejść do opcji *Field Output Manager* . W dolnej części nowo otwartego okna, niezbędne jest wybranie polecenia *Create*, po czym należy zdefiniować nazwę na *Pomiar* i wybrać finalnie polecenie *Continue*. W oknie związanym z wyprowadzaniem wyników, z górnej podopcji *Domain*, niezbędne jest wybranie opcji *Set* oraz z prawej rozwijalnej listy wcześniej utworzonego punktu pomiarowego o nazwie *Pomiar*. Z poniższej listy możliwych do wyprowadzenia wyników w ramach *Output Variables*, należy rozwinąć wyniki dotyczące przemieszczeń *Displacement/Velocity/Acceleration* i dokonać wyboru wyłącznie pierwszej z dostępnych podopcji wyników *U, Translations and rotations*. Po zwinięciu sekcji wyników *Displacement/Velocity/Acceleration* niezbędne jest rozwinięcie sekcji z wynikami dotyczącymi reakcji *Forces/Reactions* oraz analogiczny wybór pierwszej z dostępnych opcji *RF, Reactions forces and moments*. Po finalnym zwinięciu sekcji dotyczącej reakcji, należy opuścić bieżące okno opcji wyprowadzania wyników poleceniem *OK*, znajdującym się w jego dolnej części.


W ramach stale otwartego okna *Field Output Manager* , została utworzona dodatkowa druga sekcja o nazwie *Pomiar*, związana z wyprowadzeniem wyników dotyczących utworzonego punktu pomiarowego o jednakowej nazwie jak definiowana sekcja. Opisana procedura umożliwi wyprowadzenie wyników sił i przemieszczeń dla nowo zdefiniowanego punktu pomiarowego. Proces ten pozwoli na wygenerowanie wykresu obciążenia (niezbędnego do zgniotu próbki) od zachodzącego przemieszczenia elementu *Płyta*.

## 5.6 Interakcje modelu numerycznego – moduł *Interaction*


W module związanym z interakcjami należy początkowo ustalić typ kontaktu oraz miejsca współpracy podzespołów. W tym celu niezbędne jest wstępnie zdefiniowanie rodzaju kontaktu, jaki ma występować na powierzchniach styku elementów. Należy wybrać polecenie *Create Interaction Property* , nazwę zdefiniować jako *Kontakt* oraz wybrać typ współpracy powierzchni z listy o nazwie *Contact* i zatwierdzić wybór przyciskiem *Continue*.

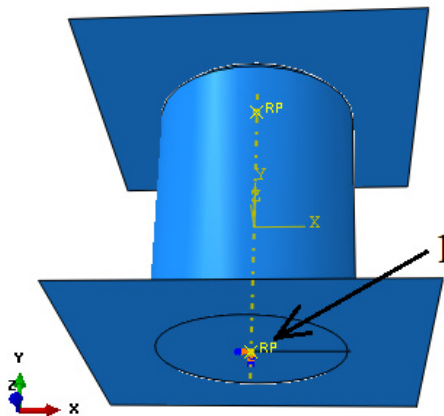
W nowo otwartym oknie niezbędne jest określenie cech wybranego kontaktu. Należy, zatem wybrać zakładkę *Mechanical/Tangential Behavior*, zaznaczyć opcję *Penalty*, uwzględnić współczynnik tarcia w dolnej części okna, oznaczony jako *Friction Coeff* oraz nadać wartość *0.25*. Kolejnym krokiem w zakładce *Mechanical/Normal Behavior* powinna zostać wybrana opcja „*Hard*” *Contact* oraz *Default* w odpowiednich oknach wyboru, z faktu uwzględnienia niezbędnego

rodzaju kontaktu na powierzchniach normalnych współpracujących podzespołów. Dodatkowo konieczne jest zaznaczenie opcji *Allow separation after contact*. Wszelkie wybory zatwierdzić należy opcją *OK*.


Następnym zagadnieniem do zdefiniowania będzie określenie miejsca współpracy zaprojektowanych podzespołów kompletnego modelu. Należy początkowo wybrać opcję *Create Interaction* , zdefiniować nazwę jako *Kontakt*, z informacji *Step* wybrać z rozwinięcia utworzony krok obliczeniowy o nazwie *Initial* i typ kontaktu *General contact (Explicit)* oraz zatwierdzić wszystkie wybory poleceniem *Continue*. W nowo otwartym oknie bez zmian pozostawić należy typ kontaktu jako *All\* with self*, przy czym w dolnej części okna roboczego z właściwości kontaktowych *Contact properties*, konieczny jest wybór w podopcji *Global property assignment*, wcześniej utworzonej relacji o nazwie *Kontakt*. Wszelkie operacje należy zatwierdzić poleceniem *OK*.

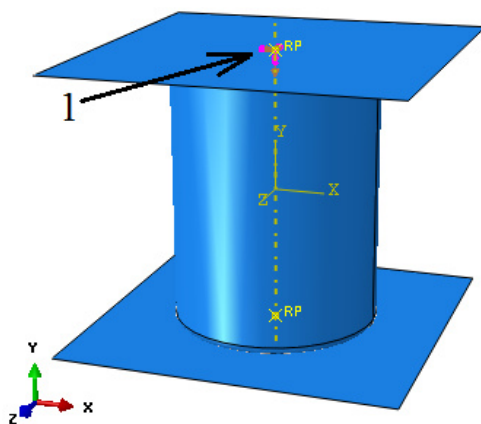
## 5.7 Definicja warunków brzegowych – moduł *Load*

Definicję warunków brzegowych należy rozpocząć od utwierdzenia elementu *Płyta*, znajdującego się w dolnej części elementu *Puszka*. W tym celu konieczny jest wybór opcji *Create Boundary Condition* , nadając nazwę *Utwierdzenie*, w kroku analizy *Step: Initial*, wybierając metodę definicji warunków brzegowych *Displacement/Rotation*. Po zatwierdzeniu ustawień poleceniem *Continue*, należy zaznaczyć i zatwierdzić poleceniem *Done*, punkt referencyjny *RP* przypisany do obiektu *Płyta*. Następnie konieczne jest zablokowanie wszystkich stopni swobody oraz akceptacja wyboru opcją *OK*, co zostało przedstawione na rys. 5.13.



Rys. 5.13. Utwierdzenie dolnego elementu *Płyta*

Kolejny etap stanowi zdefiniowanie warunku brzegowego związanego z prędkością zgniatania w ramach górnego elementu *Płyta*. Określenie warunku brzegowego dotyczącego nadania prędkości w odniesieniu do podzespołu symulującego zgniot, następuje poprzez ponowne użycie opcji *Create Boundary Condition* . Po zdefiniowaniu nazwy jako *Predkosc*, w kroku analizy *Step: Dynamika*, należy wybrać metodę definicji warunków brzegowych oznaczoną jako *Velocity/Angular velocity*. Po zatwierdzeniu ustawień poleceniem *Continue*, należy zaznaczyć i zatwierdzić poleceniem *Done* utworzony wcześniej punkt referencyjny o nazwie *RP* przynależny do górnego podzespołu *Płyta*. Następnie konieczne jest zablokowanie wszystkich stopni swobody, wybierając w tym celu składowe *V1*, *V2*, *V3* oraz *VR1*, *VR2*, *VR3*. Dodatkowo przy zaznaczonym stopniu swobody *V2*, niezbędne jest naniesienie wartości *-80* (zdefiniowana wartość jednocześnie oznacza prędkość elementu w przeciwnym kierunku do osi *Y* w jednostce [mm/s]). Finalny etap stanowi akceptacja zdefiniowanego warunku brzegowego poleceniem *OK*. Poprawnie przypisany warunek brzegowy będzie zgodny z prezentacją graficzną jak na rys. 5.14.





**Rys. 5.14.** Przypisanie prędkości w odniesieniu do górnego elementu *Płyta*


W odpisany powyżej sposób zdefiniowane warunki brzegowe pozwolą na odwzorowanie symulacji dynamicznego procesu zgniotu. Nie ma konieczności definiowania jakichkolwiek warunków brzegowych w odniesieniu do elementu *Puszka*, ze względu na zdefiniowany współczynnik tarcia w ramach przypisywanych interakcji pomiędzy podzespołami.


W przypadku potencjalnie występujących błędów obliczeń numerycznych, należy zdefiniować dodatkowy warunek brzegowy w punkcie referencyjnym górnej płyty (umożliwiając ruch wyłącznie względem osi *Y*, w ramach odebrania odpowiednich translacyjno-rotacyjnych stopni swobody) lub przypisać masę w punktach referencyjnych jednej lub dwóch płyt.

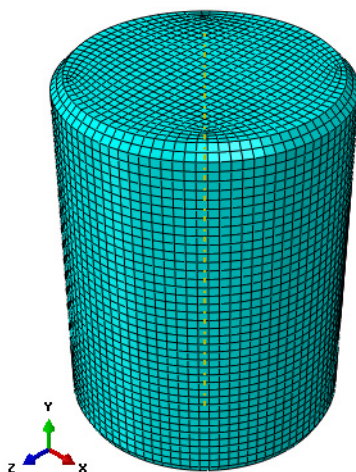
## 5.8 Budowa siatki elementów skończonych – *moduł Mesh*

W ramach modułu *Mesh*, po przełączeniu wyświetlania *Object: Part: Puszka*, będzie możliwe rozpoczęcie dyskretyzacji. Proces przypisania siatki sprowadza się początkowo do wykorzystania narzędzia *Assign Mesh Controls* , przy czym niezbędne jest zaznaczenie całego elementu *Puszka* oraz zatwierdzenie poleceniem *Done*. W nowo otwartym oknie konieczność stanowi ustawienie parametrów siatki na *Quad/Free* z algorytmem jej tworzenia względem osi symetrii modelu *Medial axis* oraz zatwierdzenie poleceniem *OK*.

Za pomocą opcji *Seed Part* , należy ustalić globalną gęstość siatki dyskretyzowanej części w poleceniu *Approximate global size* na wartość 2 i zatwierdzić poleceniem *OK*.


Przy pomocy narzędzia *Assign Element Type* , konieczne jest określenie typu elementów skończonych opisujących siatkę dyskretyzowanej części. Należy dokonać zaznaczenia całego elementu *Puszka* oraz zatwierdzić wybór poleceniem *Done*. W nowo otwartym oknie kolejno wybrać *Element Library: Explicit* o typie elementu z dostępnej listy *Shell* oraz liniowej funkcji kształtu *Geometric Order: Linear*, przy czym pozostałe opcje pozostawić bez zmian. Okno należy zamknąć poleceniem dostępnym w jego dolnej części o nazwie *OK*.


Ostatni etap stanowi przypisanie zdefiniowanej siatki. W tym celu wykorzystując narzędzie *Mesh Part* , i zatwierdzając wybór polecenia opcją dostępną w dolnej części okna roboczego *Yes*, nastąpi przypisanie siatki elementów skończonych na cały element *Puszka*. Opisywany element po procesie dyskretyzacji będzie zaprezentowany zgodnie z rys. 5.15.





Rys. 5.15. Model dyskretny elementu *Puszka*

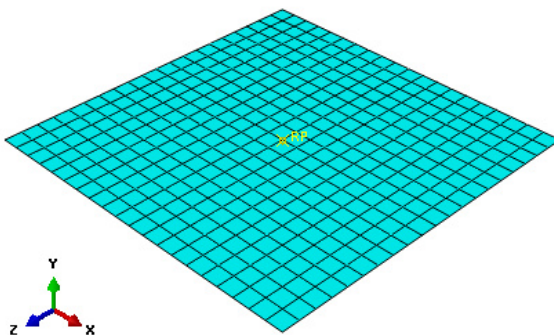
Następny etap stanowi przypisanie siatki elementów skończonych w ramach nieodkształcalnego podzespołu *Płyta*. Po przełączeniu wyświetlania *Object: Part: Płyta*, możliwy będzie dalszy etap dyskretyzacji.

Proces przypisania siatki sprowadza się początkowo do wykorzystania narzędzia *Assign Mesh Controls* . W nowo otwartym oknie konieczność stanowi ustawienie parametrów siatki na *Quad/Structured* oraz zatwierdzenie wyboru poleceniem *OK*.

Za pomocą opcji *Seed Part*  należy ustalić globalną gęstość siatki dyskretyzowanej części w poleceniu *Approximate global size* na wartość 5 i zatwierdzić poleceniem *OK*.

Przy pomocy narzędzia *Assign Element Type* , konieczne jest określenie typu elementów skończonych opisujących siatkę dyskretyzowanej części. W nowo otwartym oknie należy kolejno wybrać *Element Library: Explicit* o typie elementu z dostępnej listy *Discrete Rigid Element* oraz liniowej funkcji kształtu *Geometric Order: Linear*, przy czym pozostałe opcje bez zmian. Okno należy zamknąć poleceniem dostępnym w jego dolnej części o nazwie *OK*.

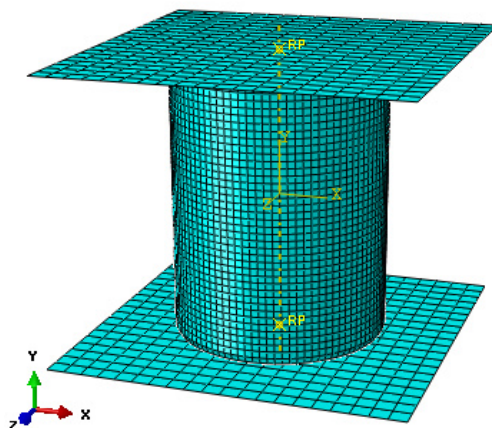
Ostatni etap stanowi przypisanie zdefiniowanej siatki. W tym celu wykorzystując narzędzie *Mesh Part* , i zatwierdzając wybór polecenia opcją dostępną w dolnej części okna roboczego *Yes*, nastąpi przypisanie siatki elementów skończonych na cały element *Płyta*. Opisany element po procesie dyskretyzacji będzie zaprezentowany zgodnie z rys. 5.16.



Rys. 5.16. Model dyskretny elementu *Płyta*


Dodatkową opcją jest możliwość wizualizacji złożenia modelu numerycznego po pełnej dyskretyzacji, po przełączeniu bieżącej opcji wyświetlania na opcję *Object: Assembly*. Graficzna prezentacja złożenia przygotowanego modelu, będzie zgodna z rys. 5.17.






Rys. 5.17. Model dyskretny złozenia

## 5.9 Wykonanie obliczeń numerycznych – moduł *Job*

W celu przygotowania zadania obliczeniowego należy wykorzystując narzędzie *Create Job* , nadać nazwę zadania *Name: 1\_Zgniot\_prosty* oraz zatwierdzić poleceniem *Continue*. W przypadku możliwości równoległego wykorzystania w procesie obliczeń numerycznych większej liczby rdzeni procesora, można w zakładce *Parallelization* wybrać opcję *Use multiple processors* wpisując odpowiednią liczbę rdzeni (np. 2 lub 4). Następnie należy zatwierdzić zadanie obliczeniowe z ustawieniami domyślnymi poleceniem *OK*.

Obliczenia numeryczne należy uruchomić wykorzystując narzędzie *Job Manager* , poprzez wybranie polecenia *Submit*. Przebieg procesu obliczeń numerycznych można obserwować poprzez włączenie polecenia *Monitor*.

Zakończenie procesu obliczeń numerycznych zostanie zasygnalizowane odpowiednim komunikatem w oknie dialogowym *Monitor* oraz przez osiągnięcie w zakładce *Total Time* wartości zgodnej w parametrem czasu analizy zdefiniowanym w ramach ustalonych kroków obliczeniowych 0.5. Celem prezentacji wyników należy włączyć polecenie *Results*.

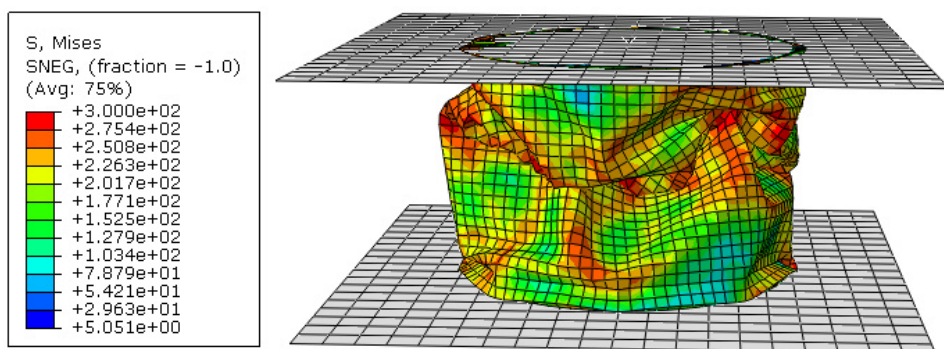
## 5.10 Wyniki obliczeń numerycznych – moduł *Visualization*

Analiza otrzymanych wyników przeprowadzona zostanie w głównej mierze na podstawie wizualizacji odkształceń plastycznych elementu *Puszka* oraz rozkładów naprężeń zredukowanych z uwzględnieniem postępujących zjawisk dynamicznych, zgodnie z hipotezą wytrzymałościową Hubera-Misesa-

Hencky’ego (H-M-H). Wizualizację rozkładów naprężenia zredukowanego H-M-H przy jednoczesnym wystąpieniu postępującego procesu dynamicznego otrzymamy aktywując narzędzie *Plot Contours on Deformed Shape* – w ramach, czego opcjonalnie zostanie wyświetlony poziom naprężeń. Zwiększenie czcionki wyświetlanych wartości liczbowych można uzyskać wykorzystując narzędzie z górnego menu programu *Viewport/Viewport Annotation Options*. W tym celu należy w nowo otwartym oknie dialogowym w zakładce *Legend* zaznaczyć polecenie *Set Font*, po czym podopcję *Size*, zmieniając rozmiar czcionki wyświetlanej na ekranie – zmianę należy zatwierdzić poleceniem *OK*.

W celu obserwacji zachowania się modelu krok po kroku w trakcie procesu dynamicznego należy posługiwać się przewijaniem klatek animacji przy użyciu opcji *Previous* lub *Next* ◀ ▶, znajdujących się nad oknem roboczym programu. Wyświetlane wartości naprężenia zredukowanego podawane są w tym przypadku w [MPa], co wynika bezpośrednio z jednostek wprowadzanych w trakcie przygotowania modelu numerycznego.

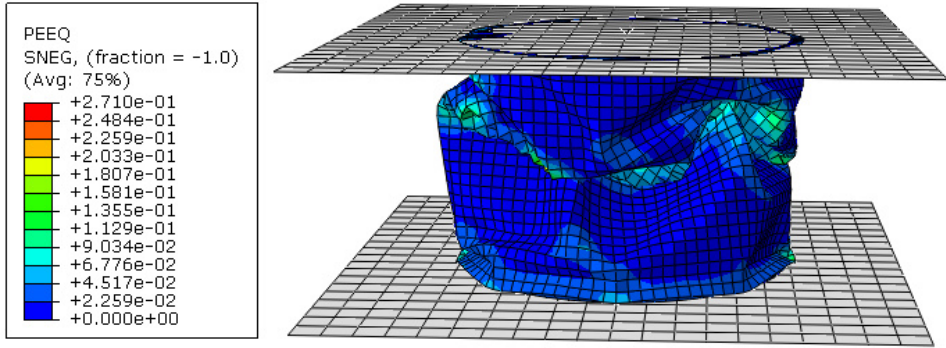
Ogólną mapę naprężenia zredukowanego w modelu numerycznym, w odniesieniu ostatniego kroku obliczeniowego – zgniot próbki aluminiowej, przedstawiono na rys. 5.18. Maksymalne wartości naprężeń osiągają poziom 300 MPa (+3.00e+02 oznacza  $3.00 \times 10^2 = 300$ ).






**Rys. 5.18.** Rozkład naprężeń zredukowanych



Następny etap stanowi wyświetlenie wyników związanych z odkształceniami plastycznymi elementu *Puszka*. W tym celu niezbędna jest zmiana dotychczasowej opcji wyświetlania wyników, z górnej listwy programu oznaczona jako *S* na opcję *PEEQ* – określającą ekwiwalentny (równoważny) stan odkształceń plastycznych, jaki towarzyszy naprężeniom (*S* – *Mises'a*). Wartość parametru należy odczytywać jako procentowy poziom odkształceń względem stanu początkowego, zatem dla przykładu otrzymany maksymalny wynik  $2.71e-01$  oznacza  $2.71 \times 10^{-1}$ , czyli 0.271. Z uwagi na procentowy stopień

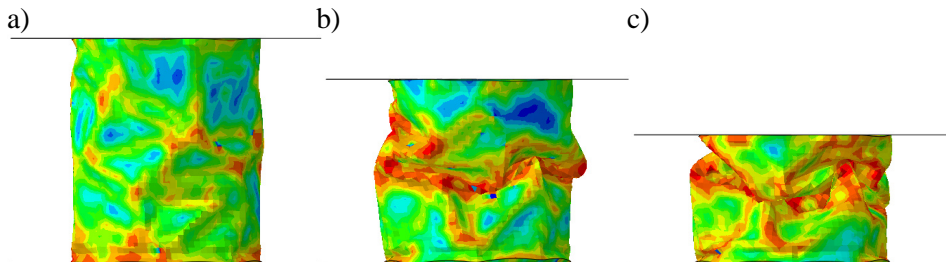
odkształcenia otrzymany wynik należy przemnożyć przez wartość 100, na podstawie, czego zostanie wyznaczony procentowy poziom odkształcenia maksymalnego wynoszący  $0.271 \times 100 = 27.1\%$ . Graficzna prezentacja mapy odkształceń plastycznych jest zgodna z rys. 5.19.




Rys. 5.19. Rezultat odkształceń plastycznych


Dodatkowo możliwa jest symulacja krok po kroku realizowanego procesu zgniotu. Początkowo należy wybrać opcję *Apply Right View*  oraz *Turn Perspective Off* . Przy użyciu narzędzia *Common Options*  oraz wybraniu w sekcji *Visible Edges* podopcji *Feature edges* i zatwierdzeniu wyboru poleceniem *OK*, zostaną wyłączone krawędzie siatki MES. Po przełączeniu opcji wyświetlania wyników, z górnej listwy programu oznaczonej jako *PEEQ* na opcję *S*, możliwa będzie obserwacja postępującego rozkładu naprężeń.

Następnie w ramach przewinięcia symulacji do stanu początkowego, poprzez użycie narzędzia *First*  oraz kolejno użycie narzędzia do przewijania klatki po klatce procesu zgniotu, opcją oznaczoną jako *Next* , przedstawiono graficzną prezentację postępującego procesu, zgodnie z rys. 5.20.



Rys. 5.20. Proces zgniotu próbki aluminiowej przedstawiony 3-etapowo

Dodatkowo w odniesieniu do bieżącego modułu *Visualization*, możliwe jest przedstawienie charakterystyki pracy modelu w postaci wykresu obciążenia od przemieszczenia górnego elementu *Płyta*. Za pomocą narzędzia *Create XY Data* , następnie wyboru opcji *ODB field output* oraz zatwierdzenia wyboru poleceniem *Continue*, możliwe będzie określenie danych, niezbędnych do wygenerowania charakterystyki pracy układu. W nowo otwartym oknie, w ramach zakładki *Variables*, należy dokonać wyboru w podopcji *Position*, sekcji *Unique Nodal*. W odniesieniu do wybranej sekcji z dostępnej listy wyników, konieczne jest zaznaczenie parametru *RF2* jako reakcji oddziałującej zgodnie z osią *Y* (po rozwinięciu głównej sekcji wyników *RF*) oraz *U2*, stanowiącego przemieszczenie zgodne z osią *Y* (po rozwinięciu głównej sekcji wyników *U*). Następnie po przejściu do zakładki *Elements/Nodes* w ramach sekcji *Method*, niezbędne jest wybranie opcji *Node sets*. Z wyświetlonych po prawej stronie *Setów*, stanowiących punkty w ramach, których możliwe jest wyprowadzenie wyników, należy wybrać *Set* o nazwie *Pomiar* (który został utworzony w sekcji *Step*). Wszelkie dotychczasowe wybory należy zaakceptować poleceniem *Save*, a następnie opcją *OK*, celem dalszej możliwości wyprowadzenia pożądanej charakterystyki. Po wyprowadzeniu wyników w ramach utworzonego punktu pomiarowego, bieżące okno należy zamknąć poprzez opcję *Dismiss*.

Ponownie używając narzędzia *Create XY Data* , następnie dokonując wyboru opcji *Operate on XY data* oraz zatwierdzenia wyboru poleceniem *Continue*, możliwe będzie wyprowadzenie omawianej charakterystyki. W odniesieniu do nowo otwartego okna, w ramach sekcji umieszczonej z prawej strony o nazwie *Operators*, niezbędny jest początkowy wybór dostępnym suwakiem, funkcji o nazwie *combine(X,X)* – pozwalającej na wygenerowanie charakterystyki siły zgięcia od przemieszczenia. Po zaznaczeniu wymienionej funkcji, w górnej części okna roboczego pojawi się użyte polecenie *combine*. Do istniejącej funkcji, należy dodać funkcję z dostępnej listy w prawej części okna o nazwie *abs(A)* – wyznaczającej wartość bezwzględną z określonych danych. Kolejny etap stanowi ponowne dodanie funkcji *abs(A)*, przy uwzględnieniu poprawnego miejsca wstawienia funkcji, w ramach generowanej zależności matematycznej. W tym celu należy dokonać zaznaczenia lewym klawiszem myszy, miejsca pomiędzy dwoma ostatnimi nawiasami w prawej części równania. Ponowne użycie funkcji *abs(A)*, spowoduje jej wstawienie w pożądane miejsce.

Pomiędzy jedną i drugą funkcją *abs*, należy wstawić przecinek, celem oddzielenia zależności funkcyjnych od siebie. Końcowy etap stanowi wstawienie do zależności, wyprowadzonych uprzednio wyników obliczeń. W tym celu należy uaktywnić kursor myszy, wewnątrz nawiasu pierwszej funkcji *abs* oraz dokonać wyboru wyników przemieszczeń o nazwie *U:U2* (poprzez dwukrotne użycie lewego klawisza myszy na danych wynikach). Poprzez analogiczność zachowania należy uwzględnić wyniki *RF:RF2* w ramach drugiej funkcji *abs*. W opisany sposób została określona zależność funkcyjna, pozwalająca na wygenerowanie

charakterystyki przemieszczeń od siły zgniotu, w odniesieniu do górnego elementu *Płyta*. Zależność matematyczna powinna być zgodna z rys. 5.21.

Enter an expression by typing and selecting XY Data and Operators below.

Example: maxEnvelope( "XYData-2", "XYData-4" ) \* 2.5 + "XYData-5"

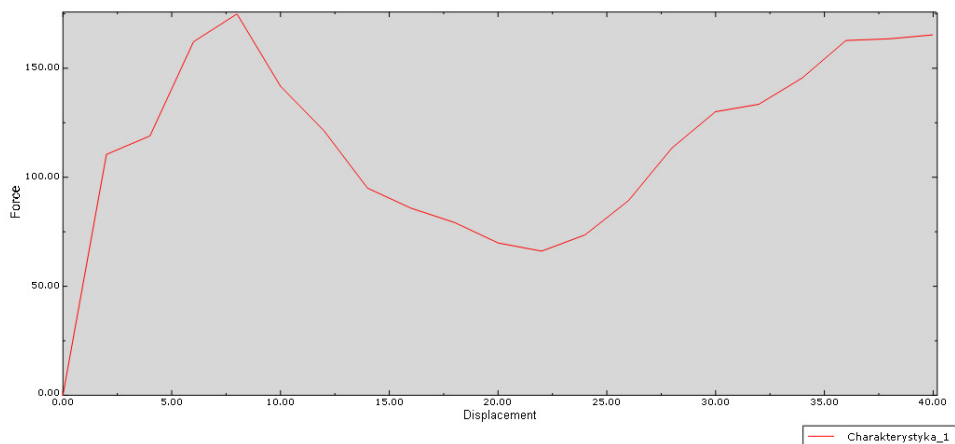
```
combine ( abs ( "U:U2 Pl: PART-2-1 N: 442" ),abs ( "RF:RF2 Pl: PART-2-1 N: 442" ) )
```

**Rys. 5.21.** Prezentacja zależności matematycznej

Przy użyciu polecenia *Save as* możliwe jest zapisanie otrzymanego wykresu, pod nazwą *Charakterystyka\_1*, zatwierdzając naniesioną nazwę opcją *OK*. Następnie należy zamknąć okno związane z generowaniem zależności matematycznej poleceniem *Cancel*. Po wybraniu narzędzia *XY Data Manager* oraz zaznaczeniu w nowo otwartym oknie nazwy *Charakterystyka\_1* i użyciu opcji *Plot*, nastąpi wygenerowanie pożądanej charakterystyki. Bieżące okno, należy zamknąć poleceniem *Dismiss*. Celem uwydatnienia prezentacji wykresu, należy skorzystać z zakładki *Option/XY Options/Axis*. W nowo otwartym oknie w ramach sekcji *X Axis*, z zaznaczoną opcją *Displacement*, konieczne jest wybranie dolnej zakładki *Axes* oraz w opcji *Format*, ustalenie typu jednostki na *Decimal*. Następnie po wybraniu opcji *Font*, należy zwiększyć czcionkę np. na wartość *10* i dokonać zatwierdzenia poleceniem *OK*. W sposób analogiczny należy zmienić typ wyświetlanej jednostki oraz wielkość czcionki dla sekcji *Y Axis* po wybraniu opcji *Force*. Po wprowadzeniu wszelkich zmian, niezbędne jest zamknięcie bieżącego okna poleceniem *Dismiss*.

W razie potrzeby możliwe jest także dodatkowo zwiększenie czcionki, która opisuje nazwy osi wykresu. W celu zwiększenia czcionki dotyczącej nazewnictwa osi, należy ponownie skorzystać z zakładki *Option/XY Options/Axis*. W ramach dolnej zakładki o nazwie *Axes*, możliwa jest zmiana wielkości czcionki zarówno przemieszczenia (*Displacement*) oraz obciążenia (*Force*). Cały proces modyfikacji czcionki odbywa się w sposób analogiczny do wcześniejszej zmiany wielkości czcionki jednostek na obydwu osiach.

Korzystając z zakładki *Option/XY Options/Chart Legend*, w nowo otwartym oknie przy użyciu polecenia *Font* i zwiększeniu czcionki legendy na wartość *12* oraz zatwierdzeniu wyboru poleceniem *OK*, możliwe będzie zwiększenie tekstu opisującego legendę. Ostatecznie bieżące okno należy zamknąć poleceniem *Dismiss*. Graficzna prezentacja otrzymanej charakterystyki po wszelkich modyfikacjach, jest zgodna z rys. 5.22.




**Rys. 5.22.** Charakterystyka przemieszczenia od obciążenia

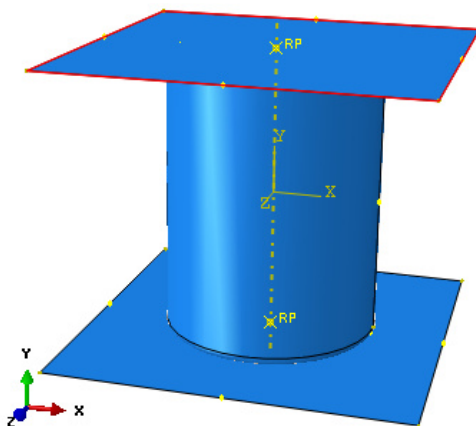
Otrzymana charakterystyka, przedstawia zależność, siły od przemieszczenia w ramach elementu *Płyta*. Z uwagi na czas obliczeń wynoszący zaledwie 0.5 [s] oraz prędkość zgniotu 80 [mm/s], droga wykonana przez górny element *Płyta*, wynosi w przybliżeniu 40 [mm]. W okolicy 8 [mm] przemieszczenia elementu zgniatającego próbkę, była wygenerowana największa siła, która wynosiła w przybliżeniu 175 [N].

Następny etap stanowi przeprowadzenie drugiej analizy numerycznej, związanej z modyfikacją aktualnego procesu zgniotu, polegającą na zmianie dotychczasowej postaci złożenia modelu. Celem ustanowienia drugiego procesu, na podstawie pierwotnego, niezbędne jest przejście do zakładki *Model* w ramach drzewa historii modelu, w lewej części programu, następnie wybranie prawym klawiszem myszy utworzonego modelu numerycznego *Model-1* oraz użycie dostępnej opcji *Copy Model*, przypisanie nazwy *Model-2* i dokonanie akceptacji poleceniem *OK*. W drzewie historii tworzenia modeli pojawi się nowo wygenerowany model o określonej nazwie. Po opuszczeniu modułu *Visualization* i wyborze modułu *Assembly*, należy sprawdzić czy w drzewie historii tworzenia modelu numerycznego, jest uaktywniony model o nazwie *Model-2* (w przypadku braku aktywności pracy, w ramach nowo utworzonego modelu, należy go wybrać poprzez dwukrotne wciśnięcie lewego klawisza myszy). O uaktywnieniu modelu świadczy podkreślenie pod jego nazwą.

Kolejny etap stanowi wyłącznie dokonanie modyfikacji postaci złożenia w odniesieniu do modułu *Assembly*.

## 5.11 Pierwsza modyfikacja złożenia – moduł *Assembly*

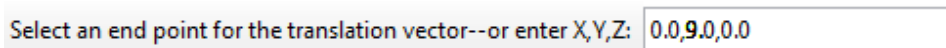
Początkowo w ramach modyfikacji złożenia modelu konieczne jest skorzystanie z opcji *Translate Instance* , po czym niezbędne jest wybranie elementu *Płyta*, znajdującego się w górnej części elementu *Puszka*, zgodnie z rys. 5.23 oraz zatwierdzenie wyboru opcją *Done*.




Rys. 5.23. Wybór elementu do translacji

W dolnej części okna roboczego pojawi się komunikat *Select a start point for the translation vector*, który należy zatwierdzić klawiszem *Enter*. Następnie w ramach komunikatu *Select an end point for the translation vector*, należy w środkowej współrzędnej dotyczącej przemieszczenia po osi *Y*, nanieść wartość *9.0* zgodnie z rys. 5.24 oraz zatwierdzić klawiszem *Enter*. Finalnie, translację należy zaakceptować poleceniem *OK* w dolnej części okna roboczego, po czym nastąpi odpowiednia modyfikacja złożenia modelu.

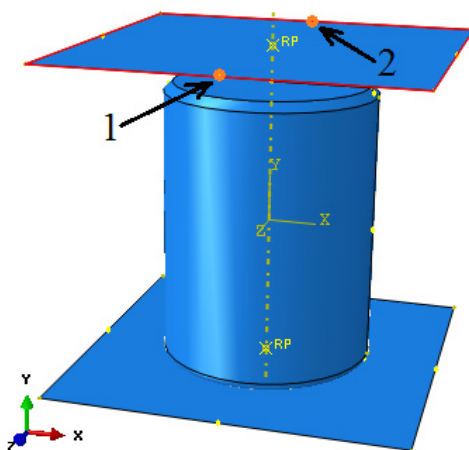
Graficzna prezentacja poprawnej definicji przeprowadzonej translacji, w odniesieniu do wprowadzenia koniecznej współrzędnej przemieszczenia elementu *Płyta*, została przedstawiona poniżej.



Rys. 5.24. Określenie współrzędnej translacji

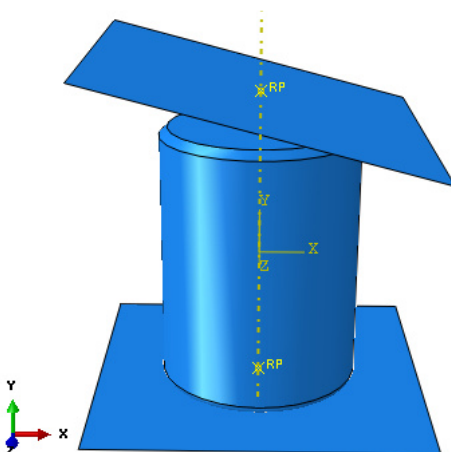
W ramach dalszej modyfikacji złożenia modelu numerycznego należy skorzystać z opcji *Rotate Instance* , zaznaczyć górny element *Płyta* oraz wybrać polecenie *Done*. Kolejny krok stanowi wybór dwóch punktów, wzdłuż

których będzie ustalona oś obrotu elementu. Punkty powinny być wybrane w kolejności przedstawionej na rys. 5.25, po czym wybór należy zatwierdzić klawiszem *Enter* w ramach zdefiniowanego kąta obrotu *Angle of rotation: 15* oraz poleceniem *OK*.



Rys. 5.25. Wybór odpowiednich punktów celem przeprowadzenia rotacji


Graficzna prezentacja złożenia po przeprowadzonej rotacji, stanowiącej jednocześnie ostatni krok modyfikacji złożenia, jest zgodna z rys. 5.26.




Rys. 5.26. Model po zastosowanych modyfikacjach



## 5.12 Wykonanie obliczeń numerycznych – moduł Job

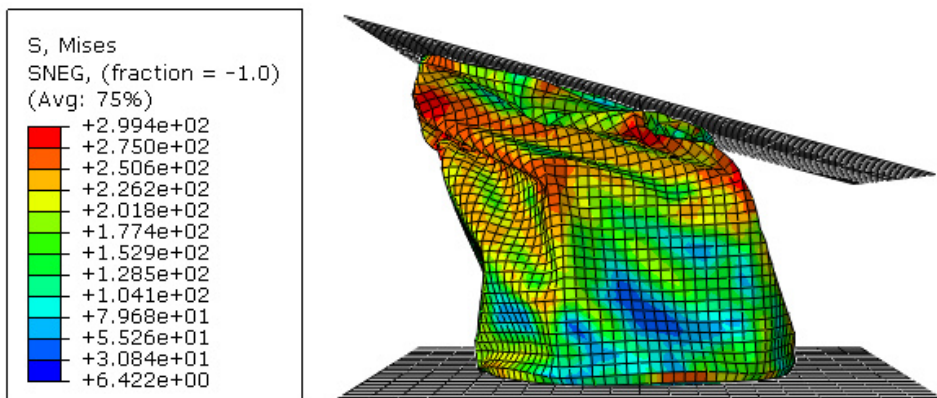
W celu przygotowania drugiego zadania obliczeniowego po modyfikacji złożenia należy wykorzystując narzędzie *Create Job* , nadać nazwę zadania *Name: 2\_Zgniot\_ukosny*, wybrać model źródłowy do obliczeń *Model-2* oraz zatwierdzić poleceniem *Continue*. W przypadku możliwości równoległego wykorzystania w procesie obliczeń numerycznych większej liczby rdzeni procesora, można w zakładce *Parallelization* wybrać opcję *Use multiple processors* wpisując odpowiednią liczbę rdzeni (np. 2 lub 4). Następnie należy zatwierdzić zadanie obliczeniowe z ustawieniami domyślnymi poleceniem *OK*.

Obliczenia numeryczne należy uruchomić wykorzystując narzędzie *Job Manager* , poprzez wybranie polecenia *Submit*. Przebieg procesu obliczeń numerycznych można obserwować poprzez włączenie polecenia *Monitor*.

Zakończenie procesu obliczeń numerycznych zostanie zasygnalizowane odpowiednim komunikatem w oknie dialogowym *Monitor* oraz przez osiągnięcie w zakładce *Total Time* wartości zgodnej w parametrem czasu analizy zdefiniowanym w ramach ustalonych kroków obliczeniowych 0.5. Celem prezentacji wyników należy włączyć polecenie *Results*.

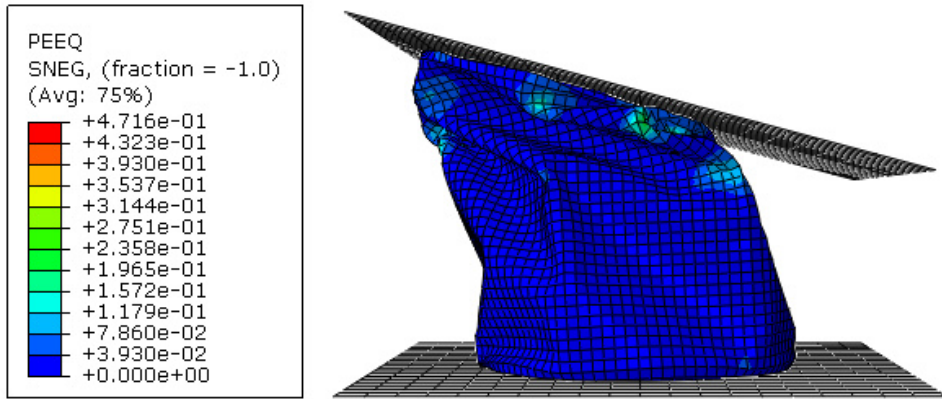
## 5.13 Wyniki obliczeń numerycznych – moduł Visualization

Analizę otrzymanych wyników należy przeprowadzić analogicznie do rozdziału 5.10. Wynik obliczeń numerycznych, w odniesieniu do naprężeń maksymalnych, jest zgodny postacią przedstawioną na rys. 5.27.



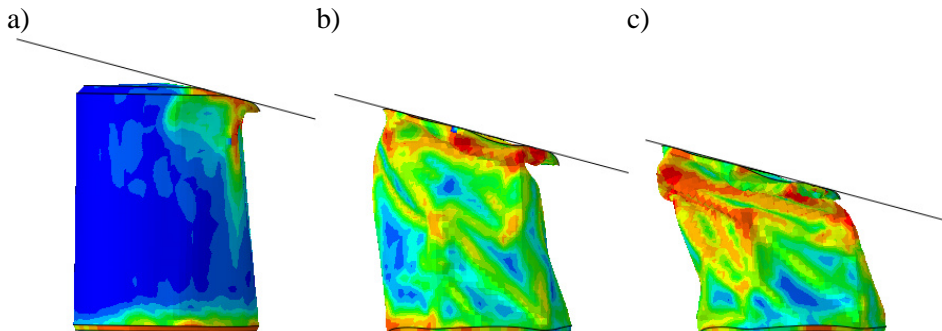
Rys. 5.27. Rozkład naprężeń zredukowanych

Rezultat uzyskanego poziomu odkształceń plastycznych, jest zgodny z graficzną prezentacją przedstawioną na rys. 5.28.



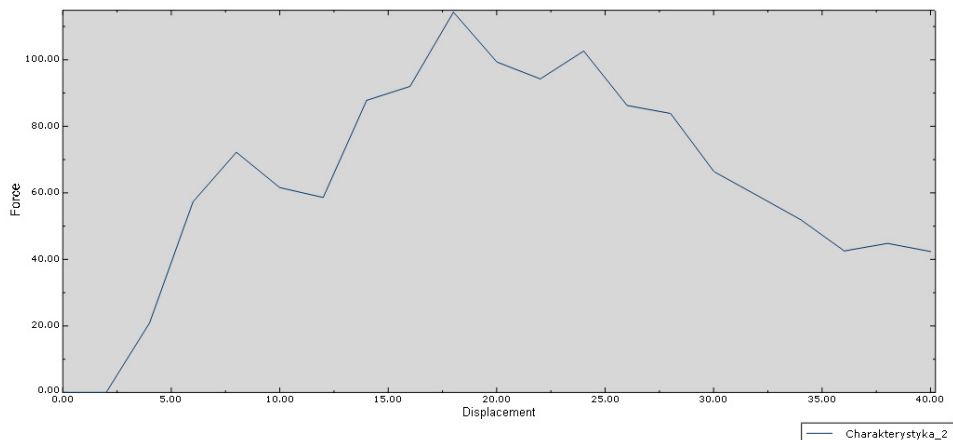
Rys. 5.28. Rezultat odkształceń plastycznych

Wizualizacja postępującego procesu zgniotu ukośnego próbki, jest zgodna z postaciami deformacji na skutek przemieszczeń górnego elementu *Płyta*, przedstawionymi na rys. 5.29.



Rys. 5.29. Proces zgniotu próbki aluminiowej przedstawiony 3-etapowo

Ostatni etap prezentacji wyników badań, związany jest bezpośrednio z wygenerowaniem charakterystyki pracy górnego elementu *Płyta*. Wstępnie w ramach opcji *XY Data Manager* należy zaznaczyć wszystkie wiersze dotyczące wyników z poprzedniego badania oraz je usunąć dostępną opcją *Delete*, oprócz nazwy *Charakterystyka\_1*. Dalsza analogia pracy zgodnie z rozdziałem 5.10 umożliwi wyprowadzenie nowej charakterystyki zgodnie z rys. 5.30 (należy pamiętać o zdefiniowaniu innej nazwy np. *Charakterystyka\_2*).



**Rys. 5.30.** Charakterystyka przemieszczenia od obciążenia


Otrzymana charakterystyka, przedstawia zależność, siły od przemieszczenia w ramach górnego elementu *Płyta*. Z uwagi na czas obliczeń wynoszący zaledwie 0.5 [s] oraz prędkość zgniotu 80 [mm/s], droga wykonana przez górny element *Płyta*, wynosi w przybliżeniu 40 [mm]. W okolicy 18 [mm] przemieszczenia elementu zgniatającego próbkę, była wygenerowana największa siła, która wynosiła w przybliżeniu 114 [N].

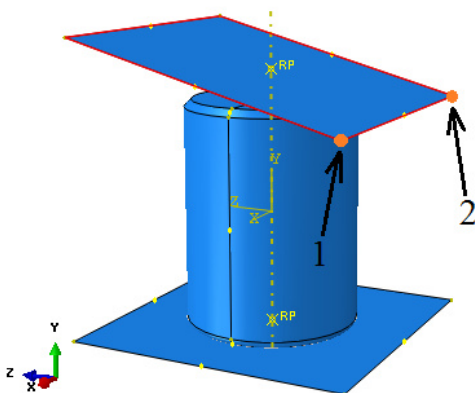
Następny etap stanowi przeprowadzenie trzeciej analizy numerycznej, związanej z modyfikacją aktualnego procesu zgniotu, polegającą na zmianie dotychczasowej postaci złożenia modelu. Celem ustanowienia trzeciego procesu, na podstawie drugiego, niezbędne jest przejście do zakładki *Model* w ramach drzewa historii modelu, w lewej części programu, następnie wybranie prawym klawiszem myszy utworzonego modelu numerycznego *Model-2* oraz użycie dostępnej opcji *Copy Model*, przypisanie nazwy *Model-3* i dokonanie akceptacji poleceniem *OK*. W drzewie historii tworzenia modeli pojawi się nowo wygenerowany model o określonej nazwie. Po opuszczeniu modułu *Visualization* i wyborze modułu *Assembly*, należy sprawdzić czy w drzewie historii tworzenia modelu numerycznego, jest uaktywniony model o nazwie *Model-3* (w przypadku braku aktywności pracy, w ramach nowo utworzonego modelu, należy go wybrać poprzez dwukrotne wciśnięcie lewego klawisza myszy). O uaktywnieniu modelu świadczy podkreślenie pod jego nazwą.

Kolejny etap stanowi wyłącznie dokonanie modyfikacji postaci złożenia w odniesieniu do modułu *Assembly*.


## 5.14 Druga modyfikacja złożenia – moduł *Assembly*

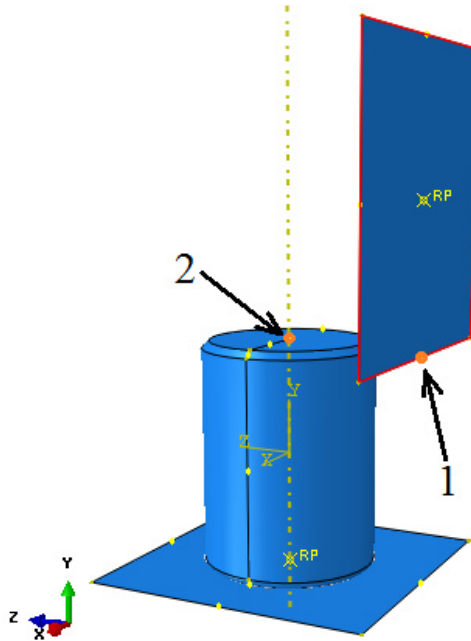
W odniesieniu do bieżącego modułu, niezbędne jest przeprowadzenie odpowiedniej modyfikacji złożenia, celem dalszej możliwości realizacji ostatniego badania numerycznego.

Początkowo w ramach modyfikacji złożenia modelu, konieczne jest skorzystanie z opcji *Rotate Instance* , zaznaczenie górnego elementu *Plyta* oraz wybranie polecenia *Done*. Kolejny krok stanowi wybór dwóch punktów, wzdłuż których będzie ustalona oś obrotu elementu. Punkty powinny być wybrane w kolejności przedstawionej na rys. 5.31, po czym wybór należy zatwierdzić klawiszem *Enter* w ramach zdefiniowanego kąta obrotu *Angle of rotation: 75* oraz poleceniem *OK*.




Rys. 5.31. Wybór punktów celem wykonania odpowiedniej rotacji

W dalszej części modyfikacji modelu, konieczność stanowi wykonanie odpowiedniej translacji górnego elementu *Plyta*. Celem realizacji translacji, należy użyć opcji *Translate Instance* , a następnie wybrać odpowiedni element *Plyta* oraz zatwierdzić wybór opcją *Done*. Po tej operacji pojawiają się punkty charakterystyczne na wszystkich elementach całego układu. W dalszej części dokonywanych zmian, należy wybrać odpowiedni punkt z jednego elementu względem punktu na drugim elemencie zgodnie z rys. 5.32 oraz zatwierdzić wybór poleceniem *OK*, aby nastąpiło odpowiednie złożenie. Kolejność wyboru punktów celem translacji powinna być zgodna z graficzną prezentacją przedstawioną w ramach poniższego rysunku.



**Rys. 5.32.** Wybór punktów celem wykonania odpowiedniej translacji

Finalny etap modyfikacji złożenia związany jest z przeprowadzeniem translacji górnego elementu *Płyta*.

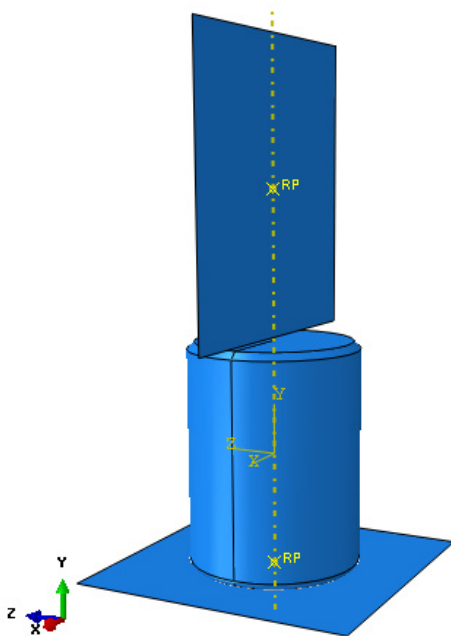
Ponownie korzystając z opcji *Translate Instance* , konieczne jest wybranie elementu *Płyta*, znajdującego się w górnej części elementu *Puszka* oraz zatwierdzenie wyboru opcją *Done*. Po zatwierdzeniu wyboru elementu, w dolnej części okna roboczego pojawi się komunikat *Select a start point for the translation vector*, który należy zatwierdzić klawiszem *Enter*. Następnie w ramach komunikatu *Select an end point for the translation vector*, należy w ramach środkowej współrzędnej dotyczącej przemieszczenia po osi *Y*, nanieść wartość *1.0* zgodnie z rys. 5.33 oraz zatwierdzić klawiszem *Enter*. Ostatecznie, translację należy zaakceptować poleceniem *OK* w dolnej części okna roboczego, po czym nastąpi odpowiednia modyfikacja złożenia modelu.

Graficzna prezentacja poprawnej definicji przeprowadzonej translacji, w odniesieniu do wprowadzenia końcowej współrzędnej przemieszczenia elementu *Płyta*, została przedstawiona poniżej.

Select an end point for the translation vector--or enter X,Y,Z:


**Rys. 5.33.** Określenie współrzędnej translacji


Graficzna prezentacja złożenia po przeprowadzonej translacji, stanowiącej jednocześnie ostatni krok modyfikacji złożenia, jest zgodna z rys. 5.34.



Rys. 5.34. Model po zastosowanych modyfikacjach

## 5.15 Wykonanie obliczeń numerycznych – moduł Job

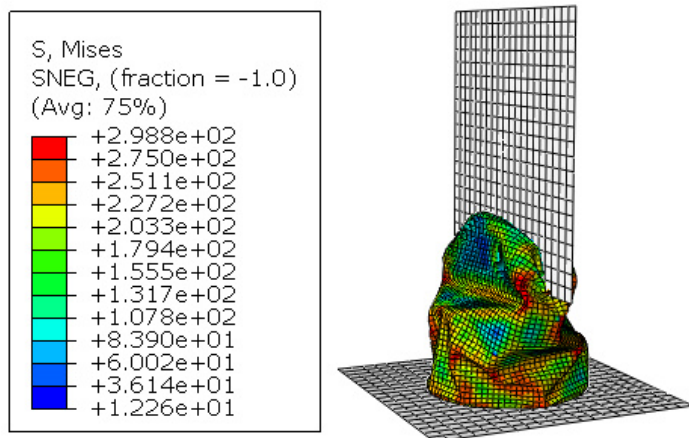
W celu przygotowania trzeciego zadania obliczeniowego po modyfikacji złożenia należy wykorzystując narzędzie *Create Job* , nadać nazwę zadania *Name: 3\_Zgniot\_pionowy*, wybrać model źródłowy do obliczeń *Model-3* oraz zatwierdzić poleceniem *Continue*. W przypadku możliwości równoległego wykorzystania w procesie obliczeń numerycznych większej liczby rdzeni procesora, można w zakładce *Parallelization* wybrać opcję *Use multiple processors* wpisując odpowiednią liczbę rdzeni (np. 2 lub 4). Następnie należy zatwierdzić zadanie obliczeniowe z ustawieniami domyślnymi poleceniem *OK*.

Obliczenia numeryczne należy uruchomić wykorzystując narzędzie *Job Manager* , poprzez wybranie polecenia *Submit*. Przebieg procesu obliczeń numerycznych można obserwować poprzez włączenie polecenia *Monitor*.

Po zakończeniu obliczeń numerycznych konieczna jest ocena uzyskanych wyników, poprzez początkowe włączenie polecenia *Results*.

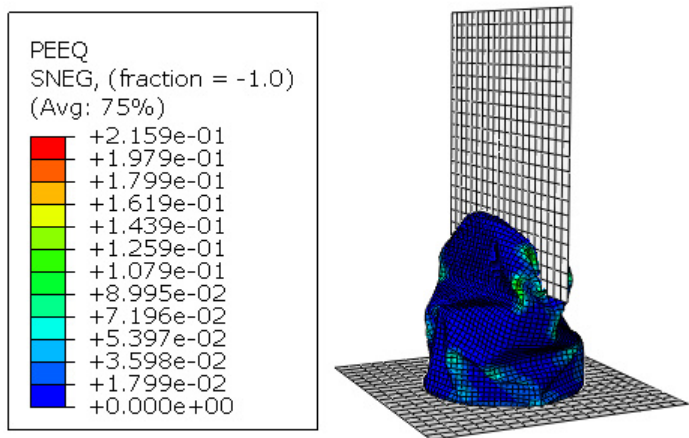
## 5.16 Wyniki obliczeń numerycznych – *moduł Visualization*

Analizę otrzymanych wyników należy przeprowadzić analogicznie do rozdziału 5.10. Wynik obliczeń numerycznych, w odniesieniu do naprężeń maksymalnych, jest zgodny postacią przedstawioną na rys. 5.35.



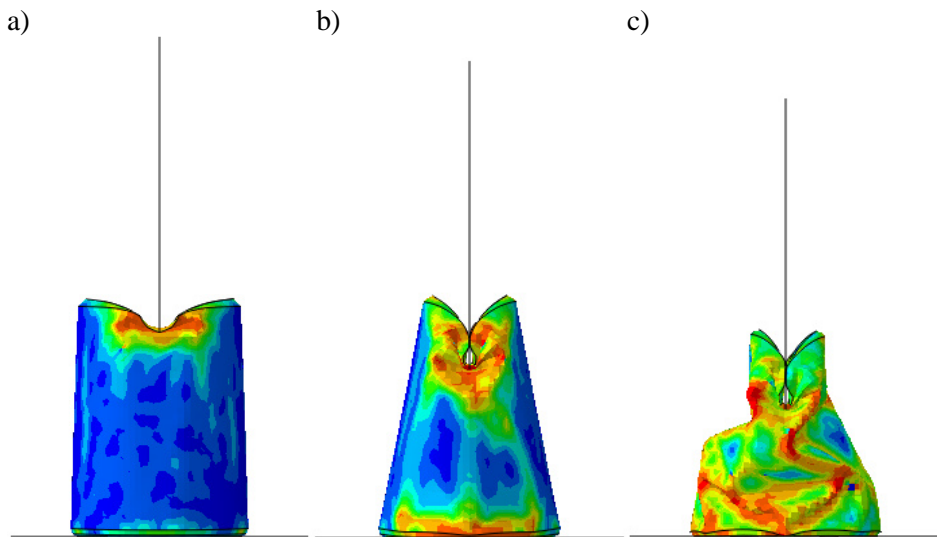
Rys. 5.35. Rozkład naprężeń zredukowanych

Rezultat uzyskanego poziomu odkształceń plastycznych, jest zgodny z graficzną prezentacją przedstawioną na rys. 5.36.




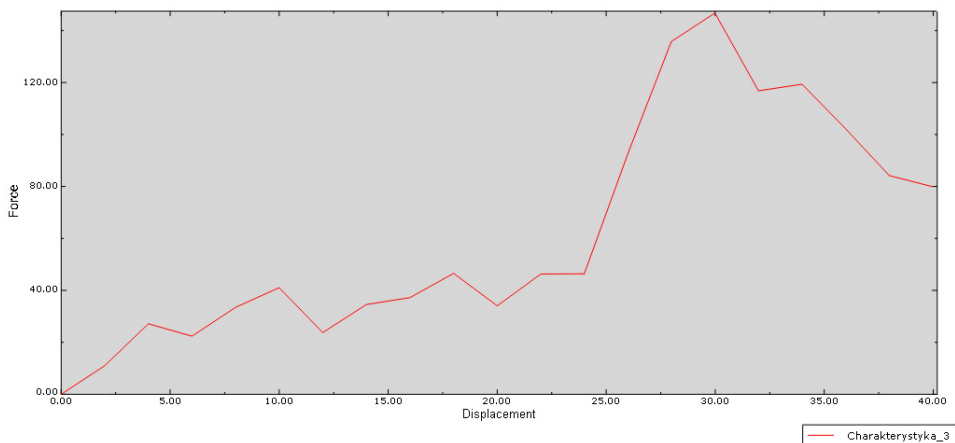
Rys. 5.36. Rezultat odkształceń plastycznych

Wizualizacja postępującego zgniotu pionowego próbki, jest zgodna z rys. 5.37.




**Rys. 5.37.** Proces zgniotu próbki aluminiowej przedstawiony 3-etapowo

Tworzenie wykresu w ramach opcji *XY Data Manager*  związane jest z usunięciem zbędnych danych i wyników dostępną opcją *Delete*, oprócz nazwy *Charakterystyka\_1* i *Charakterystyka\_2*. Analogia pracy realizowana zgodnie z rozdziałem 5.10 umożliwi wyprowadzenie nowej charakterystyki zgodnie z rys. 5.38 (należy pamiętać o zdefiniowaniu innej nazwy np. *Charakterystyka\_3*).



**Rys. 5.38.** Charakterystyka przemieszczenia od obciążenia



Po wygenerowaniu ostatniej charakterystyki możliwe jest w odniesieniu do opcji *XY Data Manager* , zaznaczenie wszystkich wierszy dotyczących danych z bieżącego badania oraz usunięcie ich opcją *Delete*, oprócz wierszy o nazwach *Charaterystyka\_1*, *Charakterystyka\_2* i *Charakterystyka\_3*.

Otrzymana charakterystyka, przedstawia zależność, siły od przemieszczenia w ramach górnego elementu *Płyta*. Z uwagi na czas obliczeń wynoszący zaledwie 0.5 [s] oraz prędkość zgniotu 80 [mm/s], droga wykonana przez górny element *Płyta*, wynosi w przybliżeniu 40 [mm]. W okolicy 30 [mm] przemieszczenia elementu zgniatającego próbkę, była wygenerowana największa siła, która wynosiła w przybliżeniu 147 [N].

W ramach trzech przeprowadzonych analiz wykazano, iż zmiana kąta nachylenia nieodkształcalnej płyty powodującej proces zgniotu, ma istotny wpływ na zmianę obciążenia niezbędnego do symulacji procesu. W pierwszym przypadku, gdy płyta powoduje osiowe ściskanie, konieczne jest użycie największej siły niezbędnej do realizacji procesu zgniotu (gdzie dodatkowo siła ta występuje już na początku procesu). W odniesieniu do przypadku drugiego, gdzie płyta jest nachylona do powierzchni zgniatanej pod kątem wynoszącym 15 stopni dowiedziono, iż w połowie realizowanego przemieszczenia jest generowane największe obciążenie (gdzie dodatkowo wartość maksymalnego obciążenia niezbędnego do zgniotu próbki jest najniższa z wszystkich analizowanych przypadków). Trzeci przypadek, w którym płyta usytuowana jest w sposób prostopadły do powierzchni, wykazuje, iż maksymalna siła niezbędna do realizacji zgniotu występuje w końcowych etapach analizy.

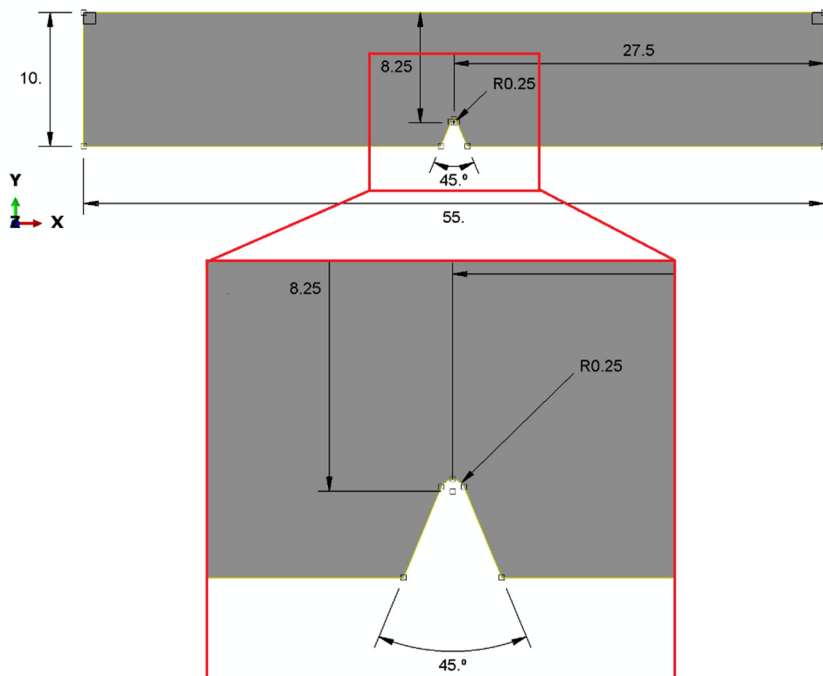
## 6. BADANIE UDARNOŚCI – ZAGADNIENIE DODATKOWE

### 6.1 Wprowadzenie

Przedmiotem prowadzonej analizy numerycznej jest model numeryczny procesu badania udarności metodą Charpy’ego. Badania zostaną zrealizowane w ramach obliczeń dynamicznych, uwzględniając relacje kontaktowe, przy wykorzystaniu zaawansowanego modelu materiałowego.

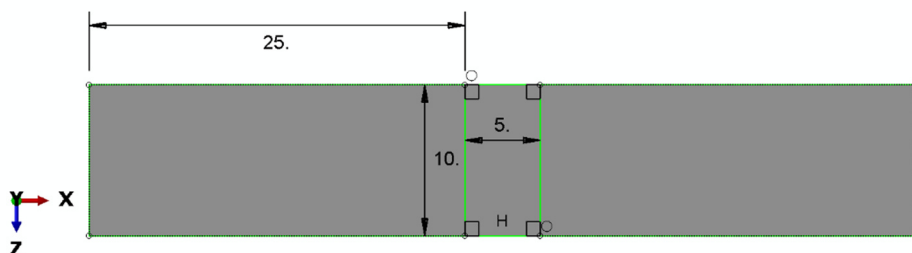
### 6.2 Budowa modelu geometrycznego – *moduł Part*

Szkic elementu *Belka* należy przygotować w ramach opcji *Create Part*, przy uwzględnieniu typu *3D, Deformable, Solid* – poprzez wyciągnięcie *Extrusion* (przygotowany szkic należy następnie wyciągnąć na 10 [mm]).



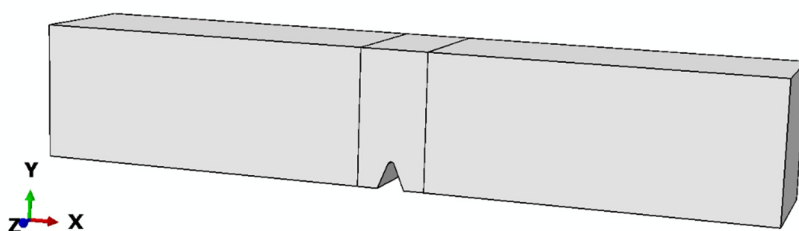
Rys. 6.1. Sparametryzowany szkic elementu *Belka*

Następnie, przy wykorzystaniu narzędzia **Partition Face: Sketch**, konieczne jest wybranie górnej powierzchni (bez karbu) elementu *Belka* i po zatwierdzeniu wyboru, należy wybrać dowolną krawędź tej powierzchni, w celu dalszego przygotowania szkicu zgodnie z poniższym rysunkiem.



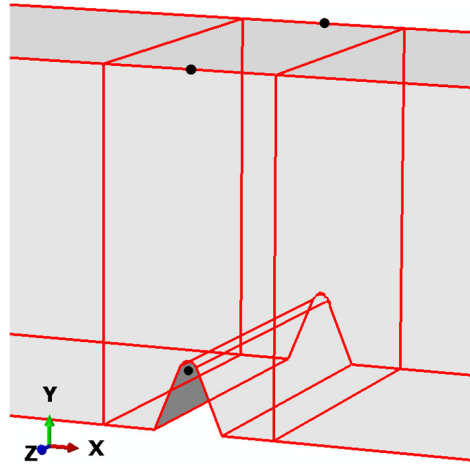
Rys. 6.2. Sparametryzowany szkic do wykonania partycji

Kolejny krok w przygotowaniu modelu stanowi wykonanie pierwszej partycji, przy wykorzystaniu narzędzia **Partition Cell: Extrude/Sweep Edges** w ramach głównej kategorii **Partition Cell: Define Cutting Plane**. Po wyborze omawianej opcji należy zaznaczyć wydzielony prostokątny obszar na górnej powierzchni elementu *Belka* i zatwierdzić zaznaczenie, po czym skorzystać z podopcji **Extrude Along Direction**. Następny etap stanowi wybór dowolnej pionowej krawędzi elementu, sprawdzenie czy realizacja partycji odbędzie się w kierunku materiału (w przeciwnym przypadku, należy skorzystać z opcji **Flip**) oraz po akceptacji kierunku partycjonowania całej proces należy zatwierdzić poleceniem **Create Partition**.



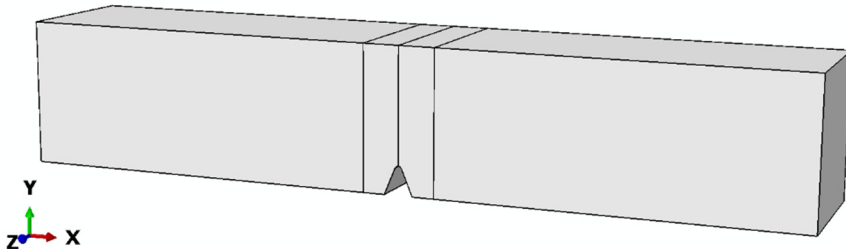
Rys. 6.3. Pierwsza partycja elementu *Belka*

Kolejny krok w przygotowaniu modelu stanowi wykonanie drugiej partycji, przy wykorzystaniu narzędzia **Partition Cell: Define Cutting Plane**. Po wyborze omawianej opcji oraz zaznaczeniu i zatwierdzeniu całego elementu, należy skorzystać z podopcji **3 Points** i wybrać punkty zgodnie z poniższym rysunkiem.



Rys. 6.4. Wybór punktów do drugiej partycji

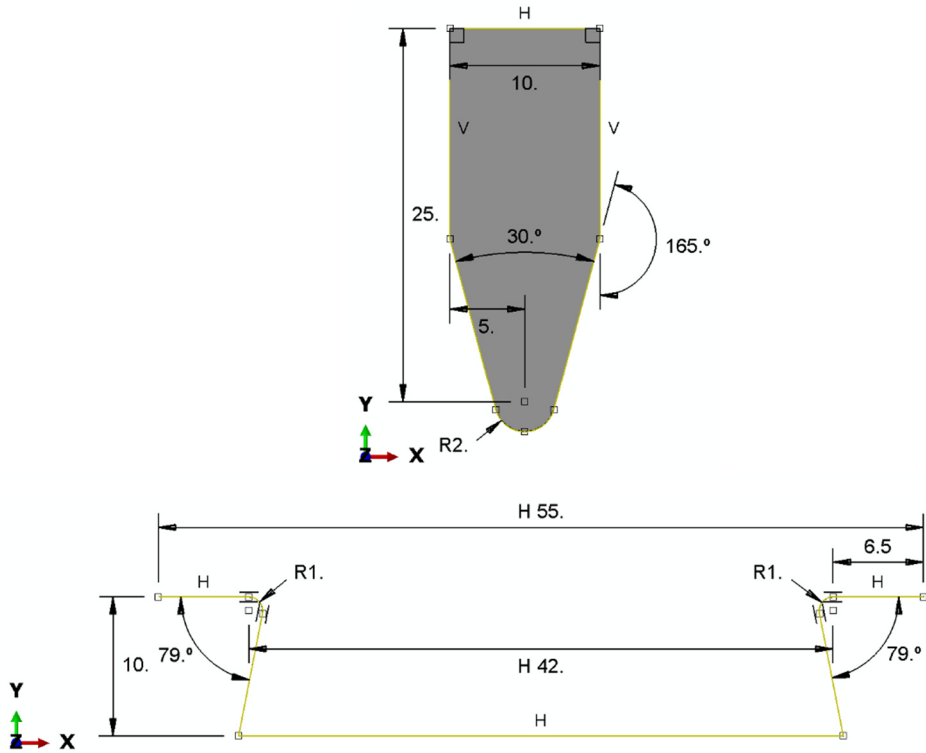
Po odpowiednim wyborze punktów do partycji i zatwierdzeniu poleceniem *Create Partition*, element *Belka* będzie wystarczająco przygotowany do dalszej analizy.



Rys. 6.5. Element *Belka* po drugiej partycji

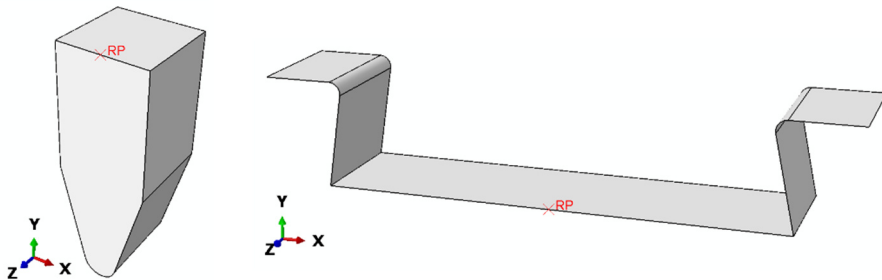
Drugi model – *Podpora*, należy przygotować przy wykorzystaniu narzędzia *Create Part*, z zaznaczonymi podopcjami *3D*, *Discrete Rigid*, *Shell* jako wyciągnięcie *Extrusion* (przygotowany szkic należy kolejno wyciągnąć na 10 [mm]).

Trzeci model – *Bijak*, należy przygotować przy wykorzystaniu narzędzia *Create Part*, z zaznaczonymi podopcjami *3D*, *Discrete Rigid*, *Solid* jako wyciągnięcie *Extrusion* (przygotowany szkic należy kolejno wyciągnąć na 10 [mm]).



Rys. 6.6. Sparametryzowane szkice elementów *Bijak* oraz *Podpora*

Dodatkowo po przygotowaniu modeli przestrzennych, konieczne jest także w ramach opcji **Tools/Reference point**, dokonanie wyboru dowolnego punktu na podzespołe *Bijak* oraz *Podpora*, celem utworzenia punktu referencyjnego, do którego będą przypisane dalsze warunki brzegowe.



Rys. 6.7. Graficzna prezentacja elementu *Bijak* oraz *Podpora*

W przypadku elementu *Bijak*, należy skorzystać dodatkowo z opcji *Shape/Shell/From Solid* oraz po zaznaczeniu całego elementu dokonać zatwierdzenia (generując tym sposobem model powłokowy).

### 6.3 Definicja właściwości materiałowych – moduł *Property*

W bieżącym module konieczne jest utworzenie modelu materiałowego z uwzględnieniem zaawansowanych właściwości. W ramach opcji *Create Material* należy określić cechy materiałowe dla materiału *Stal*. Przykładowe właściwości dla tego materiału to: *Mechanical/Elasticity/Elastic*  $E = 210000$  [MPa],  $\nu = 0.3$ . W ramach opcji *General/Density* należy nadać wartość  $7.86E-09$  [t/mm<sup>3</sup>]. Następnie należy zdefiniować zaawansowane właściwości materiałowe w ramach opcji *Mechanical/Plasticity/Plastic* z podopcją *Hardening: Johnson-Cook*, zgodnie z poniższym rysunkiem.

A	B	n	m	Melting Temp	Transition Temp
792	510	0.26	1.03	0	0

Rys. 6.8. Dane materiałowe w ramach kategorii *Plastic*

W przypadku opcji *Suboptions/Rate Dependent* z wybraną podopcją *Hardening: Johnson-Cook* należy nadać dane zgodnie z poniższym rysunkiem.

C	Epsilon dot zero
0.014	1

Rys. 6.9. Definicja szczegółowych danych materiałowych

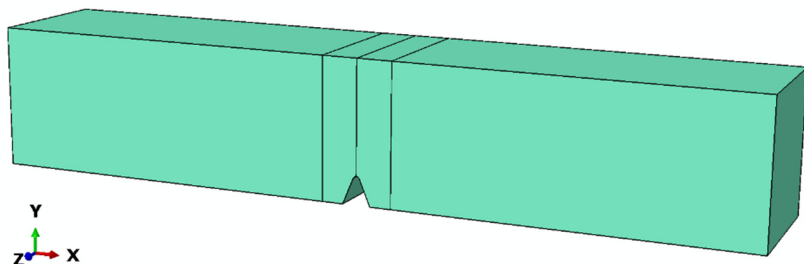
Następnie należy zdefiniować kolejne zaawansowane właściwości materiałowe, uwzględniając parametry uszkodzenia *Mechanical/Damage For Ductile Metals/Johnson-Cook Damage*, zgodnie z poniższym rysunkiem.

d1	d2	d3	d4	d5	Melting Temperature	Transition Temperature	Reference Strain Rate
0.05	3.44	2.12	0.002	0.61	0	0	1

Rys. 6.10. Definicja parametrów materiałowych związanych z uszkodzeniem

W przypadku opcji *Suboptions/Damage Evolution* wybraną podopcją *Type: Energy*, należy nadać wartość uszkodzenia w polu *Fracture Energy* równą 0.

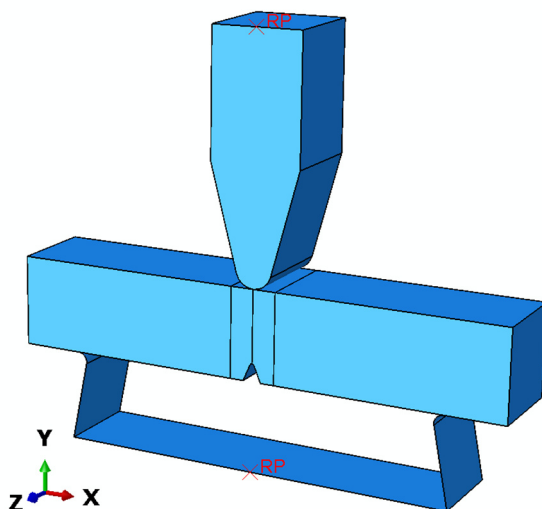
Następnie należy utworzyć sekcję materiałową, przy wykorzystaniu opcji *Create Section* o typie *Solid/Homogeneous* oraz należy przypisać utworzoną sekcję opcją *Assign Section* wyłącznie do podzespołu *Belka*.



Rys. 6.11. Model ze zdefiniowanym materiałem

## 6.4 Tworzenie instancji części – *moduł Assembly*

W ramach bieżącego modułu, niezbędne jest wczytanie podzespołów opcją *Create Instance* oraz kolejno należy dokonać złożenia dostępnymi narzędziami *Translate Instance* oraz *Rotate Instance*. Efekt poprawnie przygotowanego złożenia powinien być zgodny z poniższym rysunkiem.



Rys. 6.12. Złożenie modelu numerycznego

## 6.5 Definicja analizy numerycznej – *moduł Step*

W bieżącym module konieczne jest utworzenie kroku obliczeniowego o nazwie *Dynamika*, poleceniem *Create Step* w kategorii *Dynamic, Explicit*. Następnie konieczność stanowi włączenie opcji *NIgeom* stosowanej w ramach uwzględniania nieliniowości geometrycznych, występującej przy dużych odkształceniach i naniesienie w polu *Time Period* czasu analizy *0.002* [s].

W ramach opcji *Field Output Manager* należy wybrać dwukrotnie polecenie *Created*, po czym należy zmienić liczbę kroków obliczeniowych na *Interval: 100* oraz z sekcji *State/Field/User/Time* wybrać dodatkową podopcję *STATUS*.

## 6.6 Interakcje modelu numerycznego – *moduł Interaction*

W ramach bieżącego modułu należy opcją *Create Interaction Property* zdefiniować typ kontaktu jako *Contact* oraz kolejno wybrać opcję *Mechanical/Tangential Behavior* z podopcją *Friction Formulation: Penalty*, przy uwzględnieniu współczynnika tarcia *Friction Coeff* o wartości *0.2*. Następnie, należy także uwzględnić kontakt w ramach opcji *Mechanical/Normal Behavior* z zaznaczoną podopcją *Allow separation after contact*.

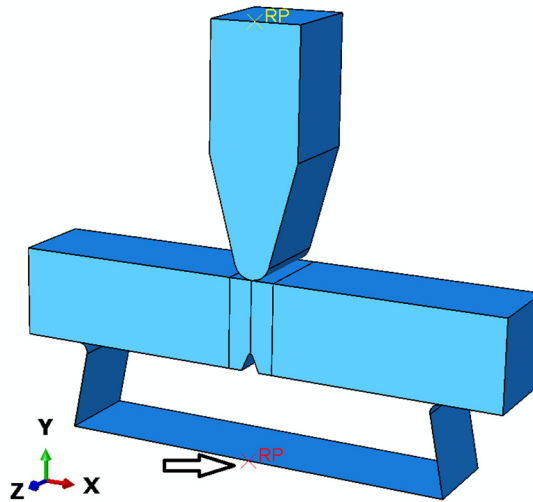
W dalszym etapie konieczne jest określenie obszarów współpracy podzespołów. Opcją *Create Interaction*, w ramach kroku *Step: Dynamika* należy określić typ współpracy *General contact (Explicit)*, po czym po akceptacji wybranego typu kontaktu, niezbędne jest wybranie opcji *All\* with self* oraz w podopcji *Global property assignment: IntProp-1*.

Dodatkowo w bieżącym module, należy również zdefiniować masę elementu *Bijak*. W tym celu konieczność stanowi bezpośrednie skorzystanie z opcji *Special/Inertia/Create* oraz określenie typu *Point mass/inertia* z zatwierdzeniem wyboru. Kolejno po zaznaczeniu i zatwierdzeniu punktu referencyjnego w obrębie elementu *Bijak*, należy nanieść w nowo otwartym oknie masę obiektu w kategorii *Isotropic: 0.03* (*0.03* [t] stanowi odpowiednio *30* [kg]).

## 6.7 Definicja warunków brzegowych – *moduł Load*

W bieżącym module należy zdefiniować warunki brzegowe. Po skorzystaniu z narzędzia *Create Boundary Condition*, niezbędne jest zdefiniowanie typu warunku *Displacement/Rotation*, w kroku obliczeniowym *Initial* oraz po zaakceptowaniu wyboru, konieczne jest zaznaczenie punktu referencyjnego w ramach elementu *Podpora*, gdzie po akceptacji wyboru punktu, należy zablokować wszystkie stopnie swobody.

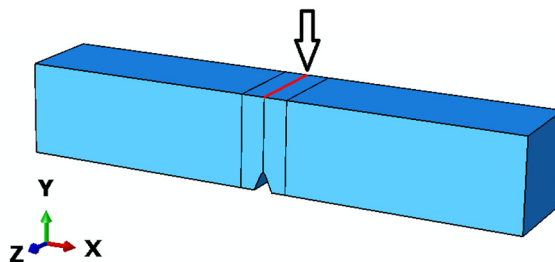




Rys. 6.13. Wybór punktu referencyjnego celem utwierdzenia elementu *Podpora*

W celu poprawnego wyboru odpowiednich krawędzi elementu *Belka*, należy bezpośrednio skorzystać z opcji **Create Display Group** i podopcji **Part/Model instances** oraz metody **Pick from viewport**. Konieczne jest wybranie elementu *Belka* zatwierdzając wybór poleceniem **Done**, po czym należy użyć kolejno opcji **Replace**, zamykając okno wyboru poleceniem **Dismiss**.

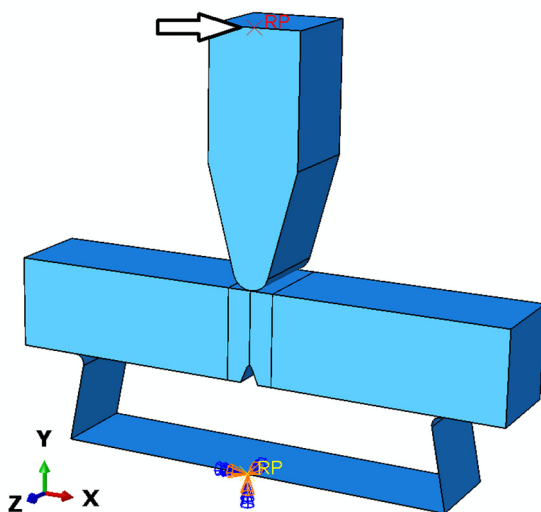
Następnie po ponownym skorzystaniu z opcji **Create Boundary Condition**, niezbędne jest wybranie typu warunku brzegowego **Displacement/Rotation**, w kroku obliczeniowym **Initial** oraz po zaakceptowaniu wyboru, zaznaczenie środkowego odcinka (na górnej powierzchni elementu *Belka*) powstałego w procesie partycjonowania i zablokowanie (po uprzedniej akceptacji wyboru) translacyjnego stopnia swobody oznaczonego jako  $U_3$ , ze względu na brak możliwości przemieszczania się wybranej krawędzi w kierunku osi *Z*.



Rys. 6.14. Wybór krawędzi do określenia warunku brzegowego w elemencie *Belka*

Po zdefiniowaniu omawianego warunku brzegowego, należy skorzystać z opcji **Replace All** w górnej części okna roboczego – celem wyświetlenia wszystkich podzespołów.

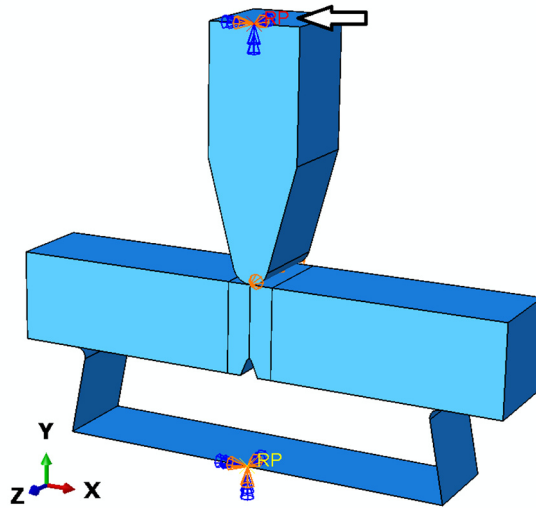
Ograniczenie ruchliwości elementu *Bijak* zostanie określone, przy ponownym wykorzystaniu opcji **Create Boundary Condition**. W tym celu niezbędne jest zdefiniowanie typu warunku **Displacement/Rotation**, w kroku obliczeniowym **Initial** oraz po zaakceptowaniu wyboru, konieczne jest zaznaczenie punktu referencyjnego podzespołu *Bijak*. Po akceptacji wyboru omawianego punktu, należy zablokować wszystkie stopnie swobody, poza jedynym  $U_2$ , który odpowiada za możliwość przemieszczenia względem osi  $Y$ .



Rys. 6.15. Wybór punktu referencyjnego do deklaracji warunku brzegowego elementu *Bijak*

Ostatni etap stanowi zdefiniowanie prędkości, z jaką będzie poruszał się element *Bijak*. W tym celu należy wykorzystać narzędzie **Create Predefined Field**, gdzie w kroku **Step: Initial**, należy wybrać kategorię **Mechanical/Velocity**. Po zatwierdzeniu wybranej opcji niezbędny jest wybór punktu referencyjnego elementu *Bijak*, gdzie po akceptacji wyboru, należy nanieść wartość prędkości w polu  $V_2$ :  $-4620$  [mm/s] (co w rzeczywistości odpowiada prędkości  $4,62$  [m/s]). W pozostałych polach  $V_1$  oraz  $V_3$ , należy nanieść wartości prędkości  $0$ . Prędkość podzespołu *Bijak* związana z realizacją na osi  $Y$ , umożliwi dalszą symulację procesu uderzenia, w kierunku elementu *Belka*.

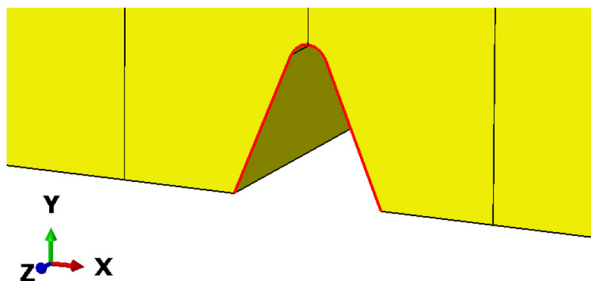
Wartość zadeklarowanej prędkości początkowej uderzenia oraz masy elementu uderzającego *Bijak*, odpowiada energii uderzenia około  $320$  [J].



Rys. 6.16. Wybór punktu referencyjnego do deklaracji prędkości elementu *Bijak*

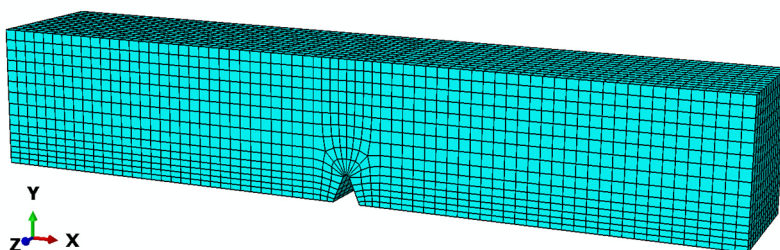
## 6.8 Budowa siatki elementów skończonych – *moduł Mesh*

W module *Mesh*, należy przejść do kategorii *Object: Part* (tak by został wyświetlony wyłącznie element *Belka*) i zdefiniować typ siatki elementu *Belka*, przy użyciu opcji *Assign Mesh Controls*. Po zaznaczeniu całego podzespołu *Belka* należy określić typ *Hex/Sweep/Medial axis*. Zagęszczenie siatki należy opcją *Seed Part* określić na 0.8 [mm]. Dodatkowo, należy zagęścić siatkę lokalnie na krawędziach karbu narzędziem *Seed Edges* określając zagęszczenie opcją *Basic/Method/By number* na wartość 5.



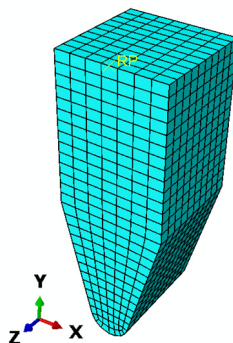
Rys. 6.17. Wybór krawędzi do zagęszczenia lokalnego siatki

Następnie po skorzystaniu z narzędzia *Assign Element Type*, należy zaznaczyć cały element i po zatwierdzeniu wybrać opcję *Element Library: Explicit* oraz *Geometric Order: Linear*. Przypisanie siatki odbywa się przy użyciu opcji *Mesh Part*.



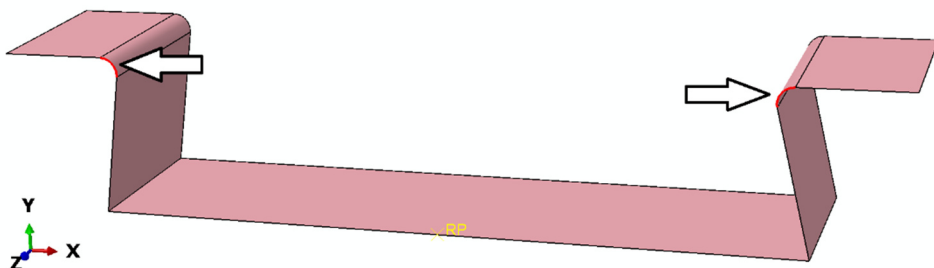
Rys. 6.18. Model dyskretny elementu *Belka*

Następnie należy w ramach kategorii *Object: Part* wyświetlić element *Bijak* i zdefiniować typ siatki, przy użyciu opcji *Assign Mesh Controls*. Po zaznaczeniu całego podzespołu *Bijak* i zatwierdzeniu, należy określić typ *Quad/Free/Medial axis*. Zagęszczenie siatki należy opcją *Seed Part* określić na 1 [mm]. Następnie po skorzystaniu z narzędzia *Assign Element Type*, należy zaznaczyć cały element i po zatwierdzeniu wybrać opcję *Element Library: Explicit*. Przypisanie siatki odbywa się przy użyciu opcji *Mesh Part*.



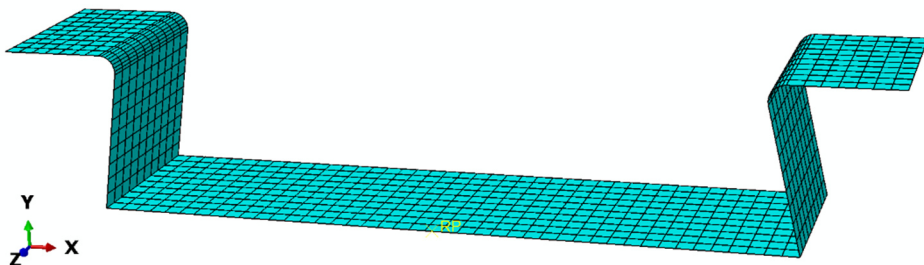
Rys. 6.19. Model dyskretny elementu *Bijak*

W przypadku ostatniego podzespołu *Podpora* definiowanie siatki odbywa się w sposób analogiczny do elementu *Bijak*, z jedyną różnicą dodatkowego wykorzystania narzędzia *Seed Edges* określając zagęszczenie lokalne opcją *Basic/Method/By number* na wartość 8. Pozostałe opcje bez zmian.



Rys. 6.20. Wybór krawędzi do zagęszczenia lokalnego siatki

Model dyskretny elementu *Podpora* po poprawnie przeprowadzonej deklaracji siatki, będzie zgodny z poniższym rysunkiem.

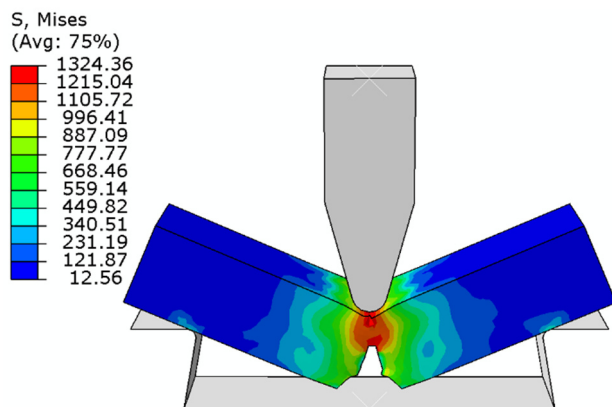
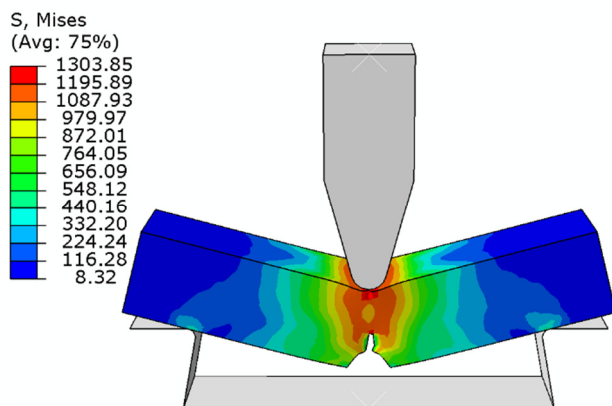
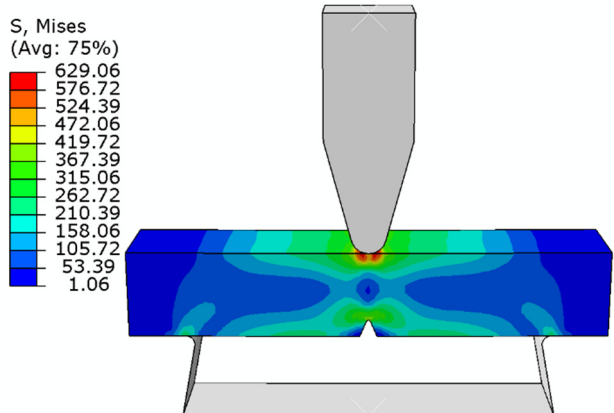


Rys. 6.21. Model dyskretny elementu *Podpora*

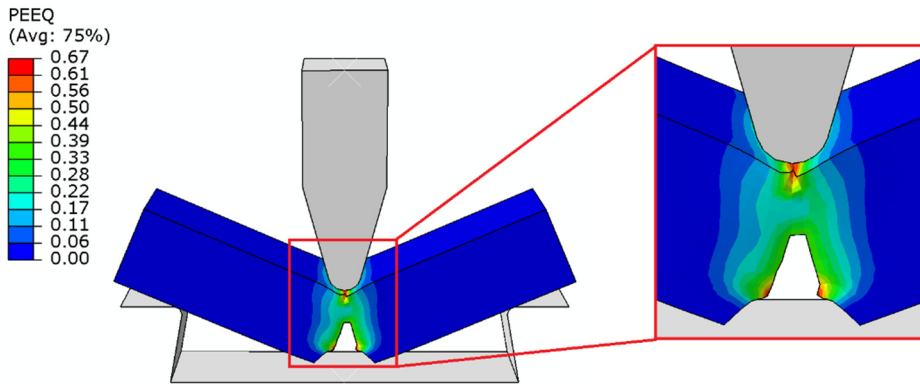
Kolejny etap stanowi wyłącznie przeprowadzenie obliczeń numerycznych, umożliwiającą na uzyskanie wyników testu udarnościowego.

## 6.9 Wykonanie obliczeń numerycznych – *moduł Job*

W bieżącym module konieczne jest przygotowanie zadania obliczeniowego, w ramach opcji *Create Job* oraz wybranie zakładki *Parallelization* celem ustalenia odpowiedniej liczby rdzeni do obliczeń. W ramach opcji *Job Manager* należy poleceniem *Submit* uruchomić proces obliczeniowy i oczekiwać na status *Completed*. Po wykonanych obliczeniach, wykorzystując opcję *Results* i kolejno *Plot Contours on Deformed Shape* należy wyświetlić wynik naprężeń i ekwiwalentnych odkształceń plastycznych (parametry *S* i *PEEQ*).

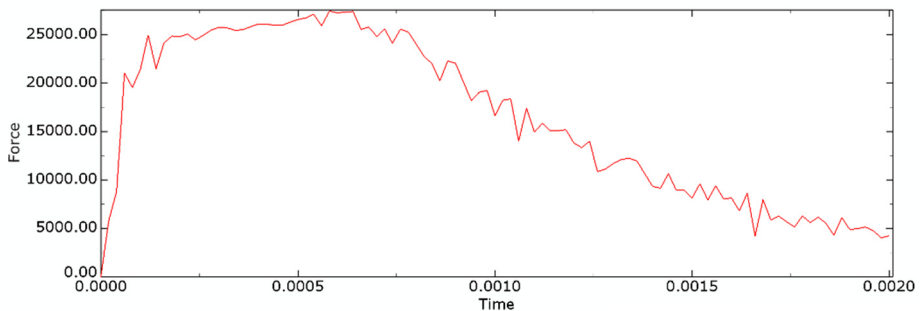


Rys. 6.22. Wynik rozkładu naprężeń z prezentacją uszkodzenia materiału



Rys. 6.23. Wynik analizy numerycznej – ekwiwalentne odkształcenia plastyczne

Dodatkowo, możliwe jest wygenerowanie wykresu uzależniającego wartość obciążenia od czasu (w ramach elementu *Podpora*). W tym celu należy skorzystać z narzędzia *Create XY Data/ODB field output* akceptując *Continue*. Po wyborze danej opcji należy kolejno wybrać kategorie **Position: Unique Nodal**, po czym zmienną *RF2* z kategorii *RF*. W następnym kroku należy przejść do zakładki *Element/Nodes*, gdzie konieczne jest skorzystanie z opcji **Edit Selection** i dokonanie wyboru punktu referencyjnego i kolejno zatwierdzenia wyboru w ramach podzespołu *Podpora* i wygenerowanie wykresu opcją *Plot*.



Rys. 6.24. Wynik analizy numerycznej – wykres obciążenia w czasie

## 7. BADANIE PROCESU TŁOCZENIA


### 7.1 Wprowadzenie





Przedmiotem analizy numerycznej jest model numeryczny pozwalający na symulację procesu tłoczenia próbek aluminiowych. W ramach dynamicznego zagadnienia tłoczenia zostaną rozpatrzone trzy przypadki omawianego procesu, w zależności od grubości próbek oraz wygenerowana charakterystyka tłoczenia.

W realizowanym przykładzie zostanie przeprowadzona dyskretyzacja konstrukcji przy wykorzystaniu trójwymiarowych elementów bryłowych typu C3D8R (elementy ośmiowęzłowe o 3 stopniach swobody w każdym węźle, z liniową funkcją kształtu oraz zredukowanym całkowaniem) oraz R3D4 (elementy czterowęzłowe nieodkształcalne).

W odniesieniu do zagadnień statycznych, gdzie czas analizy był pomijalny, w przypadku zagadnień dynamicznych definicja czasu realizowanego zagadnienia stanowi parametr fundamentalny.

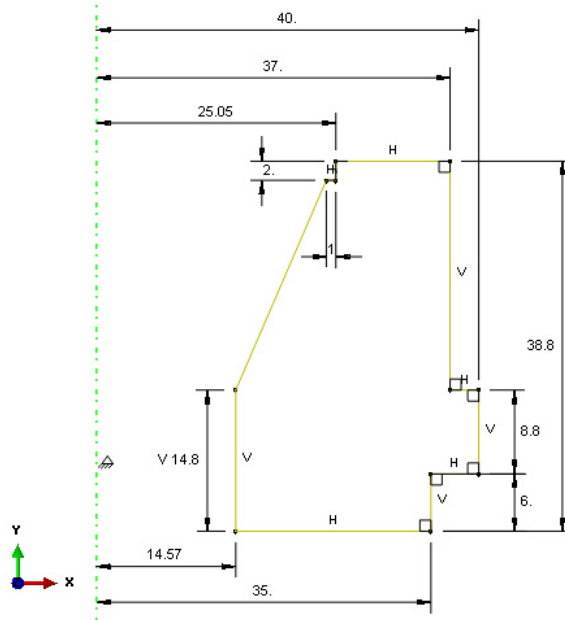
### 7.2 Budowa modelu geometrycznego – *moduł Part*

Model geometryczny pierwszego elementu zostanie wykonany za pomocą narzędzia *Create Part* . Nazwę elementu należy zdefiniować jako *Matryca* oraz ustalić parametry geometryczne części jako element *3D*, ciało nieodkształcalne typu *Discrete Rigid*, wykonane jako element bryłowy typu *Solid* metodą obrócenia profilu *Revolution*, akceptując ustawienia poleceniem *Continue*.

Po automatycznym przekierowaniu do szkicownika, należy skorzystać z opcji *Create Lines: Connected* . W przypadku dodatkowo naszkicowanych przedłużeń linii tworzących szkic, możliwe jest docięcie niepotrzebnych części przy wykorzystaniu polecenia *Auto-Trim* . Niezbędne wymiary należy nanieść przy użyciu narzędzia *Add Dimension* , natomiast edycji oraz modyfikacji wymiarów przeprowadzić narzędziem *Edit Dimension Value* , poprzez zaznaczenie danego wymiaru i zadeklarowanie poprawnej jego wartości.

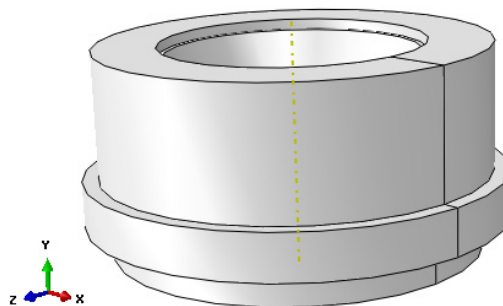
Na rys. 7.1 przedstawiono sparametryzowany szkic profilu bocznego elementu *Matryca*, który w dalszym etapie należy obrócić wokół własnej osi.






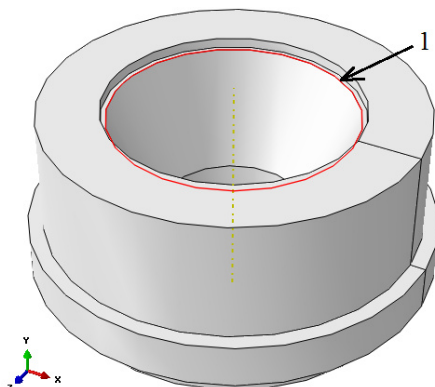
Rys. 7.1. Szkic elementu o nazwie *Matryca*

Po zatwierdzeniu narysowanego szkicu poleceniem *Done*, w dolnej części okna roboczego programu lub dwukrotnym użyciu środkowego przycisku myszy, nastąpi automatyczne opuszczenie szkicownika. Program kolejno poprosi o wprowadzenie kąta obrotu narysowanego profilu, względem pionowej linii stanowiącej oś obrotu. Przy parametrze *Angle* w nowo otwartym oknie, konieczne jest naniesienie pełnego kąta obrotu wynoszącego 360 stopni. Po zatwierdzeniu poleceniem *OK* wprowadzonego parametru, nastąpi wygenerowanie modelu przestrzennego zgodnie z rys. 7.2.




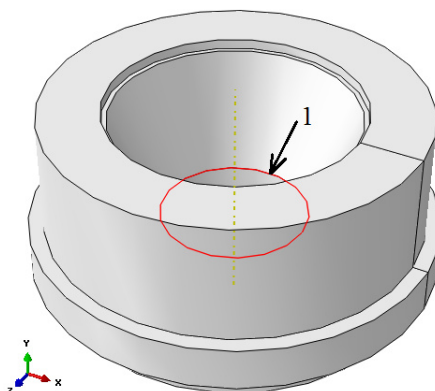
Rys. 7.2. Model bryłowy elementu *Matryca*

Kolejny etap stanowi wykonanie dwóch zaokrągleń w wewnętrznej części obiektu. Celem wykonania odpowiednich promieni zaokrągleń konieczne jest użycie narzędzia *Create Round or Fillet* . Następnie należy wybrać odpowiednią krawędź zgodnie z rys. 7.3, zatwierdzić wybór poleceniem *Done* oraz nanieść wartość w dolnej części okna roboczego *Radius: 0.5*, po czym dokonać akceptacji klawiszem *Enter*.



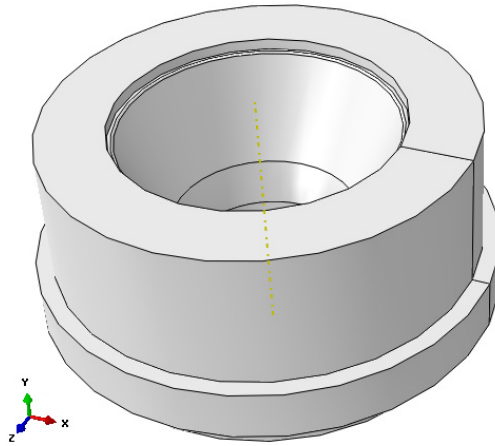
Rys. 7.3. Wybór krawędzi celem pierwszego zaokrąglenia

W ramach wykonania drugiego promienia zaokrąglenia na krawędzi znajdującej się wewnątrz modelu przestrzennego, konieczne analogiczne zachowanie związane z ponownym użyciem opcji *Create Round or Fillet* . Następnie należy wybrać odpowiednią krawędź zgodnie z rys. 7.4, zatwierdzić wybór poleceniem *Done* oraz nanieść wartość w dolnej części okna roboczego *Radius: 20*, po czym dokonać akceptacji klawiszem *Enter*.



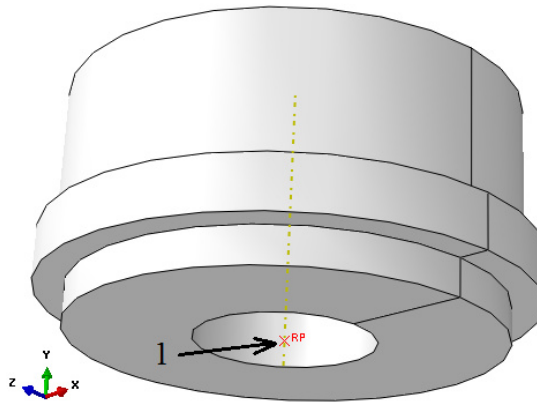
Rys. 7.4. Wybór krawędzi celem drugiego zaokrąglenia

Graficzna prezentacja modelu przestrzennego z wykonanymi zaokrągleniami jest zgodna z rys. 7.5.



Rys. 7.5. Model bryłowy z zaokrągleniami

Dodatkowo konieczne jest wygenerowanie punktu referencyjnego, do którego będą przypisane przyszłe warunki brzegowe. W tym celu, należy przejść do zakładki *Tools/Reference Point*, po czym wskazać środkowy punkt w centralnej części dolnego okręgu podzespołu, zgodnie z rys. 7.6.



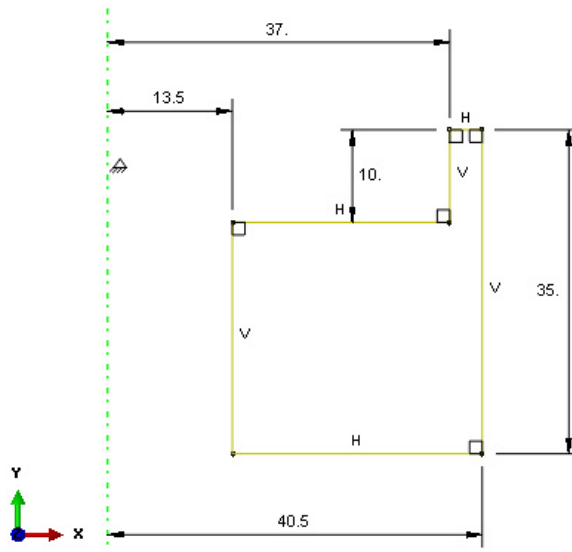
Rys. 7.6. Utworzenie punktu referencyjnego

Ostatni etap związany z elementem *Matryca*, stanowi modyfikacja elementu bryłowego, na element powłokowy. Zabieg ten ma na celu możliwość przypisania lepszego typu siatki elementów skończonych oraz przyspieszenie czasu realizacji zagadnienia, ze względu na mniejszą ilość elementów skończonych, jaka będzie obejmować powłokowy element *Matryca*. Celem modyfikacji należy przejść do zakładki *Shape/Shell/From Solid*. Następnie konieczne jest zaznaczenie całego elementu bryłowego oraz zatwierdzenie poleceniem *Done*. Element zostanie zmodyfikowany automatycznie na typ powłokowy.

Drugi element należy wykonać przy ponownym użyciu głównego narzędzia pozwalającego na projektowanie części *Create Part*. Nazwę elementu należy zdefiniować jako *Prowadnica* oraz ustalić parametry geometryczne części jako element 3D, ciało nieodkształcalne typu *Discrete Rigid*, wykonane jako element bryłowy metodą obrócenia profilu *Revolution*, akceptując zdefiniowane ustawienia poleceniem *Continue*.

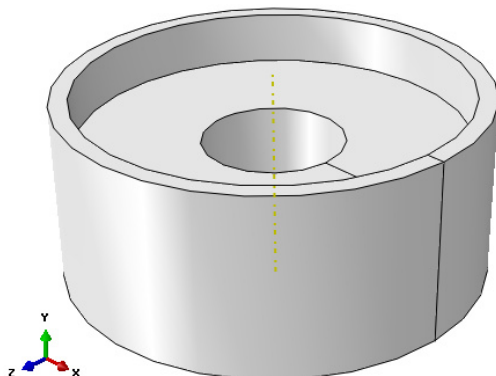
Po automatycznym przekierowaniu do szkicownika, należy skorzystać z opcji *Create Lines: Connected*. Niezbędne wymiary należy nanieść przy użyciu narzędzia *Add Dimension*, natomiast edycji oraz modyfikacji wymiarów przeprowadzić narzędziem *Edit Dimension Value*, poprzez zaznaczenie danego wymiaru i zadeklarowanie poprawnej jego wartości.

Na rys. 7.7 przedstawiono sparametryzowany szkic profilu bocznego elementu *Prowadnica*, który w dalszym etapie należy obrócić wokół własnej osi.



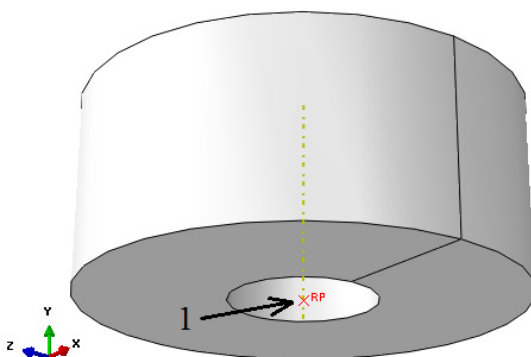
Rys. 7.7. Szkic elementu o nazwie *Prowadnica*

Po zatwierdzeniu narysowanego szkicu poleceniem *Done*, w dolnej części okna roboczego programu lub dwukrotnym użyciu środkowego przycisku myszy, nastąpi automatyczne opuszczenie szkicownika. Program kolejno poprosi o wprowadzenie kąta obrotu narysowanego profilu, względem pionowej linii stanowiącej oś obrotu. Przy parametrze *Angle* w nowo otwartym oknie, konieczne jest naniesienie pełnego kąta obrotu wynoszącego 360 stopni. Po zatwierdzeniu poleceniem *OK* wprowadzonego parametru, nastąpi wygenerowanie modelu przestrzennego zgodnie z rys. 7.8.




Rys. 7.8. Model bryłowy elementu *Prowadnica*




Dodatkowo konieczne jest wygenerowanie punktu referencyjnego, do którego będą przypisane przyszłe warunki brzegowe. W tym celu, należy przejść do zakładki *Tools/Reference Point*, po czym wskazać środkowy punkt w centralnej części dolnego okręgu podzespołu, zgodnie z rys. 7.9.



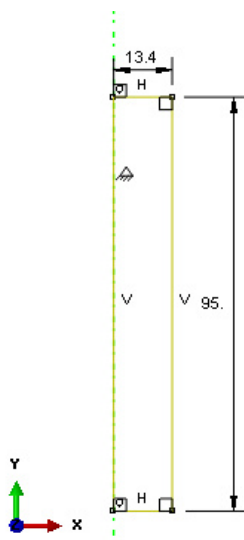
Rys. 7.9. Utworzenie punktu referencyjnego

Ostatni etap związany z elementem *Prowadnica*, stanowi modyfikacja elementu bryłowego, na element powłokowy. Zabieg ten ma na celu możliwość przypisania lepszego typu siatki elementów skończonych oraz przyspieszenie czasu realizacji zagadnienia, ze względu na mniejszą ilość elementów skończonych, jaka będzie obejmować powłokowy element *Prowadnica*. Celem modyfikacji należy przejść do zakładki *Shape/Shell/From Solid*. Następnie konieczne jest zaznaczenie całego elementu bryłowego oraz zatwierdzenie poleceniem *Done*. Element zostanie zmodyfikowany automatycznie na pożądany typ powłokowy.

Trzeci element należy wykonać przy ponownym użyciu głównego narzędzia pozwalającego na projektowanie części *Create Part* . Nazwę elementu należy zdefiniować jako *Stempel* oraz ustalić parametry geometryczne części jako element *3D*, ciało nieodkształcalne typu *Discrete Rigid*, wykonane jako element bryłowy typu *Solid* metodą obrócenia profilu *Revolution*, akceptując zdefiniowane ustawienia poleceniem *Continue*.

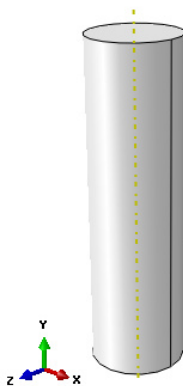
Po automatycznym przekierowaniu do szkicownika, należy skorzystać z opcji *Create Lines: Connected* . Niezbędne wymiary należy nanieść przy użyciu narzędzia *Add Dimension* , natomiast edycji oraz modyfikacji wymiarów przeprowadzić narzędziem *Edit Dimension Value* , poprzez zaznaczenie danego wymiaru i zadeklarowanie poprawnej jego wartości.

Na rys. 7.10 przedstawiono sparаметryzowany szkic profilu bocznego elementu *Stempel*, który w dalszym etapie należy obrócić wokół własnej osi.




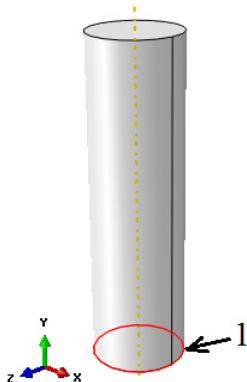
Rys. 7.10. Szkic elementu o nazwie *Stempel*

Po zatwierdzeniu narysowanego szkicu poleceniem *Done*, w dolnej części okna roboczego programu lub dwukrotnym użyciu środkowego przycisku myszy, nastąpi automatyczne opuszczenie szkicownika. Program kolejno poprosi o wprowadzenie kąta obrotu narysowanego profilu, względem pionowej linii stanowiącej oś obrotu. Przy parametrze *Angle* w nowo otwartym oknie, konieczne jest naniesienie pełnego kąta obrotu wynoszącego 360 stopni. Po zatwierdzeniu poleceniem *OK* wprowadzonego parametru, nastąpi wygenerowanie modelu przestrzennego zgodnie z rys. 7.11.



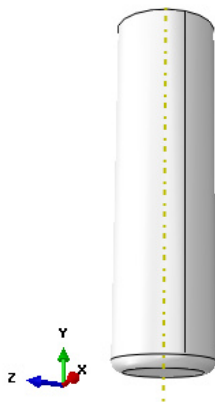
Rys. 7.11. Model bryłowy elementu *Stempel*

Kolejny etap stanowi wykonanie zaokrąglenia na dolnej krawędzi obiektu. W tym celu konieczne jest użycie narzędzia *Create Round or Fillet* . Następnie należy wybrać odpowiednią krawędź zgodnie z rys. 7.12, zatwierdzić wybór poleceniem *Done* oraz nanieść wartość w dolnej części okna roboczego *Radius*: 3, po czym dokonać akceptacji klawiszem *Enter*.



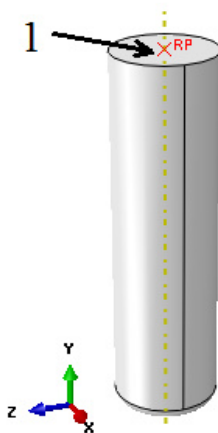
Rys. 7.12. Wybór krawędzi celem pierwszego zaokrąglenia

Wizualizację modelu bryłowego z wykonanym promieniem zaokrąglenia przedstawiono na rys. 7.13.



Rys. 7.13. Model bryłowy z zaokrągleniem


Dodatkowo konieczne jest wygenerowanie punktu referencyjnego, do którego będą przypisane przyszłe warunki brzegowe. W tym celu, należy przejść do zakładki *Tools/Reference Point*, po czym wskazać środkowy punkt w górnej części podzespołu, zgodnie z rys. 7.14.





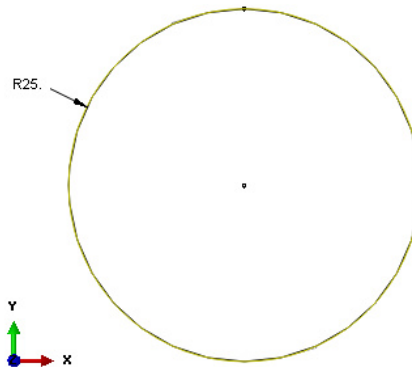
Rys. 7.14. Utworzenie punktu referencyjnego



Ostatni etap związany z elementem *Stempel*, stanowi modyfikacja elementu bryłowego, na element powłokowy. Zabieg ten ma na celu możliwość przypisania lepszego typu siatki elementów skończonych oraz przyspieszenie czasu realizacji zagadnienia, ze względu na mniejszą ilość elementów skończonych, jaka będzie obejmować powłokowy element *Stempel*. Celem modyfikacji należy przejść do zakładki *Shape/Shell/From Solid*. Następnie konieczne jest zaznaczenie całego elementu bryłowego oraz zatwierdzenie poleceniem *Done*. Element zostanie zmodyfikowany automatycznie na typ powłokowy.

Czwarty, a zarazem ostatni element należy wykonać przy ponownym użyciu głównego narzędzia pozwalającego na projektowanie części *Create Part* . Nazwę elementu należy zdefiniować jako *Plytka\_047* oraz ustalić parametry geometryczne części jako element 3D, ciało odkształcalne typu *Deformable*, wykonane jako element bryłowy metodą wyciągnięcia profilu *Extrusion*, akceptując zdefiniowane ustawienia poleceniem *Continue*.

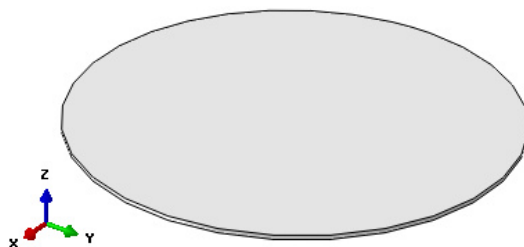
Po automatycznym przekierowaniu do szkicownika, należy skorzystać z opcji *Create Circle: Center and Perimeter* . Niezbędne wymiary w postaci promienia okręgu należy nanieść przy użyciu narzędzia *Add Dimension* . Po narysowaniu okręgu z początku układu współrzędnych istotne jest, żeby punkt końcowy rysowanego okręgu, był zgodny z kierunkiem osi Y, co ułatwi dalsze etapy w definiowaniu zagadnienia numerycznego. Na poniższym rys. 7.15 przedstawiono wykonany szkic.





Rys. 7.15. Szkic elementu o nazwie *Plytka\_047*

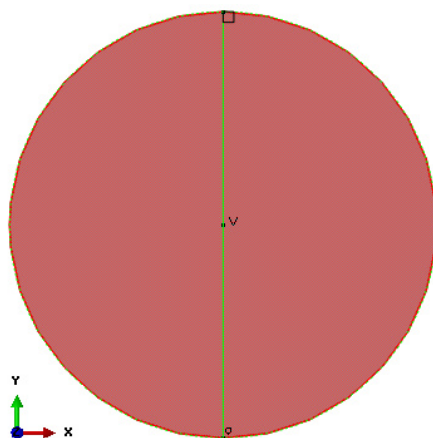
Po zatwierdzeniu narysowanego profilu poleceniem *Done* w nowo otwartym oknie należy wprowadzić długość wyciągnięcia *Depth: 0.47*, ustalając tym samym grubość modelu przestrzennego oraz zatwierdzając poleceniem *OK*. Wszelkie wymiary geometryczne dotyczące tworzenia modelu podane są w [mm].

Na rys. 7.16 przedstawiono model bryłowy zbudowany na podstawie wcześniej wykonanego szkicu.




Rys. 7.16. Model bryłowy elementu *Płytką\_047*

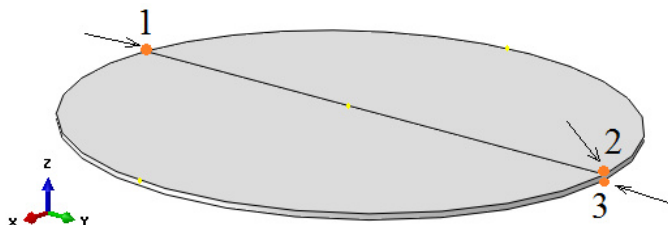
Dodatkowo konieczne jest wykonanie partycji, dzielących element na dwie równe części. Za pomocą dostępnego narzędzia *Partition Face: Sketch*  możliwe będzie przeprowadzenie odpowiedniego partycjonowania. Po wyborze omawianej opcji niezbędny jest wybór płaskiej kołowej powierzchni górnej elementu, zatwierdzenie poleceniem *Done* oraz wybór krawędzi stanowiącej obwód wybranej powierzchni kołowej, po czym nastąpi automatycznie przekierowanie do szkicownika. Po skorzystaniu z opcji *Create Lines: Connected*  należy narysować linię prostą zgodnie z rys. 7.17, wzdłuż osi *Y*. Po opuszczeniu szkicownika poleceniem *Done*, lub dwukrotnym kliknięciem środkowego klawisza myszy nastąpi przejście do głównych opcji projektowania.





Rys. 7.17. Szkic służący do wykonania pierwszej partycji

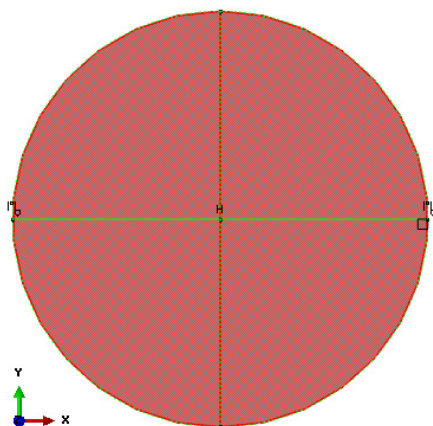
Następnym etapem jest wykonanie podziału elementu na dwie jednakowe części, na podstawie narysowanego szkicu. Niezbędne jest użycie opcji *Partition Cell: Define Cutting Plane* . Z dolnej części okna roboczego z dostępnych trzech opcji, konieczne jest wybranie środkowej *3 Points*. Po wybraniu

odpowiednich trzech punktów, celem utworzenia płaszczyzny podziału, finalnie wybór zgodny z rys. 7.18, należy zaakceptować poleceniem *Create Partition*.




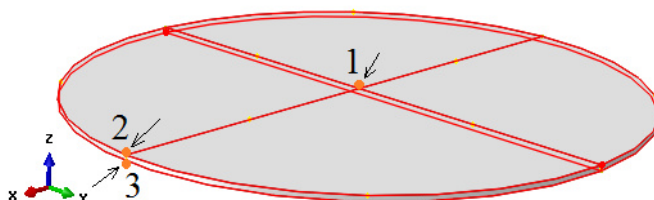
**Rys. 7.18.** Wybór punktów do wykonania pierwszej partycji

W dalszej części niezbędne jest wykonanie partycji, dzielących element na następne równe części. Za pomocą dostępnego narzędzia *Partition Face: Sketch* , możliwe będzie przeprowadzenie odpowiedniego partycjonowania. Po wyborze omawianej opcji niezbędny jest wybór płaskiej kołowej powierzchni górnej elementu z jednocześnie wciśniętym klawiszem *Shift*, zatwierdzenie poleceniem *Done* oraz wybór krawędzi stanowiącej pół obwodu wybranej powierzchni kołowej, po czym nastąpi automatycznie przekierowanie do szkicownika. Po skorzystaniu z opcji *Create Lines: Connected*  należy narysować linię prostą zgodnie z rys. 7.19, wzdłuż osi *X*. Po opuszczeniu szkicownika poleceniem *Done*, lub dwukrotnym kliknięciem środkowego klawisza myszy nastąpi przejście do głównych opcji projektowania.



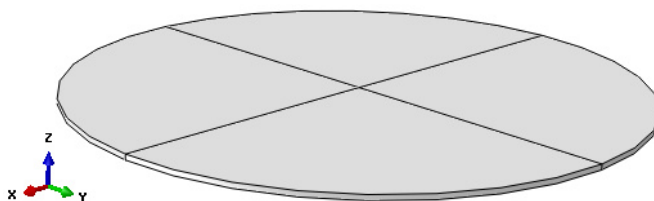
**Rys. 7.19.** Szkic służący do wykonania drugiej partycji

Następnym etapem jest wykonanie podziału elementu na jednakowe części, na podstawie narysowanego szkicu. Niezbędne jest użycie opcji *Partition Cell: Define Cutting Plane* . Po zaznaczeniu całego elementu oraz zatwierdzeniu zaznaczenia poleceniem *Done*, z dolnej części okna roboczego z dostępnych trzech opcji, konieczne jest wybranie środkowej *3 Points*. Po wybraniu odpowiednich trzech punktów, celem utworzenia płaszczyzny podziału, finalnie wybór zgodny z rys. 7.20, należy zaakceptować poleceniem *Create Partition*.




Rys. 7.20. Wybór punktów do wykonania drugiej partycji

Graficzna prezentacja modelu bryłowego po wykonaniu wszelkich partycji została przedstawiona na rys. 7.21.





Rys. 7.21. Model bryłowy elementu *Plytka\_047* po partycjonowaniu

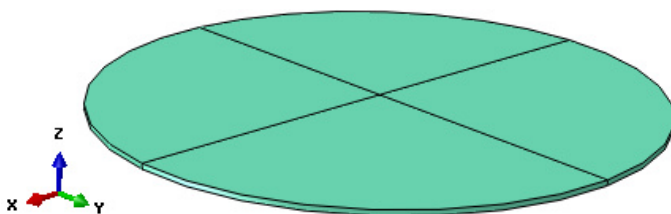
### 7.3 Definicja właściwości materiałowych – *moduł Property*

Właściwości materiałowe przypisuje się w module *Property* poprzez użycie opcji *Create Material* . W nowo otwartym oknie następuje określenie nazwy materiału jako *Aluminium*. Następnie, należy przejść do zakładki *Mechanical/Elasticity/Elastic*, w celu określenia podstawowych cech opisujących materiał. Moduł odkształcalności liniowej wynosi *Young's Modulus: 70000* [MPa] oraz współczynnik Poissona stanowiący stosunek odkształcenia poprzecznego do podłużnego *Poisson's Ratio: 0.33*. Po wprowadzeniu danych należy bezpośrednio przejść do zakładki *Mechanical/Plasticity/Plastic*. W pierwszym wierszu w opcji *Yield Stress* należy nanieść wartość granicy

plastyczności materiału wynoszącą w tym przypadku 85 [MPa], natomiast odkształcenie plastyczne, odpowiadające poziomowi granicy plastyczności *Plastic Strain* wynosi 0. Po przejściu klawiszem *Enter* z klawiatury do drugiego wiersza, należy zdefiniować *Yield Stress* jako granicę wytrzymałości materiału równą 115 [MPa], przy odpowiadającym jej wydłużeniu plastycznym próbki przy zerwaniu wynoszącym 2%, które musi być zdefiniowane liczbowo w podopcji *Plastic Strain* jako 0.02. Z uwagi na realizację zagadnienia dynamicznego, niezbędne jest określenie gęstości materiału. Celem określenia pożądanej gęstości, należy przejść do zakładki *General/Density*. W polu *Mass Density*, konieczne jest wpisanie gęstości w poprawnej jednostce. Z uwagi na to iż model był tworzony w [mm], gęstość musi być podana w jednostce zgodnej jako [t/mm<sup>3</sup>]. Gęstość z reguły podawana jest w jednostce [kg/m<sup>3</sup>], jednak do celów numerycznych poprawnie zamodelowanego procesu, niezbędne jest przeliczenie 2700 [kg/m<sup>3</sup>] na poprawny typ jednostki. W omawianym polu należy nanieść wartość 2.7E-009.

Jako następny etap należy utworzyć sekcje z odpowiednio przypisanymi właściwościami materiałowymi za pomocą narzędzia *Create Section* , definiując nazwę sekcji jako *Aluminium* oraz właściwości *Solid/Homogeneous*, zatwierdzając wprowadzone dane poleceniem *Continue*. W nowo otwartym oknie należy wybrać *Material: Aluminium*, zatwierdzając *OK*.


Utworzoną w powyższy sposób sekcję należy przypisać do wykonanego modelu o nazwie *Plytka\_047*, wybierając kolejno nad ekranem roboczym w okienku *Part* poszczególną część i wykorzystując narzędzie *Assign Section* . Po zaznaczeniu odpowiedniej części i zatwierdzeniu wyboru poleceniem *Done*, należy wybrać odpowiednią sekcję *Aluminium* o typie *Solid* i zaakceptować przypisanie sekcji poleceniem *OK*. Po poprawnym przypisaniu sekcji materiałowej element zmienia barwę na kolor zielony zgodnie z rys. 7.22.

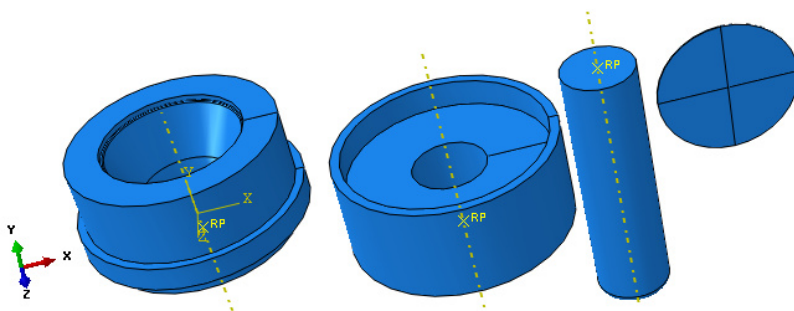


Rys. 7.22. Model bryłowy z przypisanymi cechami materiałowymi


Z uwagi na fakt, iż trzy pozostałe elementy stanowią nieodkształcalne obiekty w odniesieniu do realizowanej analizy numerycznej, nie zostanie w ramach żadnego z nich definiowany materiał.

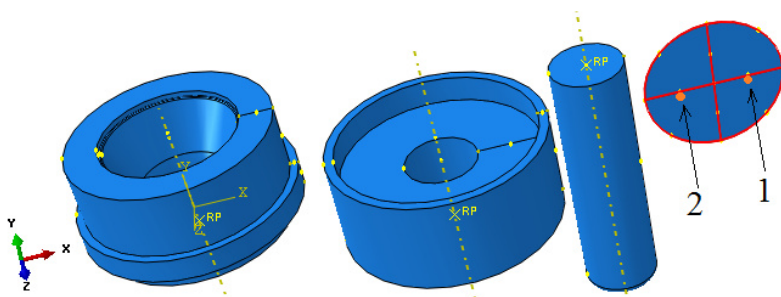
## 7.4 Tworzenie instancji części – *moduł Assembly*

W bieżącym module należy dokonać utworzenia instancji wykonanych elementów w ramach wcześniejszego projektowania. Model numeryczny składa się z czterech elementów, przy czym każdy zostanie zaimportowany jednokrotnie. W tym celu należy wykorzystać narzędzie *Create Instance* , zaznaczając w oknie listy części elementy z wciśniętym klawiszem *Shift*, przy uwzględnieniu opcji *Auto-offset from other instances*, co finalnie należy zatwierdzić poleceniem *OK*. Utworzoną instancję części przedstawiono na rys. 7.23.




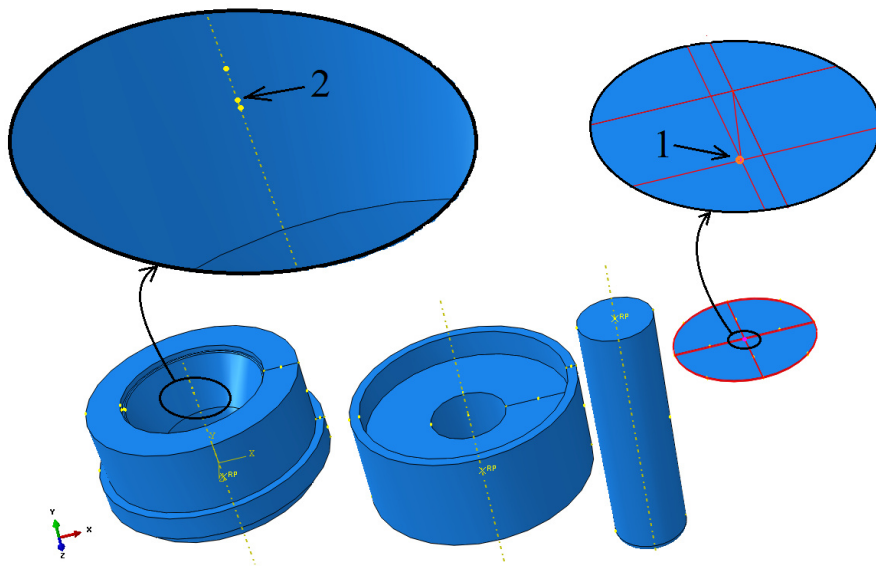
Rys. 7.23. Wstawienie instancji części

W ramach modułu *Assembly* konieczne jest dokonanie złożenia wstawionych instancji. Po wczytaniu elementów należy je złożyć odpowiednio w przestrzeni, gdzie początkowo konieczne jest użycie opcji *Rotate Instance* , zaznaczenie elementu *Plytka\_047* oraz wybranie polecenia *Done*. Kolejny krok stanowi wybór dwóch punktów, wzdłuż których będzie ustalona oś obrotu elementu. Punkty powinny być wybrane w kolejności przedstawionej na rys. 7.24, po czym należy wybrać zatwierdzić klawiszem *Enter* w ramach zdefiniowanego kąta obrotu *Angle of rotation: 90* oraz poleceniem *OK*.



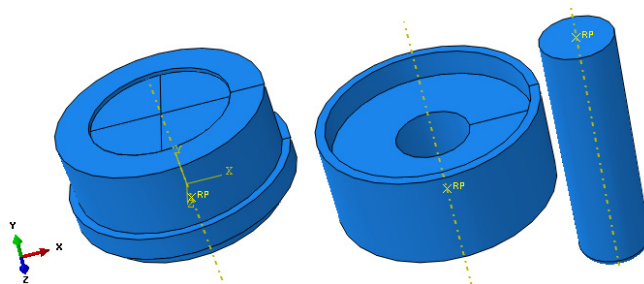
Rys. 7.24. Wybór punktów do obrotu elementu *Plytka\_047*

Następnie konieczne jest użycie opcji *Translate Instance* , wybór elementu *Plytka\_047* oraz zatwierdzenie opcją *Done*. Po wyborze odpowiednich punktów, zgodnie z rys. 7.25 (początkowo punktu z elementu *Plytka\_047*, znajdującego się w dolnej środkowej części elementu, natomiast kolejno punktu z elementu *Matryca*, znajdującego się na osi obrotu bryły, pomiędzy dwoma punktami w górnej części osi *Y*) i zatwierdzeniu wyboru omawianych punktów opcją *OK*, nastąpi realizacja translacji.




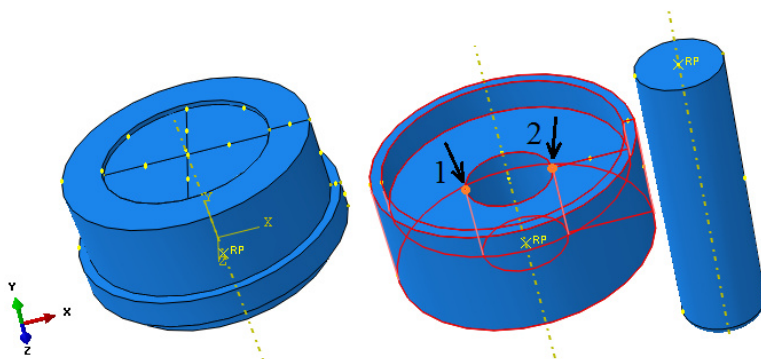
**Rys. 7.25.** Wybór punktów do translacji elementu *Plytka\_047*

Graficzna prezentacja częściowego złożenia modelu numerycznego została przedstawiona na rys. 7.26.




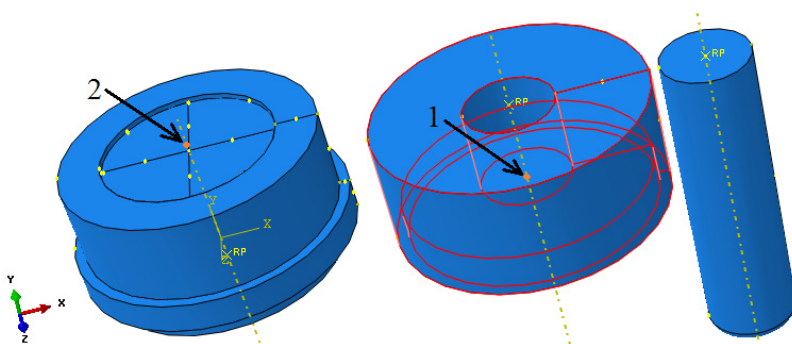
**Rys. 7.26.** Wizualizacja przeprowadzonej translacji

W dalszym etapie konieczne jest ponowne użycie opcji *Rotate Instance* , zaznaczenie elementu *Prowadnica* oraz wybranie polecenia *Done*. Kolejny krok stanowi wybór dwóch punktów, wzdłuż których będzie ustalona oś obrotu elementu. Punkty powinny być wybrane w kolejności przedstawionej na rys. 7.27, po czym wybór należy zatwierdzić klawiszem *Enter*, po wprowadzeniu kąta obrotu *Angle of rotation: 180* oraz poleceniem *OK*.




Rys. 7.27. Wybór punktów celem rotacji elementu *Prowadnica*

Następnie konieczne jest ponowne użycie opcji *Translate Instance* , wybór elementu *Prowadnica* oraz zatwierdzenie opcją *Done*. Po wyborze odpowiednich punktów, zgodnie z rys. 7.28 (początkowo punktu z elementu *Prowadnica*, znajdującego się w dolnej części w środku mniejszego okręgu, natomiast kolejno punktu z elementu *Matryca*, znajdującego się w najwyższym punkcie osi Y, stanowiącej oś obrotu bryły) i zatwierdzeniu wyboru omawianych punktów opcją *OK*, nastąpi realizacja translacji.

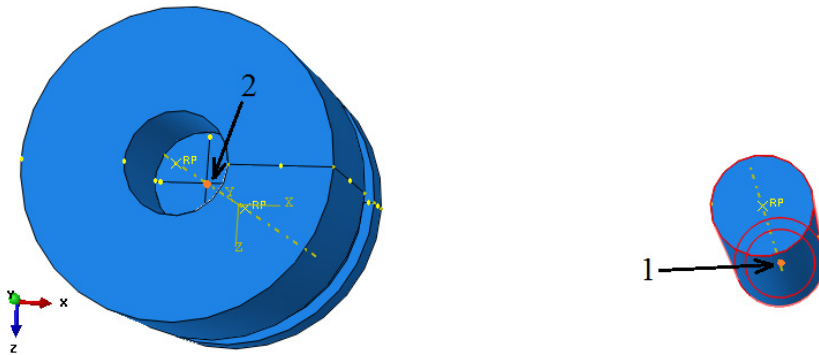


Rys. 7.28. Wybór punktów do translacji elementu *Prowadnica*




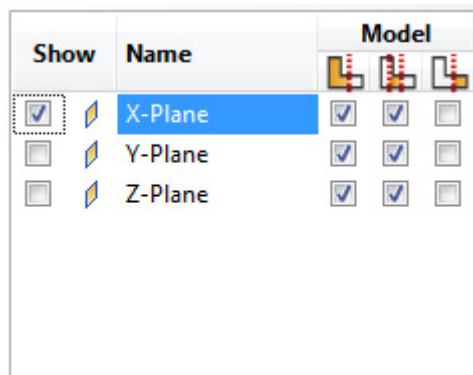
Ostatni etap złożenia związany jest z przeprowadzeniem odpowiedniej translacji. W ramach tego konieczne jest ponowne użycie opcji *Translate Instance* , wybór elementu *Stempel* oraz zatwierdzenie wyboru dostępnym poleceniem *Done*. Po wyborze odpowiednich punktów, zgodnie z rys. 7.29 (początkowo punktu z elementu *Stempel*, znajdującego się w najniższej części podzespołu, w środku mniejszego okręgu, natomiast kolejno punktu z elementu *Plytka\_047*, znajdującego się w środku górnej części omawianego elementu – najwyżej położony punkt leżący na osi *Y* na elemencie *Plytka\_047*) i zatwierdzeniu wyboru omawianych punktów opcją *OK*, nastąpi realizacja translacji.

Niezbędne jest przybliżenie obszarów wyboru opisywanych punktów, celem poprawnego ich wybrania zgodnie z wcześniej opisywanym założeniem, co zostało przedstawione na rys. 7.29.



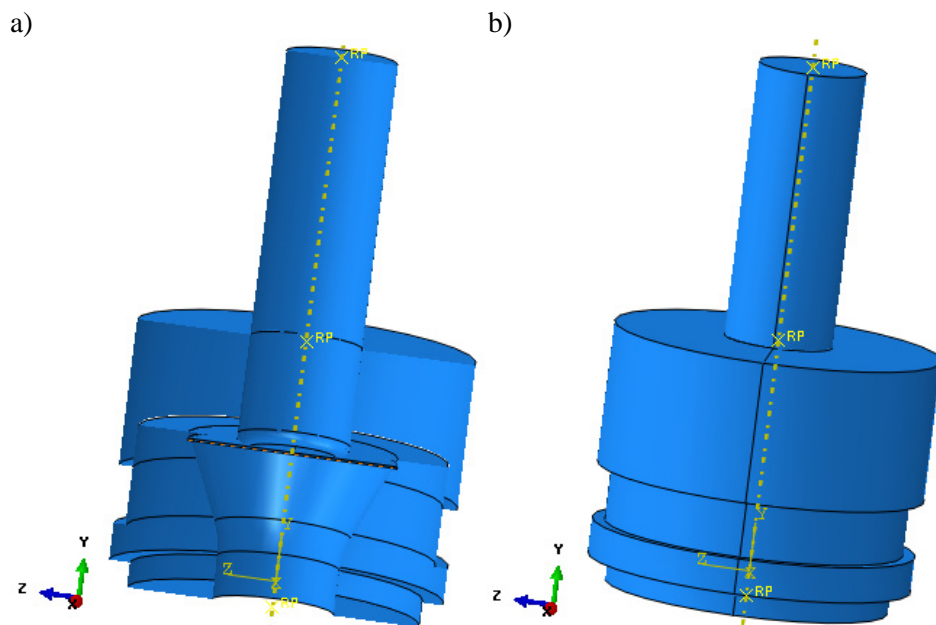
**Rys. 7.29.** Wybór punktów do translacji elementu *Stempel*

Przeprowadzenie translacji w odniesieniu do elementu *Stempel*, stanowi ostatni etap w ramach realizowanego złożenia w odniesieniu do modułu *Assembly*. Po zrealizowaniu wszelkich rotacji i translacji, niezbędne jest sprawdzenie, czy zostały wybrane odpowiednie punkty w ramach szeregu dokonanych operacji złożeniowych. Celem walidacji poprawności złożenia, należy z górnej listwy dostępnych opcji programu, wybrać narzędzie *View Cut Manager*  oraz zaznaczyć poszczególne składowe w nawiązaniu do wygenerowania przekroju elementu, zgodnie z rys. 7.30, po czym należy poleceniem *Dismiss* zamknąć okno przekroju. Wykonanie przekroju stanowi niezbędny etap w odniesieniu do dalszych etapów analizy.




Rys. 7.30. Okno definiowania przekroju

Graficzna prezentacja złożeń została przedstawiona zarówno w przekroju oraz bez, na rys. 7.31. W przypadku, gdy zostały popełnione błędy w ramach złożeń, konieczna jest poprawa w definiowaniu zadeklarowanych rotacji oraz translacji, przy wykorzystaniu odpowiednich opcji.



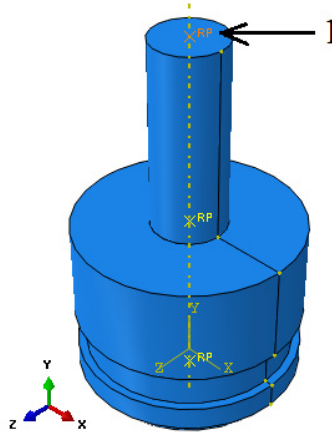
Rys. 7.31. Złożenie: a) model z przekrojem, b) model bez przekroju

## 7.5 Definicja analizy numerycznej – *moduł Step*


Analiza numeryczna zostanie przeprowadzona jako zagadnienie dynamiczne. Wybierając narzędzie *Create Step* , należy ustalić nazwę kroku obliczeniowego jako *Dynamika* i wybrać typ analizy jako *Dynamic, Explicit* oraz zatwierdzić wybór poleceniem *Continue*. W nowo otwartym oknie w pierwszej z zakładki *Basic*, należy nanieść wyłącznie wartość czasu trwania analizy numerycznej w polu *Time period: 38.92* oraz włączyć opcję *Nlgeom* na *ON*. Podana wartość jest wyrażona w sekundach. Ze względu na długi okres oczekiwania towarzyszący skomplikowanym obliczeniom dynamicznym, czas analizy jest możliwie najkrótszy oraz wcześniejsze złożenie uwzględnia od razu styk elementu *Stempel* z elementem *Plytka\_047*. W trzeciej z zakładki *Mass scaling*, konieczne jest użycie opcji *Use scaling definitions below* oraz wybranie w dolnej części otwartego okna roboczego polecenia *Create*. W okienku *Scale by factor*, należy nanieść wartość *100000000* oraz zatwierdzić opcją *OK*. Okno związane z określaniem procesu dynamicznego również powinno być zaakceptowane poleceniem *OK*.


Zgodnie z zasadą przyspieszenia procesu obliczeniowego związanego ze skalowaniem masy obiektów poddanych procesom dynamicznym, naniesiona wartość skalowania ma wpływ na przebieg samej analizy i otrzymany wynik powinien zostać dokładnie przeanalizowany. W przypadku wykorzystywania w obliczeniach procesu skalowania masy, przyspieszy znacząco realizacja obliczeń. Skalowanie masy, często wiąże się z występowaniem niepożądanych błędów numerycznych, jednak przy niewielkim współczynniku skalowania, błędy symulacyjne są często niezauważalne. Z uwagi na fakt, iż w prezentowanym przykładzie został zdefiniowany bardzo wysoki współczynnik skalowania masy, uzyskany rezultat badawczy może być obarczony wystąpieniem błędów w ramach obliczeń numerycznych (przykładem może być wystąpienie niepożądanego postaci deformacji tłoczony próbki).

Dodatkowo w bieżącym module, konieczne jest utworzenie punktu pomiarowego, w odniesieniu, do którego będą zbierane wyniki siły potrzebnej do przetłoczenia próbki od zachodzącego przemieszczenia elementu *Stempel*. Celem utworzenia omawianego punktu pomiarowego, niezbędne jest wybranie zakładki *Tools/Set/Create*. W nowo otwartym oknie należy zdefiniować nazwę *Pomiar*, wybrać typ *Geometry* oraz wybrać polecenie *Continue*. Następnym krokiem jest wskazanie punktu referencyjnego *RP* znajdującego się w górnej części elementu *Stempel*, zgodnie z rys. 7.32.





Rys. 7.32. Wybór odpowiedniego punktu *RP* celem utworzenia punktu pomiarowego

Wybór omawianego punktu należy finalnie zatwierdzić poleceniem *Done*. W opisany sposób został zdefiniowany punkt pomiarowy. Następny krok dotyczy przypisania do utworzonego punktu pomiarowego, odpowiednich właściwości, związanych ze zbieraniem pożądaných wyników. W tym celu należy przejść do opcji *Field Output Manager* . W dolnej części nowo otwartego okna, niezbędne jest wybranie polecenia *Create*, po czym należy zdefiniować nazwę na *Pomiar* i wybrać finalnie polecenie *Continue*. W oknie związanym z wyprowadzaniem wyników, z górnej podopcji *Domain*, niezbędne jest wybranie opcji *Set*, a także z prawej rozwijalnej listy utworzonego punktu pomiarowego o nazwie *Pomiar* oraz w polu *Interval* naniesienie wartości *100*. Z poniższej listy możliwych do wyprowadzenia wyników w ramach *Output Variables*, należy rozwinąć wyniki dotyczące przemieszczeń *Displacement/Velocity/Acceleration*, po czym dokonać wyboru wyłącznie pierwszej z dostępnych podopcji wyników *U, Translations and rotations*. Następnie, po zwinięciu sekcji wyników *Displacement/Velocity/Acceleration* niezbędne jest rozwinięcie sekcji z wynikami dotyczącymi reakcji *Forces/Reactions* oraz analogiczny wybór pierwszej z dostępnych opcji *RF, Reactions forces and moments*. Po finalnym zwinięciu sekcji dotyczącej reakcji, należy opuścić bieżące okno opcji wyprowadzania wyników poleceniem *OK*, znajdującym się w jego dolnej części.

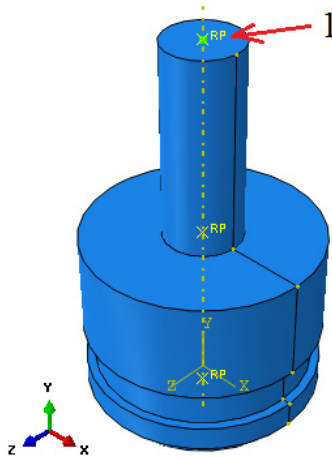
W ramach stale otwartego okna *Field Output Manager* , została utworzona dodatkowa druga sekcja o nazwie *Pomiar*, związana z wyprowadzeniem wyników dotyczących utworzonego punktu pomiarowego o nazwie jednakowej jak definiowana sekcja. Opisana procedura umożliwi wyprowadzenie wyników sił i przemieszczeń dla nowo zdefiniowanego punktu pomiarowego. Proces ten pozwoli na wygenerowanie wykresu obciążenia (niezbędnego do przetłoczenia próbki) od przemieszczenia elementu *Stempel* w ramach tłoczenia.

## 7.6 Interakcje modelu numerycznego – moduł *Interaction*

W module związanym z interakcjami należy początkowo ustalić typ kontaktu oraz miejsca współpracy podzespołów, wchodzących w skład całego modelu. W tym celu niezbędne jest wstępne zdefiniowanie rodzaju kontaktu, jaki ma występować na powierzchniach styku elementów. Należy wybrać polecenie *Create Interaction Property* , nazwę zdefiniować jako *Kontakt* oraz wybrać typ współpracy powierzchni z listy o nazwie *Contact* i zatwierdzić wybór przyciskiem *Continue*. W nowo otwartym oknie niezbędne jest określenie cech wybranego kontaktu. Należy, zatem wybrać początkowo zakładkę *Mechanical/Tangential Behavior*, zaznaczyć opcję *Penalty*, uwzględnić współczynnik tarcia w dolnej części okna, oznaczony jako *Friction Coeff* oraz nanieść wartość *0.15*. Kolejno w zakładce *Mechanical/Normal Behavior* powinna zostać wybrana opcja „*Hard*” *Contact* oraz *Default* w odpowiednich oknach wyboru, z faktu uwzględnienia niezbędnego rodzaju kontaktu na powierzchniach normalnych współpracujących podzespołów. Dodatkowo zaznaczenie opcji *Allow separation after contact* spowoduje ciągłą współpracę elementów skończonych, związanych w wykonaną wytłoczką względem wszelkich podzespołów podlegających kontaktowi z przetłaczanym elementem. Wszelkie wybory zatwierdzić należy opcją *OK*.

Następnym zagadnieniem do zdefiniowania będzie określenie miejsca współpracy zaprojektowanych podzespołów kompletnego modelu. Należy początkowo wybrać opcję *Create Interaction* , zdefiniować nazwę jako *Kontakt*, z informacji *Step* wybrać z rozwinięcia utworzony krok obliczeniowy o nazwie *Initial* i typ kontaktu *General contact (Explicit)* oraz zatwierdzić wszystkie wybory poleceniem *Continue*. W nowo otwartym oknie należy bez zmian pozostawić typ kontaktu jako *All\* with self*, przy czym w dolnej części okna roboczego z właściwości kontaktowych *Contact properties*, konieczny jest wybór w podopcji *Global property assignment*, wcześniej utworzonej relacji o nazwie *Kontakt*. Wszelkie operacje należy zatwierdzić poleceniem *OK*.

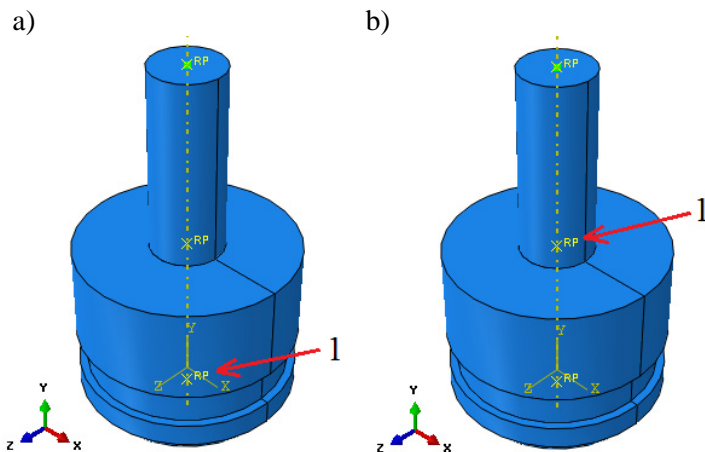
Dodatkowo w ramach modułu *Interaction* niezbędne jest określenie ciężaru własnego oddziałujących obiektów względem siebie. Z uwagi na fakt, iż ciężar przypisywany jest wyłącznie do elementów nieodkształcalnych, element *Plytka\_047* nie będzie uwzględniany w tym procesie. Celem zdefiniowania masy poszczególnych elementów nieodkształcalnych, konieczność stanowi skorzystanie z zakładki *Special/Inertia/Create*. W nowo otwartym oknie należy zdefiniować nazwę pierwszego elementu jako *Stempel* i wybrać podopcję *Point mass/inertia* oraz wybór zatwierdzić poleceniem *Continue*. Następny etap stanowi wybór odpowiedniego punktu *RP* zgodnie z rys. 7.33.



**Rys. 7.33.** Wybór odpowiedniego punktu *RP* celem przypisania masy obiektu *Stempel*

Po wyborze omawianego punktu, niezbędne jest skorzystanie z polecenia *Done*. W nowo otwartym oknie w ramach opcji *Mass Isotropic*, należy nanieść wartość *0.00042* oraz zatwierdzić poleceniem *OK*. Podana masa obiektu została odpowiednio przeliczona z wartości *0.42* [kg] na *0.00042* [t].


Analogicznie należy zachować się względem przypisania masy do odpowiednich punktów *RP* zgodnych z rys. 7.34 w przypadku pozostałych dwóch elementów *Matryca* i *Prowadnica*. W odniesieniu do elementu *Matryca*, masa wynosi *0.001* [t] zaś elementu *Prowadnica* dokładnie *0.00075* [t].

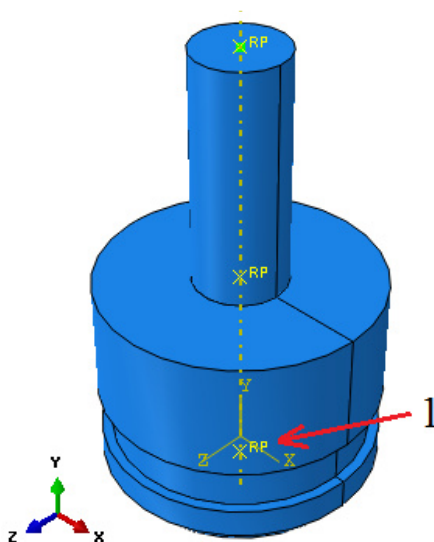


**Rys. 7.34.** Wybór odpowiedniego punktu *RP* celem przypisania masy:  
a) elementu *Matryca*, b) elementu *Prowadnica*

## 7.7 Definicja warunków brzegowych – moduł Load

Warunki brzegowe modelu numerycznego stanowią określenie odpowiedniego utwierdzenia elementu o nazwie *Matryca* i *Prowadnica* oraz ustalenie prędkości, z jaką poruszać się powinien element o nazwie *Stempel*.


Definicję warunków brzegowych należy rozpocząć od utwierdzenia podzespołu *Matryca*. W tym celu konieczny jest wybór opcji *Create Boundary Condition* , nadając nazwę *Utwierdzenie\_Matryca*, w kroku analizy *Step: Initial*, jednocześnie wybierając metodę definicji warunków brzegowych *Displacement/Rotation*. Po zatwierdzeniu ustawień poleceniem *Continue*, należy zaznaczyć i zatwierdzić poleceniem *Done*, punkt referencyjny *RP* przypisany do obiektu *Matryca*, zgodnie z rys. 7.35.



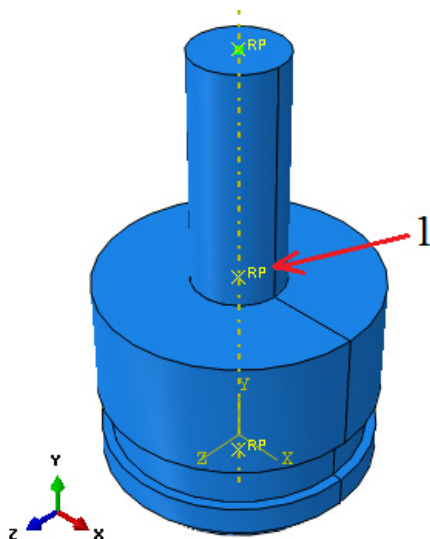
Rys. 7.35. Wybór odpowiedniego punktu *RP* celem utwierdzenia elementu *Matryca*

Następnie konieczne jest zablokowanie wszystkich sześciu stopni swobody, po czym akceptacji wyboru dokonuje się opcją *OK*.

Kolejny etap stanowi określenie warunku brzegowego w odniesieniu do elementu *Prowadnica*. Ze względu na pełnioną funkcję elementu, jaką stanowi zapewnienie dobrego prowadzenia elementu *Stempel*, warunki brzegowe są związane z zablokowaniem przeważającej ilości stopni swobody elementu.

Definicję warunków brzegowych należy rozpocząć od utwierdzenia podzespołu *Prowadnica*. W tym celu konieczny jest ponowny wybór opcji *Create Boundary Condition* , nadając nazwę *Utwierdzenie\_Prowadnica*, w kroku analizy *Step: Initial*, jednocześnie wybierając metodę definicji warunków


brzegowych *Displacement/Rotation*. Po zatwierdzeniu ustawień poleceniem *Continue*, należy zaznaczyć i zatwierdzić poleceniem *Done*, punkt referencyjny *RP* przypisany do obiektu *Prowadnica*, zgodnie z rys. 7.36.



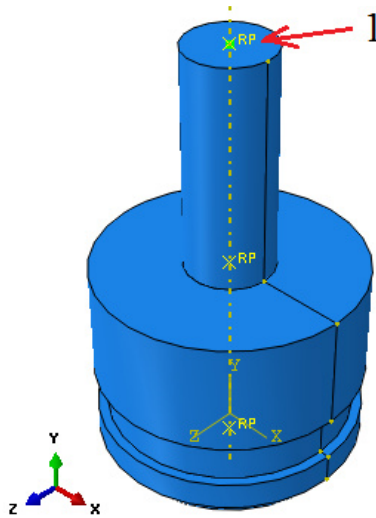
**Rys. 7.36.** Wybór odpowiedniego punktu *RP* celem utwierdzenia elementu *Prowadnica*

Następnie konieczne jest zablokowanie pięciu stopni swobody ( $U1$ ,  $U3$ ,  $UR1$ ,  $UR2$ ,  $UR3$ ), poza jednym dotyczącym możliwości przemieszczania się względem osi  $Y$ , oznaczonym jako  $U2$ . Finalny krok definicji warunku brzegowego stanowi dokonanie akceptacji wyboru stopni swobody opcją *OK*.

Ostatni etap definicji warunków brzegowych stanowi określenie prędkości tłoczenia w odniesieniu do elementu *Stempel*. Ze względu na pełnioną funkcję elementu *Stempel*, jaką stanowi proces tłoczenia związany z elementem *Plytka\_047*, warunki brzegowe są związane z określeniem stopni swobody, dotyczących prędkości elementu.

Definicję warunków brzegowych należy rozpocząć od zadeklarowania odpowiedniego typu relacji prędkości w ramach podzespołu *Stempel*. W tym celu konieczny jest ponowny wybór opcji *Create Boundary Condition* , nadając nazwę *Prędkosc\_Stempel*, w kroku analizy *Step: Dynamika*, jednocześnie wybierając metodę definicji warunków brzegowych *Velocity/Angular velocity*. Po zatwierdzeniu ustawień poleceniem *Continue*, należy zaznaczyć i zatwierdzić poleceniem *Done*, punkt referencyjny *RP* przypisany do obiektu *Stempel*, zgodnie z rys. 7.37.






Rys. 7.37. Wybór odpowiedniego punktu *RP* celem zdefiniowania prędkości elementu *Stempel*


Następnie konieczne jest zablokowanie pięciu stopni swobody ( $V1$ ,  $V3$ ,  $VR1$ ,  $VR2$ ,  $VR3$ ), poza jednym dotyczącym możliwości przemieszczania się względem osi  $Y$ , oznaczonym jako  $V2$ , w ramach którego należy zdefiniować prędkość przemieszczenia się elementu *Stempel*. Po zablokowaniu omawianych stopni swobody i wybraniu stopnia swobody oznaczonego  $V2$  należy nanieść ujemną wartość  $-1.67$  [mm/s]. Finalny etap definicji warunku brzegowego stanowi dokonanie akceptacji wyboru stopni swobody opcją *OK*.


W opisany powyżej sposób, zostały zdefiniowane wszelkie niezbędne relacje, w ramach warunków brzegowych, pozwalające na realizację procesu tłoczenia. W przypadku elementu *Plytka\_047* nie ma konieczności definiowania warunków brzegowych, ze względu na swobodne obsadzenie próbki badawczej w elemencie *Matryca*, w ramach istniejącego kontaktu między obydwoma elementami. Ze względu na fakt, iż definicja warunków brzegowych dotyczyła wyłącznie elementów nieodkształcalnych, warunki zdefiniowano wyłącznie w odniesieniu do punktów referencyjnych *RP*, związanych z danymi podzespołami.

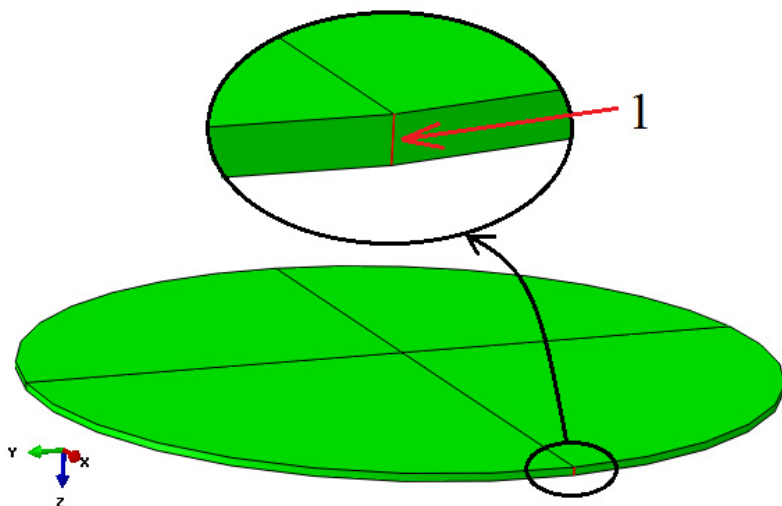
## 7.8 Budowa siatki elementów skończonych – *moduł Mesh*

Proces dyskretyzacji w ramach bieżącego modułu odbędzie się kilku etapowo. Po przełączeniu wyświetlania *Object: Part: Plytka\_047*, będzie możliwe rozpoczęcie procesu przypisywania siatki elementów skończonych. Początkowo celem określenia typu i parametrów siatki elementów skończonych, należy

wykorzystując narzędzie *Assign Mesh Controls*  zaznaczyć cały element *Plytka\_047* oraz zatwierdzając poleceniem *Done* ustawić parametry siatki na *Hex/Structured* oraz zatwierdzić całość poleceniem *OK*.


Wykorzystując narzędzie *Seed Part* , należy ustalić globalną gęstość siatki dyskretyzowanej części w poleceniu *Approximate global size* na wartość 2 i zatwierdzić kolejno poleceniem *OK*.


Następny etap stanowi zdefiniowanie minimalnej gęstości siatki po grubości elementu. W tym celu należy użyć opcji *Seed Edges* . Po wybraniu opisanej opcji, niezbędne jest zaznaczenie odpowiedniej pionowej krawędzi, stanowiącej jednocześnie grubość elementu zgodnie z rys. 7.38 oraz zatwierdzenie wyboru poleceniem *Done*.

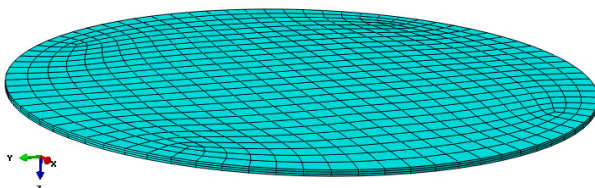


Rys. 7.38. Wybór odpowiedniej krawędzi elementu *Plytka\_047*

W nowo otwartym oknie, konieczność stanowi zdefiniowanie ilości elementów skończonych po grubości podzespołu (celem uwzględnienia procesu zginania). W zakładce *Basic*, w sekcji *Method* należy wybrać typ metody podziału oznaczony jako *By number*. W ramach opcji *Sizing Controls*, liczbę elementów po grubości *Number of elements*, należy zdefiniować na 3 oraz użyć polecenia *OK* zatwierdzającego dotychczasowe ustawienia.


Kolejny krok stanowi ustalenie rodzaju elementu skończonego zastosowanego w dyskretyzacji modelu *Plytka\_047*. Używając opcji *Assign Element Type* , konieczność stanowi zaznaczenie całego obiektu oraz zatwierdzenie poleceniem *Done*, po czym należy dokonać następujących wyborów w ramach dostępnych opcji *Element Library*: *Explicit*, *Geometric Order*: *Linear*, typ *Family*: *3D Stress*. Akceptacji dokonanych zmian należy dokonać za pomocą polecenia *OK*.


Ostatni etap związany z elementem *Plytka\_047*, stanowi przypisanie zdefiniowanej siatki. W tym celu wykorzystując narzędzie *Mesh Part*  i zatwierdzając wybór polecenia opcją dostępną w dolnej części okna roboczego *Yes*, nastąpi przypisanie siatki elementów skończonych na cały element *Plytka\_047*. Opisywany element po procesie dyskretyzacji będzie prezentował się zgodnie z rys. 7.39.





Rys. 7.39. Model dyskretny elementu *Plytka\_047*

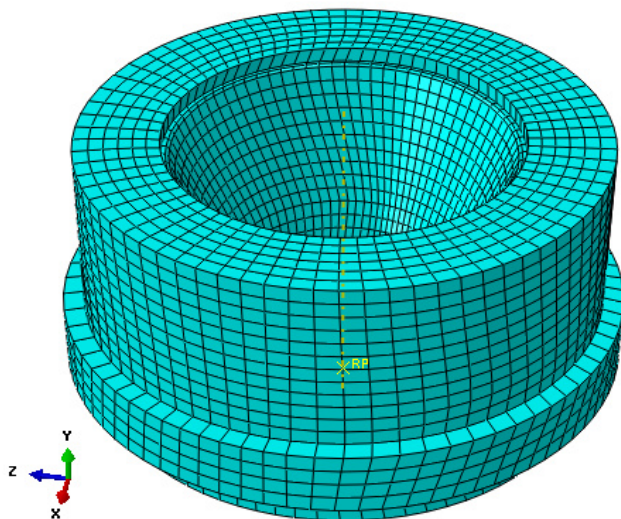
W dalszej części niezbędne jest prowadzenie procesu dyskretyzacji w odniesieniu do nieodkształcalnych elementów. Po przełączeniu wyświetlania *Object: Part: Matryca*, będzie możliwe rozpoczęcie procesu przypisywania siatki elementów skończonych, na kolejny podzespół.

Początkowo celem określenia typu i parametrów siatki elementów skończonych, należy wykorzystując narzędzie *Assign Mesh Controls*  zaznaczyć cały element *Matryca* oraz zatwierdzając poleceniem *Done* ustawić parametry siatki na *Quad/Free* z algorytmem jej tworzenia względem osi centralnej modelu *Medial axis* oraz użyć polecenia *OK*.

Wykorzystując narzędzie *Seed Part* , należy ustalić globalną gęstość siatki dyskretyzowanej części w poleceniu *Approximate global size* na wartość 2 i zatwierdzić kolejno poleceniem *OK*. Kolejny krok stanowi ustalenie rodzaju elementu skończonego zastosowanego w dyskretyzacji modelu *Matryca*.

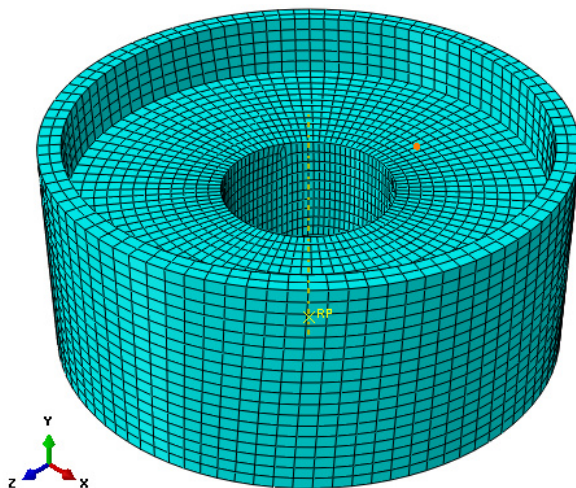
Używając narzędzia *Assign Element Type* , konieczność stanowi zaznaczenie całego obiektu oraz zatwierdzenie poleceniem *Done*, po czym należy dokonać następujących wyborów w ramach dostępnych opcji *Element Library*: *Explicit*, *Geometric Order: Linear*, typ *Family: Discrete Rigid Element*. Akceptacji dokonanych zmian należy dokonać za pomocą polecenia *OK*.

Ostatni etap związany z elementem *Matryca*, stanowi przypisanie zdefiniowanej siatki. W tym celu wykorzystując narzędzie *Mesh Part*  i zatwierdzając wybór polecenia opcją dostępną w dolnej części okna roboczego *Yes*, nastąpi przypisanie siatki elementów skończonych na cały element *Matryca*. Opisywany element tuż po procesie dyskretyzacji będzie prezentował się zgodnie z rys. 7.40.




Rys. 7.40. Model dyskretny elementu *Matryca*

W dalszej części niezbędne jest prowadzenie procesu dyskretyzacji w odniesieniu do dwóch pozostałych nieodkształcalnych elementów. Po przełączeniu wyświetlania *Object: Part: Prowadnica*, należy w sposób analogiczny do procesu dyskretyzacji podzespołu *Matryca*, definiować siatkę elementów skończonych, celem uzyskania rezultatu zgodnego z rys. 7.41.

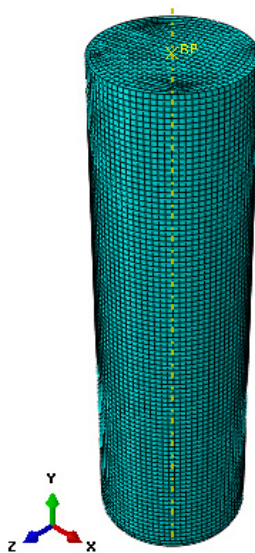


Rys. 7.41. Model dyskretny elementu *Prowadnica*

W ostatnim etapie niezbędne jest przeprowadzenie procesu dyskretyzacji w odniesieniu do ostatniego nieodkształcalnego elementu. Po przełączeniu wyświetlania *Object: Part: Stempel*, należy w sposób analogiczny do procesu dyskretyzacji podzespołu *Matryca*, zdefiniować siatkę elementów skończonych, celem uzyskania rezultatu zgodnego z rys. 7.42. Jedynie należy uwzględnić różnicę w przypisywaniu siatki, względem poprzednich elementów, polegającą na deklaracji innego poziomu globalnej gęstości siatki.

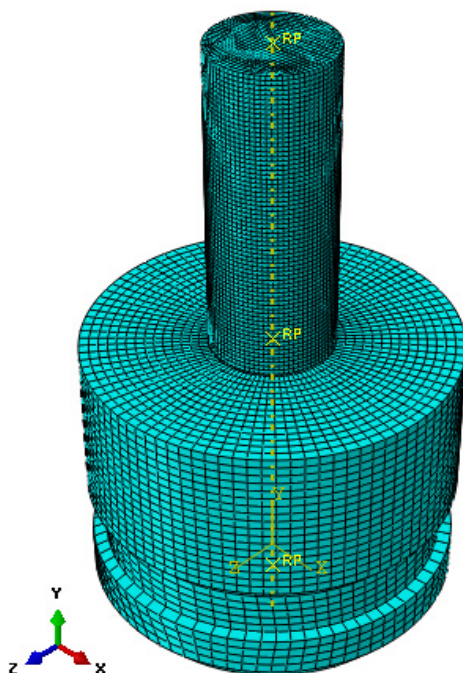
W odniesieniu do opcji *Seed Part* , należy ustalić globalną gęstość siatki dyskretyzowanej części w poleceniu *Approximate global size* na wartość *1* i zatwierdzić kolejno poleceniem *OK*.

Przebieg przypisywania siatki elementów skończonych, w oparciu o pozostałe narzędzia służące dyskretyzacji, pozostaje bez jakichkolwiek zmian, względem obydwu poprzednich elementów nieodkształcalnych.




Rys. 7.42. Model dyskretny elementu *Stempel*


W ramach modułu *Mesh*, możliwe jest dodatkowo przedstawienie graficznej prezentacji całego modelu numerycznego, z przypisaną siatką elementów skończonych po przełączeniu bieżącego poziomu wyświetlania w odniesieniu do opcji *Object: Assembly*. Wizualizacja modelu numerycznego po pełnej dyskretyzacji jest zgodna z rys. 7.43.



Rys. 7.43. Model dyskretny całego złozenia

## 7.9 Wykonanie obliczeń numerycznych – moduł Job

W celu przygotowania zadania obliczeniowego należy wykorzystując narzędzie *Create Job* , nadać nazwę zadania *Name: Proces\_tloczenia*, zatwierdzić poleceniem *Continue*. W przypadku możliwości równoległego wykorzystania w procesie obliczeń numerycznych większej liczby rdzeni procesora, można w zakładce *Parallelization* wybrać opcję *Use multiple processors* wpisując odpowiednią liczbę rdzeni (np. 2 lub 4). Następnie należy zatwierdzić zadanie obliczeniowe z ustawieniami domyślnymi poleceniem *OK*.

Obliczenia numeryczne należy uruchomić wykorzystując narzędzie *Job Manager* , poprzez wybranie polecenia *Submit*. Przebieg procesu obliczeń numerycznych można obserwować poprzez włączenie polecenia *Monitor*.

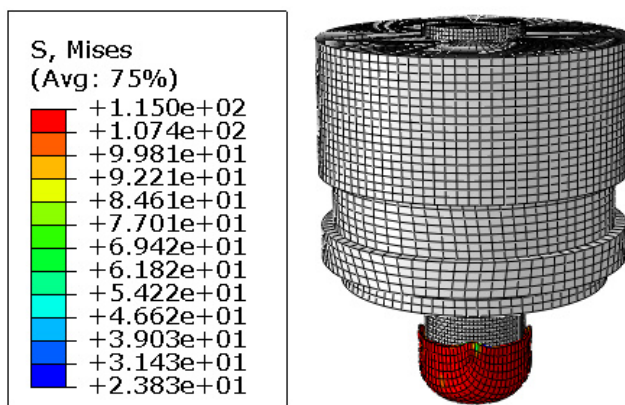
Zakończenie procesu obliczeń numerycznych zostanie zasygnalizowane odpowiednim komunikatem w oknie dialogowym *Monitor* oraz przez osiągnięcie w zakładce *Total Time* wartości zgodnej w parametrem czasu analizy zdefiniowanym w ramach ustalonych kroków obliczeniowych 38.92. Po zakończeniu procesu obliczeń w celu prezentacji wyników należy włączyć polecenie *Results*.

## 7.10 Wyniki obliczeń numerycznych – *moduł Visualization*


Analiza otrzymanych wyników przeprowadzona zostanie w głównej mierze na podstawie wizualizacji odkształceń plastycznych elementu *Plytka\_047* oraz rozkładów naprężeń zredukowanych z uwzględnieniem postępujących zjawisk dynamicznych, zgodnie z hipotezą wytrzymałościową Hubera-Misesa-Hencky'ego (H-M-H). Wizualizację rozkładów naprężenia zredukowanego H-M-H przy jednoczesnym wystąpieniu postępującego procesu dynamiki otrzymamy aktywując narzędzie *Plot Contours on Deformed Shape* – w ramach, czego opcjonalnie zostanie wyświetlony poziom naprężeń. Zwiększenie czcionki wyświetlanych wartości liczbowych można uzyskać wykorzystując narzędzie z górnego menu programu *Viewport/Viewport Annotation Options*. W tym celu należy w nowo otwartym oknie dialogowym w zakładce *Legend* zaznaczyć polecenie *Set Font*, po czym podopcję *Size*, zmieniając rozmiar czcionki wyświetlanej na ekranie – zmianę należy zatwierdzić poleceniem *OK*.

W celu obserwacji zachowania się modelu krok po kroku w trakcie procesu dynamicznego należy posługiwać się przewijaniem klatek animacji przy użyciu opcji *Previous* lub *Next* ◀ ▶, znajdujących się nad oknem roboczym programu. Wyświetlane wartości naprężenia zredukowanego podawane są w tym przypadku w [MPa], co wynika bezpośrednio z jednostek wprowadzanych w trakcie przygotowania modelu numerycznego.

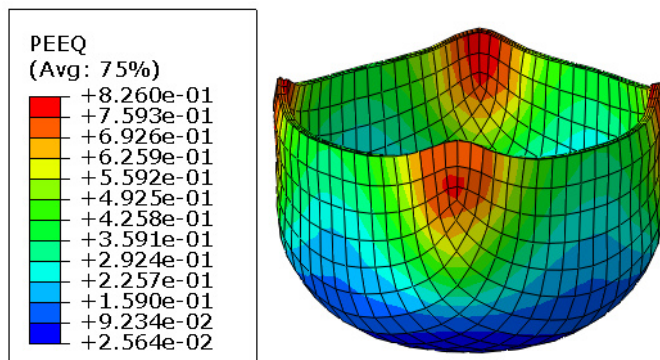
Ogólną mapę naprężenia zredukowanego w modelu numerycznym, w odniesieniu do ostatniego kroku obliczeniowego – wykonanie wytłoczki, przedstawiono na rys. 7.44. Maksymalne wartości naprężeń osiągają poziom 115 MPa (+1.15e+02 oznacza  $1.15 \times 10^2 = 115$ ).







Rys. 7.44. Wynik rozkładu naprężeń

Wybierając opcję *Create Display Group* , możliwa będzie wizualizacja wyników wyłącznie w odniesieniu do przetłoczonego elementu. W nowo otwartym oknie, niezbędny jest wybór sekcji *Part instances*, z prawej części okna zaznaczenie elementu *Plytka\_047* oraz użycie polecenia *Replace* w dolnej części bieżącego okna roboczego. Ostatecznie należy zatwierdzić powyżej opisane wybory i opuścić dotychczas wyświetlane okno poleceniem *Dismiss*.

Następny etap stanowi wyświetlenie wyników związanych z odkształceniami plastycznymi elementu *Plytka\_047*. W tym celu niezbędna jest zmiana dotychczasowej opcji wyświetlania wyników, z górnej listwy programu oznaczona jako *S* na opcję *PEEQ* – określającą ekwiwalentny (równoważny) stan odkształceń plastycznych, jaki towarzyszy naprężeniom (*S – Mises'a*). Wartość odkształceń plastycznych należy odczytywać jako procentowy poziom odkształceń względem stanu początkowego, zatem dla przykładu otrzymany maksymalny wynik  $8.26e-01$  oznacza  $8.26 \times 10^{-1}$ , czyli  $0.826$ . Z uwagi na procentowy stopień odkształcenia otrzymany wynik należy przemnożyć przez wartość  $100$ , na podstawie, czego zostanie odpowiednio oszacowany procentowy poziom odkształcenia maksymalnego wynoszący  $0.826 \times 100 = 82.6\%$ . Graficzna prezentacja mapy odkształceń plastycznych jest zgodna z rys. 7.45.



Rys. 7.45. Wynik mapy odkształceń plastycznych




Przy użyciu opcji *Replace All* , nastąpi wyświetlenie wszelkich wcześniej ukrytych elementów w ramach bieżącego modułu. Przedstawienie procesu tłoczenia należy rozpocząć od przewinięcia symulacji do stanu początkowego, w odniesieniu do czego niezbędne jest użycie narzędzia *First*  (z górnej listwy okna wizualizacji wyników), pozwalającego na wyświetlenie modelu przed tłoczeniem. Celem możliwości wyświetlenia przebiegu procesu tłoczenia krok po kroku, przy jednoczesnej obserwacji modelu w przekroju, konieczne będzie skorzystanie z opcji *View Cut Manager* , tuż przy opcji *Active/Deactive View Cut* . W nowo otwartym oknie, należy wybrać poszczególne opcje

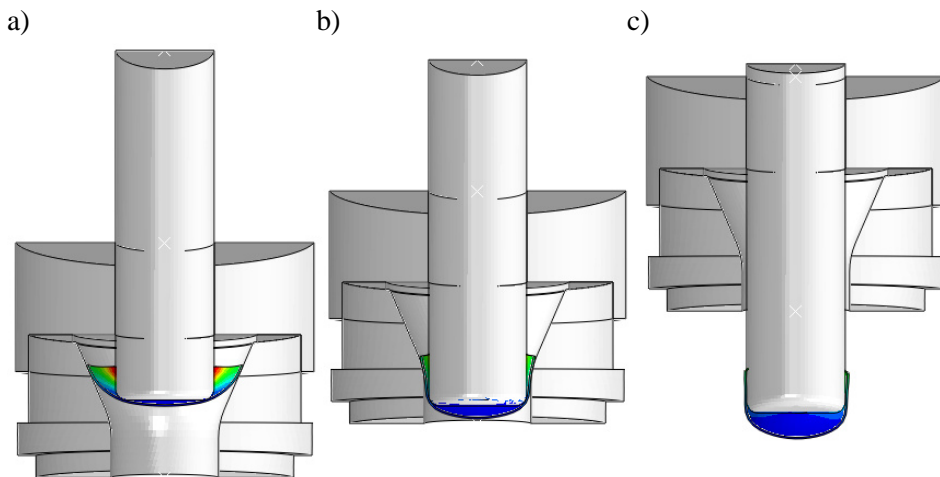


wyświetlania przekroju, zgodnie z rys. 7.46, po czym należy poleceniem *Dismiss* zamknąć okno przekroju.

Show	Name	Model			
<input checked="" type="checkbox"/>	X-Plane	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	Y-Plane	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	Z-Plane	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>


Rys. 7.46. Okno definiowania przekroju


Dodatkowo konieczne jest wybranie opcji *Apply Right View* , z górnej listwy programu, za pomocą, której będzie najefektywniej przedstawiony rzut przekroju. Przy użyciu narzędzia *Common Options* , oraz wybraniu w sekcji *Visible Edges* podopcji *Feature edges* i zatwierdzeniu wyboru poleceniem *OK*, zostaną wyłączone krawędzie siatki elementów skończonych. Następnie w ramach użycia opcji przewijania klatki po klatce procesu tłoczenia oznaczonej jako *Next* , przedstawiono graficzną prezentację postępującego procesu tłoczenia, zgodnie z rys. 7.47.



Rys. 7.47. Graficzna prezentacja procesu tłoczenia:  
a) 25 klatka symulacji, b) 50 klatka symulacji, c) ostatnia klatka symulacji

Widoczny efekt pogłębiającego się „pęcherza powietrza” pomiędzy elementem *Stempel* i *Płytką\_047* podczas procesu tłoczenia, stanowi błąd numeryczny, wynikający z opisywanego w module *Step*, skalowania masy. Zastosowany proces skalowania masy, umożliwił znaczące przyspieszenie czasu obliczeń, przy jednoczesnym obciążeniu modelu numerycznego niepożądanymi błędami obliczeniowymi. Poprawny przebieg procesu tłoczenia, możliwy jest do uzyskania wyłącznie przy zastosowaniu stosunkowo niewielkiego współczynnika skalowania masy.

Dodatkowo w odniesieniu do bieżącego modułu *Visualization*, możliwe jest przedstawienie charakterystyki pracy modelu w postaci wykresu siły tłoczenia od przemieszczenia elementu *Stempel*. Za pomocą narzędzia *Create XY Data* , następnie wyboru opcji *ODB field output* oraz zatwierdzenia wyboru poleceniem *Continue*, możliwe będzie określenie danych, niezbędnych do wygenerowania charakterystyki pracy układu. W nowo otwartym oknie, w ramach zakładki *Variables*, należy dokonać wyboru w podopcji *Position*, sekcji *Unique Nodal*. W odniesieniu do wybranej sekcji z dostępnej listy wyników, konieczne jest zaznaczenie parametru *RF2* jako reakcji oddziałującej zgodnie z osią *Y* (po rozwinięciu głównej sekcji wyników *RF*) oraz *U2*, stanowiącego przemieszczenie zgodne z osią *Y* (po rozwinięciu głównej sekcji wyników *U*). Następnie po przejściu do zakładki *Elements/Nodes* w ramach sekcji *Method*, niezbędne jest wybranie opcji *Node sets*. Z wyświetlonych po prawej stronie *Setów*, stanowiących punkty w ramach, których możliwe jest wyprowadzenie wyników, należy wybrać *Set* o nazwie *Pomiar* (który został utworzony w sekcji *Step*). Wszelkie dotychczasowe wybory należy zaakceptować poleceniem *Save*, a następnie opcją *OK*, celem dalszej możliwości wyprowadzenia pożądanej charakterystyki. Po wyprowadzeniu wyników w ramach utworzonego punktu pomiarowego, bieżące okno należy zamknąć poprzez opcję *Dismiss*.

Ponownie używając narzędzia *Create XY Data* , następnie dokonując wyboru opcji *Operate on XY data* oraz zatwierdzenia wyboru poleceniem *Continue*, możliwe będzie wyprowadzenie omawianej charakterystyki. W odniesieniu do nowo otwartego okna, w ramach sekcji umieszczonej z prawej strony o nazwie *Operators*, niezbędny jest początkowy wybór dostępnym suwakiem, funkcji o nazwie *combine(X,X)* – pozwalającej na wygenerowanie charakterystyki siły tłoczenia od przemieszczenia. Po zaznaczeniu wymienionej funkcji, w górnej części okna roboczego pojawi się użyte polecenie *combine*. Do istniejącej funkcji, należy dodać funkcję z dostępnej listy w prawej części okna o nazwie *abs(A)* – wyznaczającej wartość bezwzględną z określonych danych. Kolejny etap stanowi ponowne dodanie funkcji *abs(A)*, przy uwzględnieniu poprawnego miejsca wstawienia funkcji, w ramach generowanej zależności matematycznej. W tym celu należy dokonać zaznaczenia lewym klawiszem myszy, miejsca pomiędzy dwoma ostatnimi nawiasami w prawej części równania. Ponowne użycie funkcji *abs(A)*, spowoduje jej wstawienie w pożądane miejsce.

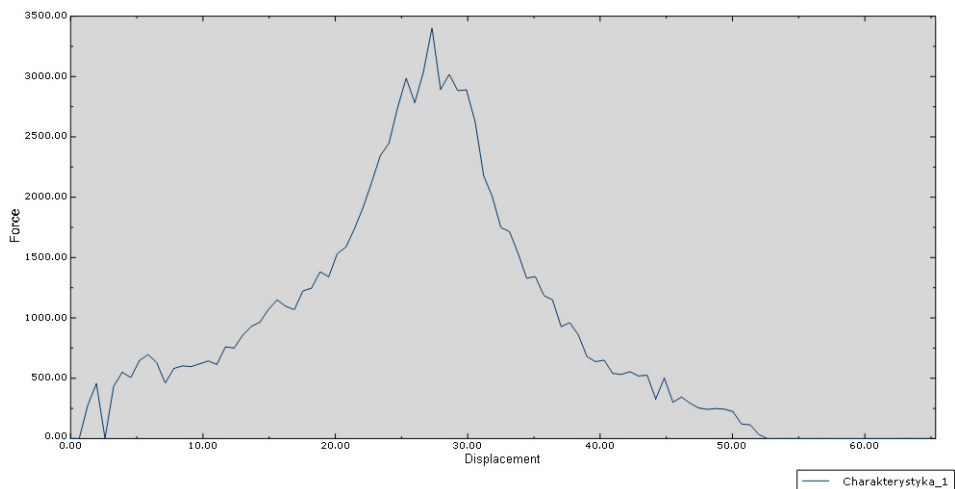
Pomiędzy jedną i drugą funkcją *abs*, należy wstawić przecinek, celem oddzielenia zależności funkcyjnych od siebie. Końcowy etap stanowi wstawienie do zależności, wyprowadzonych uprzednio wyników obliczeń. W tym celu należy uaktywnić kursor myszy, wewnątrz nawiasu pierwszej funkcji *abs* oraz dokonać wyboru wyników przemieszczeń o nazwie *U:U2* (poprzez dwukrotne użycie lewego klawisza myszy na danych wynikach). Poprzez analogiczność zachowania należy uwzględnić wyniki *RF:RF2* w ramach drugiej funkcji *abs*. W opisany sposób została określona zależność funkcyjna, pozwalająca na wygenerowanie charakterystyki przemieszczeń od siły tłoczenia, w odniesieniu do elementu *Stempel*. Zależność matematyczna powinna być zgodna z rys. 7.48.

```
Enter an expression by typing and selecting XY Data and Operators below.
Example: maxEnvelope( "XYData-2", "XYData-4" ) * 2.5 + "XYData-5"
combine ( abs ( "U:U2 Pl: STEMPEL-1 N: 8690" ),abs ( "RF:RF2 Pl: STEMPEL-1 N: 8690" ) )
```

**Rys. 7.48.** Prezentacja zależności matematycznej

Przy użyciu polecenia *Save as* możliwe jest zapisanie otrzymanego wykresu, pod nazwą *Charakterystyka\_1*, zatwierdzając naniesioną nazwę opcją *OK*. Następnie należy zamknąć okno związane z generowaniem zależności matematycznej poleceniem *Cancel*. Po wybraniu narzędzia *XY Data Manager* oraz zaznaczeniu w nowo otwartym oknie nazwy *Charakterystyka\_1* i użyciu opcji *Plot*, nastąpi wygenerowanie pożądanej charakterystyki. Bieżące okno, należy zamknąć poleceniem *Dismiss*. Celem uwydatnienia prezentacji wykresu, należy skorzystać z zakładki *Option/XY Options/Axis*. W nowo otwartym oknie w ramach sekcji *X Axis*, z zaznaczoną opcją *Displacement*, konieczne jest wybranie dolnej zakładki *Axes* oraz w opcji *Format*, ustalenie typu jednostki na *Decimal*. Następnie po wybraniu opcji *Font*, należy zwiększyć czcionkę np. na wartość *10* i dokonać zatwierdzenia poleceniem *OK*. W sposób analogiczny należy zmienić typ wyświetlanej jednostki oraz wielkość czcionki dla sekcji *Y Axis* po wybraniu opcji *Force*. Po dokonaniu wszelkich zmian, niezbędne jest zamknięcie bieżącego okna poleceniem *Dismiss*.

Korzystając z zakładki *Option/XY Options/Chart Legend*, w nowo otwartym oknie przy użyciu polecenia *Font* i zwiększeniu czcionki legendy na wartość *12* oraz zatwierdzeniu wyboru poleceniem *OK*, możliwe będzie zwiększenie tekstu opisującego legendę. Ostatecznie bieżące okno należy zamknąć poleceniem *Dismiss*. Graficzna prezentacja otrzymanej charakterystyki po wszelkich modyfikacjach, jest zgodna z rys. 7.49.



**Rys. 7.49.** Charakterystyka przemieszczenia od siły tłoczenia

Uzyskany wykres, może różnić się nieznacznie od postaci przedstawionej na rys. 7.49, ze względu na zastosowany proces skalowania masy, co dotyczy również pozostałych dwóch przypadków. Otrzymana charakterystyka, przedstawia zależność, siły od przemieszczenia w ramach elementu *Stempel*. Z uwagi na czas obliczeń wynoszący 38.92 [s] oraz prędkość tłoczenia 1.67 [mm/s], droga wykonana przez element *Stempel*, wynosi w przybliżeniu 65 [mm]. W okolicy 27 [mm] przemieszczenia elementu tłoczącego, była wygenerowana największa siła, niezbędna do przetłoczenia próbki, wynosząca około 3400 [N].


Następny etap stanowi przeprowadzenie drugiej analizy numerycznej, związanej z modyfikacją aktualnego procesu tłoczenia, polegającą na zwiększeniu grubości próbki. Celem ustanowienia drugiego procesu tłoczenia, na podstawie pierwotnego niezbędne jest przejście do zakładki *Model* w ramach drzewa historii modelu, w lewej części programu, następnie wybranie prawym klawiszem myszy utworzonego modelu numerycznego *Model-1* oraz użycie dostępnej opcji *Copy Model*, przypisanie nazwy *Model-2* i dokonanie akceptacji poleceniem *OK*. W drzewie historii tworzenia modeli pojawi się nowo wygenerowany model o określonej nazwie. Po opuszczeniu modułu *Visualization* i wyborze modułu *Part*, należy sprawdzić czy w drzewie historii tworzenia modelu numerycznego, jest uaktywniony model o nazwie *Model-2* (w przypadku braku aktywności pracy, w ramach nowo utworzonego modelu, należy go wybrać poprzez dwukrotne wciśnięcie lewego klawisza myszy). O uaktywnieniu modelu świadczy podkreślenie pod jego nazwą.

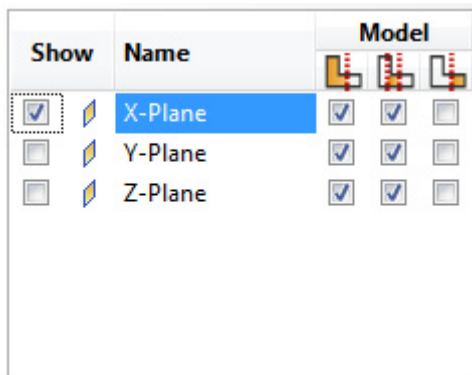
Kolejny etap stanowi dokonanie modyfikacji grubości próbki oraz zmiana nazwy elementu tłoczonego, w odniesieniu do modułu *Part*.

## 7.11 Modyfikacja modelu – *moduł Part i Assembly*


W związku z możliwością realizacji drugiego procesu numerycznego, należy dokonać modyfikacji zarówno nazwy jak i grubości elementu *Plytka\_047*. Początkowo z górnej części okna roboczego, należy w module *Part*, wybrać opcję wyświetlania pożądanego elementu poprzez *Part: Plytka\_047*. Następnie, konieczne jest korzystając z drzewa historii tworzenia modelu, rozwinięcie symbolem + modelu o nazwie *Model-2*, po czym rozwinięcie sekcji *Parts*, następnie elementu *Plytka\_047*, podopcji *Features* oraz dwukrotnie wybranie lewym klawiszem myszy *Solid extrude-1*. W nowo otwartym oknie niezbędna jest zmiana wartości *0.47* na *0.9* [mm] oraz przy aktywnej opcji *Regenerate on OK*, wybranie polecenia *OK*. Automatycznie nastąpi zwiększenie grubości elementu. Wybierając z drzewa historii tworzenia modelu prawym klawiszem myszy element o nazwie *Plytka\_047*, należy użyć opcji *Rename* i po zmianie nazwy na *Plytka\_09*, dokonać akceptacji poleceniem *OK*.

Następnie w ramach rozwinięcia z drzewa historii tworzenia modelu sekcji *Assembly* oraz sekcji *Instances*, należy wybrać dwukrotnie lewym klawiszem myszy element *Plytka\_047* (celem modyfikacji w złożeniu). Przy użyciu prawego klawisza myszy na zmodyfikowanym elemencie *Plytka\_047* oraz wybraniu polecenia *Rename*, zmianie nazwy na *Plytka\_09* i zatwierdzeniu opcja *OK*, nastąpi modyfikacja elementu w ramach złożenia.

Następny kluczowy etap stanowi modyfikacja całego złożenia modelu numerycznego. Wykonanie przekroju stanowi niezbędny etap w odniesieniu do dalszych etapów analizy. Użycie narzędzia *View Cut Manager*  oraz zaznaczenie poszczególnych składowych w ramach dokonania przekroju elementu, zgodnie z rys. 7.50, pozwoli na wykonanie niezbędnego przekroju. Okno opcji przekroju należy zamknąć poleceniem *Dismiss*.



Rys. 7.50. Okno definiowania przekroju


Z uwagi na modyfikację grubości elementu *Plytka\_09*, niezbędne jest dokonanie translacji dwóch podzespołów jednocześnie o wartość różnicy grubości aktualnej próbki względem pierwotnej. Różnica grubości próbki przed i po modyfikacji wynosi  $0.43$  [mm]. Początkowo w module *Assembly* konieczne jest użycie opcji *Translate Instance* , wybór elementu *Plytka\_09* i *Stempel* z wciśniętym klawiszem *Shift* oraz zatwierdzenie opcją *Done*. W dolnej części okna roboczego pojawi się komunikat *Select a start point for the translation vector*, który należy zatwierdzić klawiszem *Enter*. Następnie w ramach komunikatu *Select an end point for the translation vector*, należy w środkowej współrzędnej dotyczącej przemieszczenia po osi *Y*, nanieść wartość  $0.43$  zgodnie z rys. 7.51 oraz zatwierdzić klawiszem *Enter*. Finalnie, translację należy zatwierdzić poleceniem *OK* w dolnej części okna roboczego, po czym nastąpi odpowiednia modyfikacja złożenia modelu.

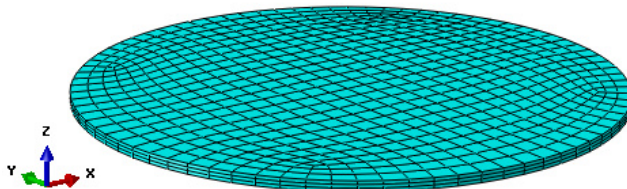
Select an end point for the translation vector--or enter X,Y,Z:

Rys. 7.51. Zdefiniowanie wartości translacji

Kolejny krok dotyczy przypisania siatki elementów skończonych, w przypadku zmodyfikowanego podzespołu. W tym celu należy przejść do modułu *Mesh* oraz dokonać modyfikacji.


## 7.12 Modyfikacja siatki MES – moduł *Mesh*


Po przełączeniu wyświetlania *Object: Part: Plytka\_09*, będzie możliwe rozpoczęcie procesu przypisywania siatki elementów skończonych. Wystarczy użyć narzędzia *Mesh Part* , i zatwierdzając wybór opcją dostępną w dolnej części okna roboczego *Yes*, nastąpi przypisanie siatki elementów skończonych na cały element *Plytka\_09*, zgodnie z rys. 7.52.



Rys. 7.52. Model dyskretny elementu *Plytka\_09*

## 7.13 Wykonanie obliczeń numerycznych – *moduł Job*

W celu przygotowania zadania obliczeniowego należy wykorzystując narzędzie *Create Job* , nadać nazwę zadania *Name: Proces\_tloczenia\_2*, wybrać model źródłowy do obliczeń *Model-2*, zatwierdzić wybór poleceniem *Continue*. W przypadku możliwości równoległego wykorzystania w procesie obliczeń numerycznych większej liczby rdzeni procesora, można w zakładce *Parallelization* wybrać opcję *Use multiple processors* wpisując odpowiednią liczbę rdzeni (np. 2 lub 4). Następnie należy zatwierdzić zadanie obliczeniowe z ustawieniami domyślnymi poleceniem *OK*.

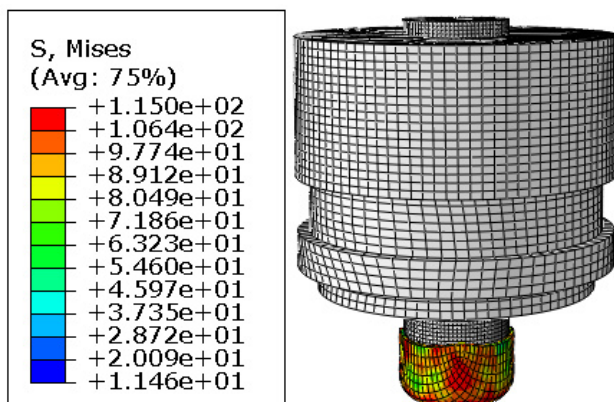
Obliczenia numeryczne należy uruchomić wykorzystując narzędzie *Job Manager* , poprzez wybranie polecenia *Submit* w ramach nowego zadania obliczeniowego. Przebieg procesu obliczeń numerycznych można obserwować poprzez włączenie polecenia *Monitor*.

Zakończenie procesu obliczeń numerycznych zostanie zasygnalizowane odpowiednim komunikatem w oknie dialogowym *Monitor* oraz przez osiągnięcie w zakładce *Total Time* wartości zgodnej w parametrem czasu analizy zdefiniowanym w ramach ustalonych kroków obliczeniowych 38.92. Po zakończeniu procesu obliczeń w celu prezentacji wyników należy włączyć polecenie *Results*.

## 7.14 Wyniki obliczeń numerycznych – *moduł Visualization*

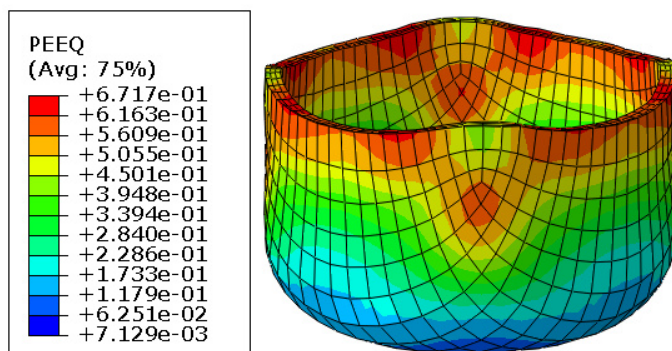
W ramach przeprowadzonych obliczeń numerycznych, należy w analogiczny sposób jak zostało opisane w rozdziale 7.10 przeprowadzić cały etap związany z edycją wyników numerycznych. Z uwagi na fakt, iż edycja wyników związana jest z modyfikacją grubości tłoczony próbki o nazwie *Plytka\_09*, konieczne jest wyświetlenie zarówno mapy naprężeń modelu numerycznego, odkształceń próbki, wizualizacji procesu tłoczenia oraz charakterystyki pracy próbki. Korzystając z informacji zawartych w rozdziale 7.10 należy przeprowadzić edycje bieżących wyników.

Początkowo zgodnie z kolejnością prezentacji wyników z poprzednich badań numerycznych zostanie przedstawiony wynik rozkładu naprężeń, dotyczący elementu *Plytka\_09* w końcowej fazie procesu tłoczenia próbki. Graficzna prezentacja wyniku poziomu naprężeń zredukowanych, została przedstawiona w formie mapy naprężeń zgodnie z rys. 7.53.



Rys. 7.53. Wynik rozkładu naprężeń

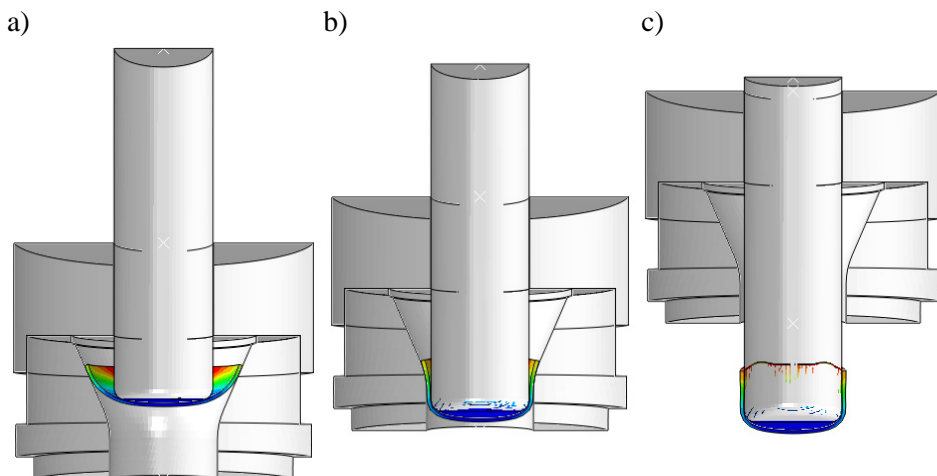
Następnie przedstawiono rezultat odkształceń plastycznych w odniesieniu do elementu *Plytka\_09*, zgodnie z rys. 7.54.



Rys. 7.54. Wynik mapy odkształceń plastycznych

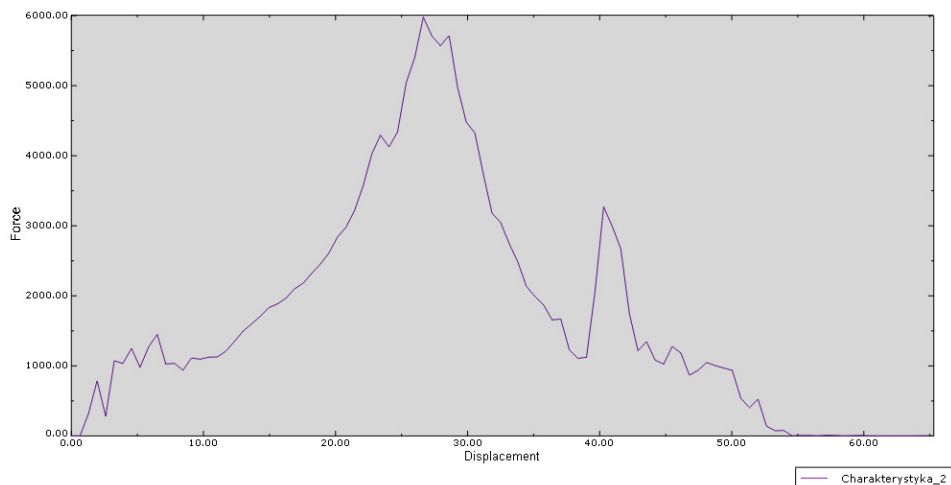
Kolejny krok stanowiło analogiczne podejście do przedstawienia procesu tłoczenia w kilku etapach. Początkowo została wygenerowana wizualizacja dotycząca początkowej fazy tłoczenia równoważnej dla 25 kroku symulacji numerycznej. Następnie przedstawiono rezultat analizy numerycznej w odniesieniu do 50 kroku symulacji. Ostatni etap tłoczenia, był związany jednocześnie z ostatnim krokiem symulacji. Graficzną prezentację procesu tłoczenia aluminiowej próbki przedstawiono zgodnie z rys. 7.55.





**Rys. 7.55.** Graficzna prezentacja procesu tłoczenia:  
 a) 25 klatka symulacji, b) 50 klatka symulacji, c) ostatnia klatka symulacji

Ostatni etap prezentacji wyników badań związany jest bezpośrednio z wygenerowaniem charakterystyki pracy elementu *Stempel*. Wstępnie w ramach opcji *XY Data Manager* należy zaznaczyć wszystkie wiersze dotyczące wyników z poprzedniego badania oraz je usunąć dostępną opcją *Delete*, oprócz nazwy *Charakterystyka\_1*. Dalsza analogia pracy zgodnie z rozdziałem 7.10 pozwoli na wyprowadzenie nowej charakterystyki zgodnie z rys. 7.56 (należy pamiętać o zdefiniowaniu innej nazwy np. *Charakterystyka\_2*).



**Rys. 7.56.** Charakterystyka przemieszczenia od siły tłoczenia

Otrzymana charakterystyka, przedstawia zależność, siły od przemieszczenia w ramach elementu *Stempel*. Z uwagi na czas obliczeń wynoszący 38.92 [s] oraz prędkość tłoczenia 1.67 [mm/s], droga wykonana przez element *Stempel*, wynosi w przybliżeniu 65 [mm]. W okolicy 27 [mm] przemieszczenia elementu tłoczącego, była wygenerowana największa siła, niezbędna do przetłoczenia próbki, wynosząca około 6000 [N].

Ostatni etap prowadzonych badań numerycznych stanowi przeprowadzenie trzeciej analizy, związanej z modyfikacją aktualnego procesu tłoczenia, polegającą na ostatnim zwiększeniu grubości próbki.

Celem ustanowienia trzeciego procesu tłoczenia, na podstawie drugiego niezbędne jest przejście do zakładki *Model* w ramach drzewa historii modelu, w lewej części programu, następnie wybranie prawym klawiszem myszy utworzonego modelu numerycznego *Model-2* oraz użycie dostępnej opcji *Copy Model*, przypisanie nazwy *Model-3* i dokonanie akceptacji poleceniem *OK*. W drzewie historii tworzenia modeli pojawi się nowo wygenerowany model o określonej nazwie. Po opuszczeniu modułu *Visualization* i wyborze modułu *Part*, należy sprawdzić czy w drzewie historii tworzenia modelu numerycznego, jest uaktywniony model o nazwie *Model-3* (w przypadku braku aktywności pracy, w ramach nowo utworzonego modelu, należy go wybrać poprzez dwukrotne wciśnięcie lewego klawisza myszy). O uaktywnieniu modelu świadczy podkreślenie pod jego nazwą.


Następny etap stanowi dokonanie ostatniej modyfikacji grubości próbki oraz zmiana nazwy elementu tłoczonego, w odniesieniu do modułu *Part*.

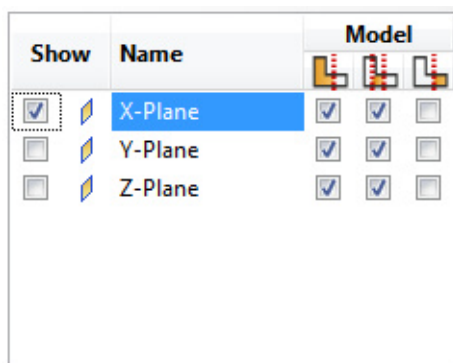
## 7.15 Modyfikacja modelu – moduł *Part i Assembly*

W związku z możliwością realizacji trzeciego procesu numerycznego, należy dokonać modyfikacji zarówno nazwy jak i grubości elementu *Plytka\_09*. Początkowo z górnej części okna roboczego, należy w module *Part*, wybrać opcję wyświetlania pożądanego elementu poprzez *Part: Plytka\_09*. Następnie, konieczne jest korzystając z drzewa historii tworzenia modelu, rozwinięcie symbolem + modelu o nazwie *Model-3*, po czym rozwinięcie sekcji *Parts*, następnie elementu *Plytka\_09*, podopcji *Features* oraz dwukrotnie wybranie lewym klawiszem myszy *Solid extrude-1*. W nowo otwartym oknie niezbędna jest zmiana wartości 0.9 na 1.44 [mm] oraz przy aktywnej opcji *Regenerate on OK*, wybranie polecenia *OK*. Automatycznie nastąpi zwiększenie grubości elementu. Wybierając z drzewa historii tworzenia modelu prawym klawiszem myszy element o nazwie *Plytka\_09*, należy użyć opcji *Rename* i po zmianie nazwy na *Plytka\_144*, dokonać akceptacji poleceniem *OK*.


Następnie w ramach rozwinięcia z drzewa historii tworzenia modelu sekcji *Assembly* oraz sekcji *Instances*, należy wybrać dwukrotnie lewym klawiszem

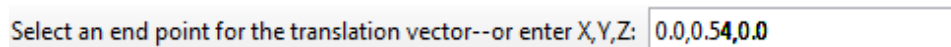
myszy element *Plytka\_09* (celem modyfikacji w złożeniu). Przy użyciu prawego klawisza myszy na zmodyfikowanym elemencie *Plytka\_09* oraz wybraniu polecenia *Rename*, zmianie nazwy na *Plytka\_144* i zatwierdzeniu opcja *OK*, nastąpi modyfikacja elementu w ramach złożenia.

Następny kluczowy etap stanowi modyfikacja całego złożenia modelu numerycznego. Wykonanie przekroju stanowi niezbędny etap w odniesieniu do dalszych etapów analizy. Użycie narzędzia *View Cut Manager*  oraz zaznaczenie poszczególnych składowych w ramach dokonania przekroju elementu, zgodnie z rys. 7.57, pozwoli na wykonanie niezbędnego przekroju. Okno opcji przekroju należy zamknąć poleceniem *Dismiss*.



Rys. 7.57. Okno definiowania przekroju


Z uwagi na modyfikację grubości elementu *Plytka\_144*, niezbędne jest dokonanie translacji dwóch podzespołów jednocześnie o wartość różnicy grubości aktualnej próbki względem poprzedniej. Różnica grubości próbki przed i po modyfikacji wynosi  $0.54$  [mm]. Początkowo konieczne jest w module *Assembly* użycie opcji *Translate Instance* , wybór elementu *Plytka\_144* i *Stempel* z wciśniętym klawiszem *Shift* oraz zatwierdzenie opcją *Done*. W dolnej części okna roboczego pojawi się komunikat *Select a start point for the translation vector*, który należy zatwierdzić klawiszem *Enter*. Następnie w ramach komunikatu *Select an end point for the translation vector*, należy w środkowej współrzędnej dotyczącej przemieszczenia po osi *Y*, nanieść wartość  $0.54$  zgodnie z rys. 7.58 oraz zatwierdzić klawiszem *Enter*. Finalnie, translację należy zatwierdzić poleceniem *OK* w dolnej części okna roboczego, po czym nastąpi odpowiednia modyfikacja złożenia modelu.

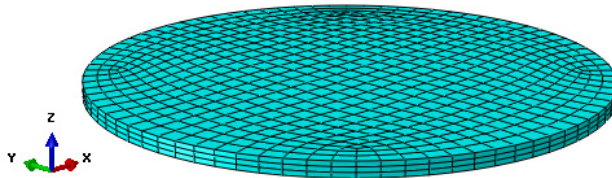


Rys. 7.58. Zdefiniowanie wartości translacji

Kolejny krok dotyczy przypisania siatki elementów skończonych, w przypadku zmodyfikowanego podzespołu. W tym celu należy przejść do modułu *Mesh* oraz dokonać modyfikacji.


## 7.16 Modyfikacja siatki MES – moduł *Mesh*


Po przełączeniu wyświetlania *Object: Part: Plytka\_144*, będzie możliwe rozpoczęcie procesu przypisywania siatki elementów skończonych. Wystarczy użyć narzędzia *Mesh Part*  i zatwierdzając wybór opcją dostępną w dolnej części okna roboczego *Yes*, nastąpi przypisanie siatki elementów skończonych na cały element *Plytka\_144*, zgodnie z rys. 7.59.



Rys. 7.59. Model dyskretny elementu *Plytka\_144*

## 7.17 Wykonanie obliczeń numerycznych – moduł *Job*

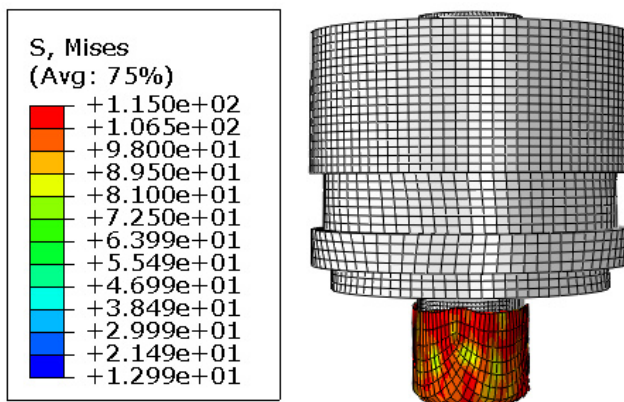
W celu przygotowania zadania obliczeniowego należy wykorzystując narzędzie *Create Job* , nadać nazwę zadania *Name: Proces\_tloczenia\_3*, wybrać model źródłowy do obliczeń *Model-3*, zatwierdzić wybór poleceniem *Continue*. W przypadku możliwości równoległego wykorzystania w procesie obliczeń numerycznych większej liczby rdzeni procesora, można w zakładce *Parallelization* wybrać opcję *Use multiple processors* wpisując odpowiednią liczbę rdzeni (np. 2 lub 4). Następnie należy zatwierdzić zadanie obliczeniowe z ustawieniami domyślnymi poleceniem *OK*.

Obliczenia numeryczne należy uruchomić wykorzystując narzędzie *Job Manager* , poprzez wybranie polecenia *Submit* w ramach nowego zadania obliczeniowego. Przebieg procesu obliczeń numerycznych można obserwować poprzez włączenie polecenia *Monitor*. Zakończenie procesu obliczeń numerycznych zostanie zasygnalizowane odpowiednim komunikatem w oknie dialogowym *Monitor* oraz przez osiągnięcie w zakładce *Total Time* wartości zgodnej w parametrem czasu analizy zdefiniowanym w ramach ustalonych kroków obliczeniowych 38.92. Po zakończeniu procesu obliczeń w celu prezentacji wyników należy włączyć polecenie *Results*.

## 7.18 Wyniki obliczeń numerycznych – *moduł Visualization*

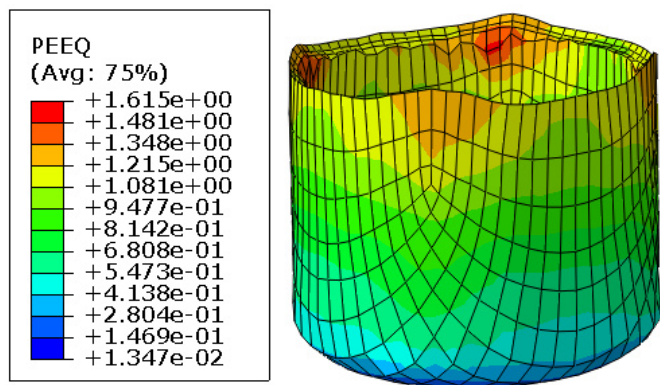
W ramach przeprowadzonych obliczeń numerycznych, należy w analogiczny sposób jak zostało opisane w rozdziale 7.10 przeprowadzić cały etap związany z edycją wyników numerycznych. Z uwagi na fakt, iż edycja wyników związana jest z modyfikacją grubości tłoczonej próbki o nazwie *Plytka\_144*, konieczne jest wyświetlenie zarówno mapy naprężeń modelu numerycznego, odkształceń próbki, wizualizacji procesu tłoczenia oraz charakterystyki pracy próbki. Korzystając z informacji zawartych w rozdziale 7.10 należy przeprowadzić edycje bieżących wyników.

Początkowo zgodnie z kolejnością prezentacji wyników z poprzednich badań numerycznych zostanie przedstawiony wynik rozkładu naprężeń, dotyczący elementu *Plytka\_144* w końcowej fazie procesu tłoczenia próbki. Graficzna prezentacja wyniku poziomu naprężeń zredukowanych, została przedstawiona w formie mapy naprężeń zgodnie z rys. 7.60.



Rys. 7.60. Wynik rozkładu naprężeń

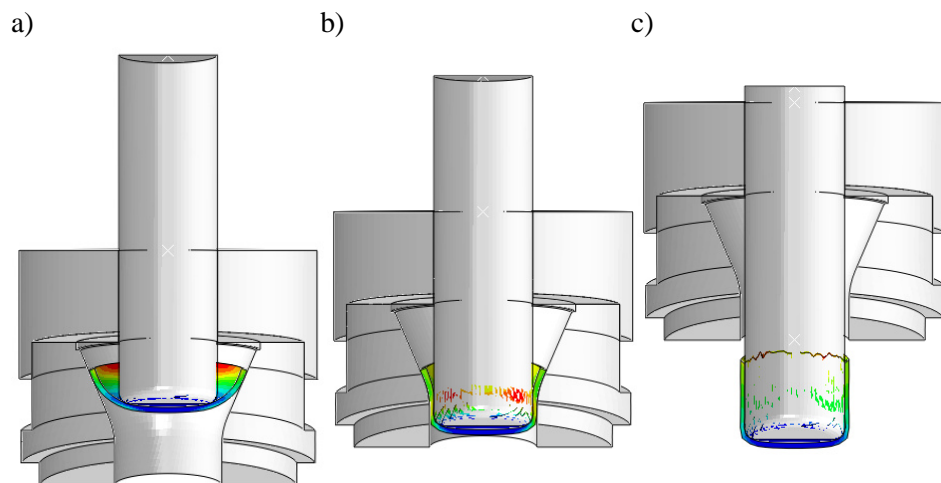
Następnie przedstawiono rezultat odkształceń plastycznych w odniesieniu do elementu *Plytka\_144*, zgodnie z rys. 7.61. Dodatkowo, możliwe jest zauważenie, że wraz ze wzrostem grubości próbki, efekt pojawiającego się „pęcherza powietrza” pomiędzy elementem *Stempel* i *Plytka\_144* redukuje się. Zastosowany proces przyspieszenia obliczeń numerycznych w ramach skalowania masy, oddziałuje zazwyczaj niekorzystnie na postępujące deformacje/odkształcenia, zachodzące w procesach dynamicznych. Zauważono, że im większa jest grubość tłoczonej próbki, tym mniejszy jest błędny efekt numeryczny deformacji elementu tłoczonego.



**Rys. 7.61.** Wynik mapy odkształceń plastycznych

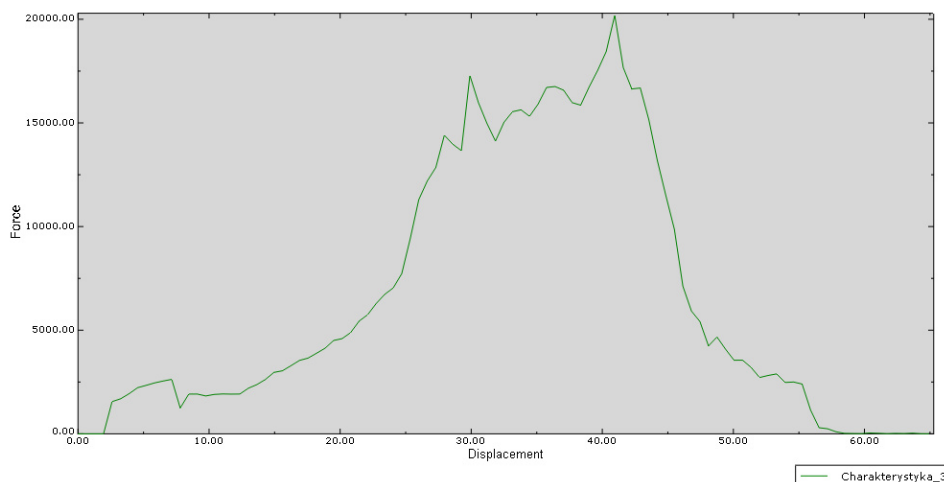
Kolejny krok stanowiło analogiczne podejście do przedstawienia procesu tłoczenia w kilku etapach. Początkowo została wygenerowana wizualizacja dotycząca początkowej fazy tłoczenia równoważnej dla 25 kroku symulacji numerycznej. Następnie przedstawiono rezultat analizy numerycznej w odniesieniu do 50 kroku symulacji. Ostatni etap tłoczenia, był związany jednocześnie z ostatnim krokiem symulacji.

Graficzną prezentację procesu tłoczenia aluminiowej próbki przedstawiono zgodnie z rys. 7.62.



**Rys. 7.62.** Graficzna prezentacja procesu tłoczenia:  
a) 25 klatka symulacji, b) 50 klatka symulacji, c) ostatnia klatka symulacji

Ostatni etap prezentacji wyników badań, związany jest bezpośrednio z wygenerowaniem charakterystyki określającej przebieg siły tłoczenia od przemieszczenia elementu *Stempel*. Wstępnie w ramach opcji *XY Data Manager* należy zaznaczyć wszystkie wiersze dotyczące wyników z poprzedniego badania oraz dokonać ich usunięcia dostępną opcją *Delete*, oprócz wierszy o nazwach *Charakterystyka\_1* i *Charakterystyka\_2*. Dalsza analogia pracy zgodnie z rozdziałem 7.10 umożliwi wyprowadzenie pożądanej ostatniej charakterystyki zgodnie z rys. 7.63 (należy pamiętać o zdefiniowaniu innej nazwy np. *Charakterystyka\_3*).



Rys. 7.63. Charakterystyka przemieszczenia od siły tłoczenia

Po wygenerowaniu ostatniej charakterystyki możliwe jest w odniesieniu do opcji *XY Data Manager*, zaznaczenie wszystkich wierszy dotyczących danych z bieżącego badania oraz usunięcie ich opcją *Delete*, oprócz wierszy o nazwach *Charakterystyka\_1*, *Charakterystyka\_2* i *Charakterystyka\_3*.

Przeprowadzona analiza numeryczna w ramach wszystkich trzech procesów tłoczenia, pozwoliła na zaobserwowanie istotnych zależności wynikających ze zmiany grubości tłoczonej próbki. Poza istotnym wzrostem odkształceń plastycznych, nastąpił znaczący wzrost reakcji (siły) niezbędnej do przetłoczenia próbki. W przypadku tłoczenia elementu *Plytka\_144* siła maksymalna niezbędna do przetłoczenia próbki aluminiowej, wynosiła niespełna 20000 [N] przy przemieszczeniu elementu *Stempel* wynoszącym 41 [mm].

Około trzykrotny wzrost grubości próbki, spowodował niemal sześciokrotne zwiększenie maksymalnej siły tłoczenia. Dodatkowo zauważono, że występowanie niepożądanych form deformacji (w ramach efektu skalowania masy) maleje, wraz ze wzrostem grubości tłoczonych elementów.


## 8. BADANIE PROCESU WYKRAWANIA





### 8.1 Wprowadzenie

Przedmiotem analizy numerycznej jest model numeryczny pozwalający na symulację procesu wykrawania próbek aluminiowych. Model numeryczny stanowi zagadnienie złożone ze względu na zawarte właściwości kontaktowe, występowanie dużych odkształceń oraz zaimplementowanie modelu zniszczenia materiału o właściwościach izotropowych.

W realizowanym przykładzie zostanie przeprowadzona dyskretyzacja konstrukcji przy wykorzystaniu trójwymiarowych elementów bryłowych typu C3D8R (elementy ośmiowęzłowe o 3 stopniach swobody w każdym węźle, z liniową funkcją kształtu oraz zredukowanym całkowaniem) oraz R3D4 (elementy czterowęzłowe nieodkształcalne). W odniesieniu do zagadnień statycznych, gdzie czas analizy był pomijalny, w przypadku zagadnień dynamicznych definicja czasu realizowanego zagadnienia, stanowi parametr fundamentalny.

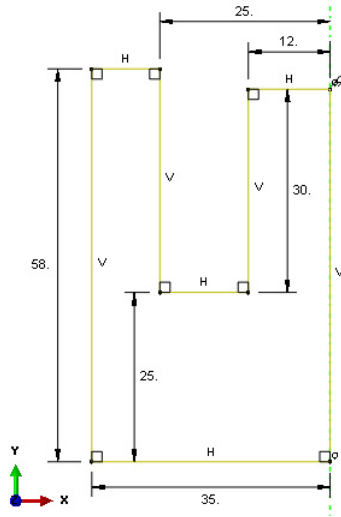
### 8.2 Budowa modelu geometrycznego – *moduł Part*

Model geometryczny pierwszego elementu zostanie wykonany za pomocą narzędzia *Create Part* . Nazwę elementu należy zdefiniować jako *Matryca* oraz ustalić parametry geometryczne części jako element *3D*, ciało nieodkształcalne typu *Discrete Rigid*, wykonane jako element bryłowy typu *Solid* metodą obrócenia profilu *Revolution*, akceptując ustawienia poleceniem *Continue*.

Po automatycznym przekierowaniu do szkicownika, należy skorzystać z opcji *Create Lines: Connected* . W przypadku dodatkowo naszkicowanych przedłużeń linii tworzących szkic, możliwe jest docięcie niepotrzebnych części przy wykorzystaniu polecenia *Auto-Trim* . Niezbędne wymiary należy nanieść przy użyciu narzędzia *Add Dimension* , natomiast edycji oraz modyfikacji wymiarów przeprowadzić narzędziem *Edit Dimension Value* , poprzez zaznaczenie danego wymiaru i zadeklarowanie poprawnej jego wartości.

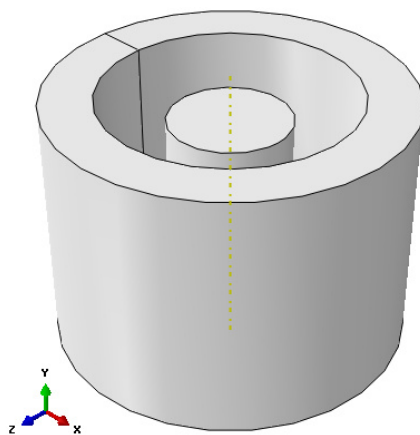
Na rys. 8.1 przedstawiono sparametryzowany szkic profilu bocznego elementu *Matryca*, który w dalszym etapie należy obrócić wokół własnej osi.






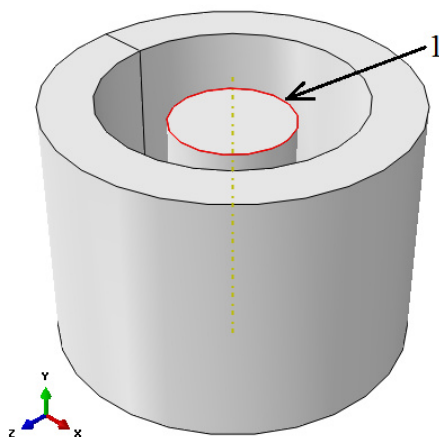
Rys. 8.1. Szkic elementu o nazwie *Matryca*

Po zatwierdzeniu narysowanego szkicu poleceniem *Done*, w dolnej części okna roboczego programu lub po dwukrotnym użyciu środkowego przycisku myszy, nastąpi automatyczne opuszczenie szkicownika. Program poprosi o wprowadzenie kąta obrotu narysowanego profilu, względem pionowej linii stanowiącej oś obrotu. Przy parametrze *Angle* w nowo otwartym oknie, konieczne jest naniesienie pełnego kąta obrotu wynoszącego 360 stopni. Po zatwierdzeniu poleceniem *OK* wprowadzonego parametru, nastąpi wygenerowanie modelu przestrzennego zgodnie z rys. 8.2.



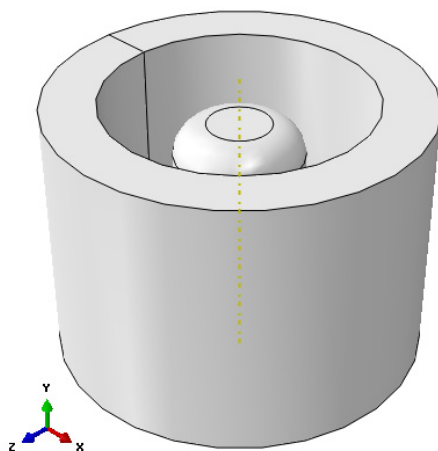
Rys. 8.2. Model bryłowy elementu *Matryca*

Kolejny etap stanowi wykonanie jednego zaokrąglenia wewnętrznej cylindrycznej części obiektu. W celu wykonania odpowiedniego promienia zaokrąglenia, konieczne jest użycie narzędzia *Create Round or Fillet* . Następnie należy wybrać odpowiednią krawędź zgodnie z rys. 8.3, zatwierdzić wybór poleceniem *Done* oraz nanieść wartość w dolnej części okna roboczego *Radius: 6*, po czym dokonać akceptacji klawiszem *Enter*.



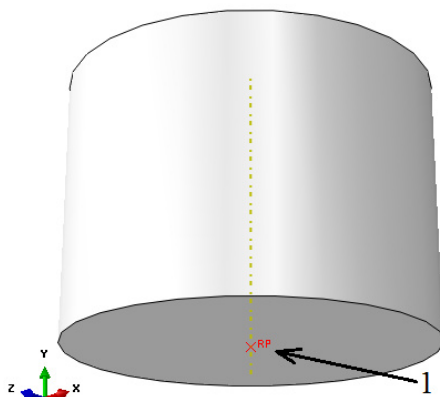
**Rys. 8.3.** Wybór krawędzi celem wykonania zaokrąglenia

Graficzna prezentacja modelu bryłowego z wykonanym zaokrągleniem jest zgodna z rys. 8.4.




**Rys. 8.4.** Model bryłowy z wykonanym zaokrągleniem




Dodatkowo konieczne jest wygenerowanie punktu referencyjnego, do którego będą przypisane przyszłe warunki brzegowe. W tym celu, należy przejść do zakładki *Tools/Reference Point*, po czym wskazać środkowy punkt w centralnej części dolnego okręgu podzespołu, zgodnie z rys. 8.5.



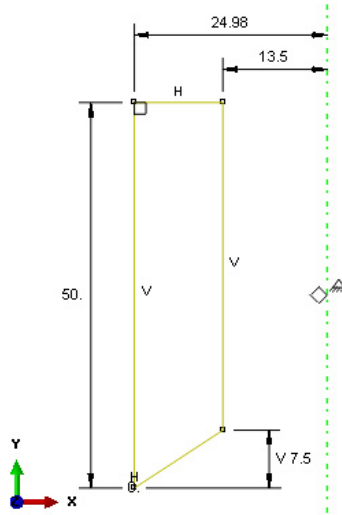
Rys. 8.5. Utworzenie punktu referencyjnego

Ostatni etap związany z elementem *Matryca*, stanowi modyfikacja elementu bryłowego, na element powłokowy. Zabieg ten ma na celu możliwość przypisania lepszego typu siatki elementów skończonych oraz przyspieszenie czasu realizacji zagadnienia, ze względu na mniejszą ilość elementów skończonych, jaka będzie obejmować powłokowy element *Matryca*. Celem modyfikacji należy przejść do zakładki *Shape/Shell/From Solid*. Następnie konieczne jest zaznaczenie całego elementu bryłowego oraz zatwierdzenie poleceniem *Done*. Element zostanie zmodyfikowany automatycznie na typ powłokowy.

Drugi element należy wykonać przy ponownym użyciu głównego narzędzia pozwalającego na projektowanie części *Create Part* . Nazwę elementu należy zdefiniować jako *Stempel* oraz ustalić parametry geometryczne części jako element 3D, ciało nieodkształcalne typu *Discrete Rigid*, wykonane jako element bryłowy metodą obrócenia profilu *Revolution*, akceptując zdefiniowane ustawienia poleceniem *Continue*.

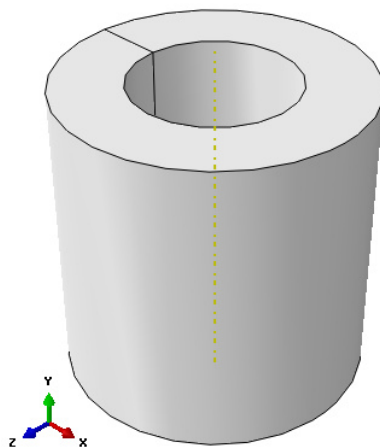
Po automatycznym przekierowaniu do szkicownika, należy skorzystać z opcji *Create Lines: Connected* . Niezbędne wymiary należy nanieść przy użyciu narzędzia *Add Dimension* , natomiast edycji oraz modyfikacji wymiarów przeprowadzić narzędziem *Edit Dimension Value* , poprzez zaznaczenie danego wymiaru i zadeklarowanie poprawnej jego wartości.

Na rys. 8.6 przedstawiono sparametryzowany szkic profilu bocznego elementu *Stempel*, który w dalszym etapie należy obrócić wokół własnej osi.




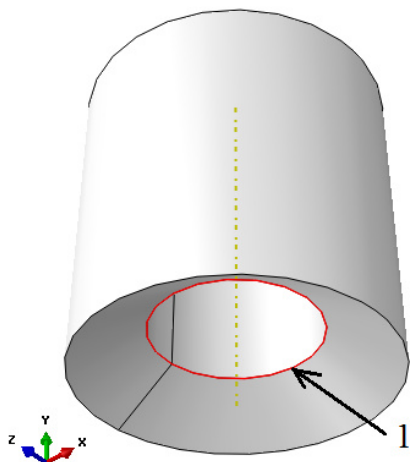
Rys. 8.6. Szkic elementu o nazwie *Stempel*

Po zatwierdzeniu narysowanego szkicu poleceniem *Done*, w dolnej części okna roboczego programu lub dwukrotnym użyciu środkowego przycisku myszy, nastąpi automatyczne opuszczenie szkicownika. Program poprosi o wprowadzenie kąta obrotu narysowanego profilu, względem pionowej linii stanowiącej oś obrotu. Przy parametrze *Angle* w nowo otwartym oknie, konieczne jest wpisanie pełnego kąta obrotu wynoszącego 360 stopni. Po zatwierdzeniu poleceniem *OK* wprowadzonego parametru, nastąpi wygenerowanie modelu przestrzennego zgodnie z rys. 8.7.



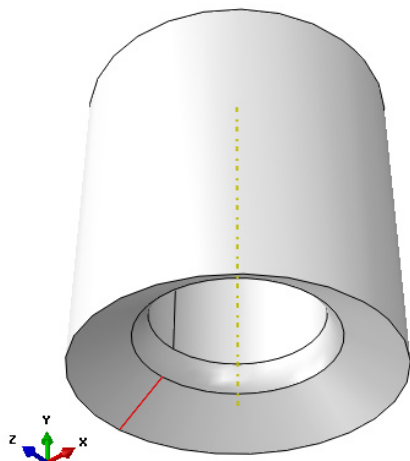
Rys. 8.7. Model bryłowy elementu *Stempel*

Kolejny etap stanowi wykonanie zaokrąglenia na dolnej wewnętrznej środkowej krawędzi obiektu. W tym celu konieczne jest użycie narzędzia *Create Round or Fillet* . Następnie należy wybrać odpowiednią krawędź zgodnie z rys. 8.8, zatwierdzić wybór poleceniem *Done* oraz nanieść wartość w dolnej części okna roboczego *Radius: 5*, po czym dokonać akceptacji klawiszem *Enter*.



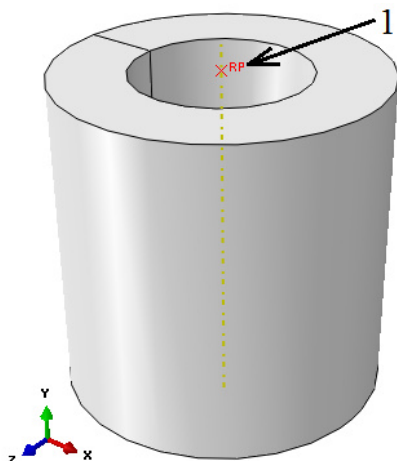
Rys. 8.8. Wybór krawędzi celem pierwszego zaokrąglenia

Wizualizację modelu bryłowego z wykonanym promieniem zaokrąglenia przedstawiono na rys. 8.9.








Rys. 8.9. Model bryłowy z zaokrągleniem

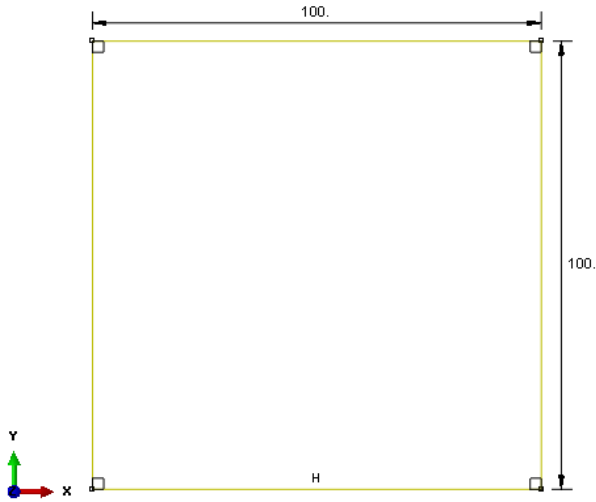
Dodatkowo konieczne jest wygenerowanie punktu referencyjnego, do którego będą przypisane przyszłe warunki brzegowe. W tym celu, należy przejść do zakładki *Tools/Reference Point*, po czym wskazać środkowy punkt w górnej części podzespołu, zgodnie z rys. 8.10.



Rys. 8.10. Utworzenie punktu referencyjnego

Ostatni etap związany z elementem *Stempel*, stanowi modyfikacja elementu bryłowego, na element powłokowy. Zabieg ten ma na celu możliwość przypisania lepszego typu siatki elementów skończonych oraz przyspieszenie czasu realizacji zagadnienia, ze względu na mniejszą ilość elementów skończonych, jaka będzie obejmować powłokowy element *Stempel*. Celem modyfikacji należy przejść do zakładki *Shape/Shell/From Solid*. Następnie konieczne jest zaznaczenie całego elementu bryłowego oraz zatwierdzenie poleceniem *Done*. Element zostanie zmodyfikowany automatycznie na typ powłokowy.

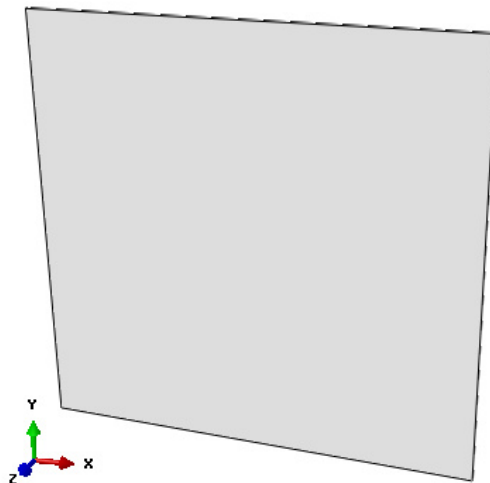
Następny etap stanowi wygenerowanie trzeciej części w ramach modelowanego układu. Podzespół zostanie ponownie wykonany przy użyciu narzędzia *Create Part* . Nazwę elementu należy zdefiniować jako *Plytka\_kwadratowa* oraz ustalić parametry geometryczne części jako element 3D, ciało odkształcalne typu *Deformable*, wykonane jako element bryłowy *Solid* metodą wyciągnięcia profilu *Extrusion*, akceptując ustawienia poleceniem *Continue*. Szkic profilu części należy wykonać początkowo z wykorzystaniem narzędzia *Create Lines: Connected*  lub ewentualnie *Create Lines: Rectangle* . Niezbędne wymiary należy nanieść przy użyciu opcji *Add Dimension* , natomiast edycji oraz modyfikacji wymiarów przeprowadzić narzędziem *Edit Dimension Value* , poprzez zaznaczenie danego wymiaru i zadeklarowanie poprawnej jego wartości. Poprawnie narysowany i zwymiarowany szkic powinien być zgodny z rys. 8.11.





Rys. 8.11. Szkic elementu o nazwie *Plytka\_kwadratowa*

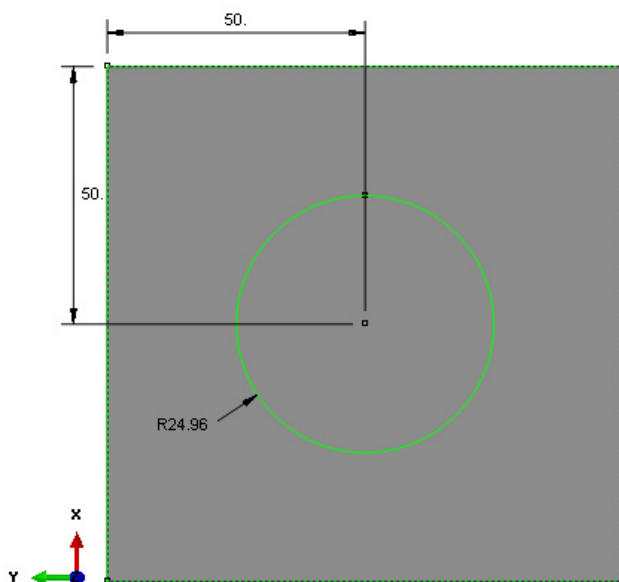
Po zatwierdzeniu narysowanego profilu poleceniem *Done* w nowo otwartym oknie należy wprowadzić długość wyciągnięcia *Depth: 1*, ustalając tym samym grubość modelu przestrzennego oraz zatwierdzając poleceniem *OK*. Wszelkie wymiary geometryczne dotyczące tworzenia modelu podane są w [mm].

Na rys. 8.12 przedstawiono model bryłowy zbudowany na podstawie wcześniej wykonanego szkicu.





Rys. 8.12. Model bryłowy elementu *Plytka\_kwadratowa*

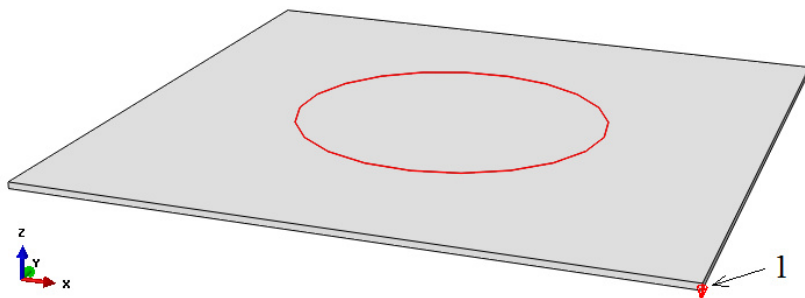
Dodatkowo konieczne jest wykonanie partycji, wydzielającej odpowiedni obszar, w ramach dalszego procesu wykrojenia fragmentu podzespołu. Za pomocą dostępnego narzędzia *Partition Face: Sketch* , możliwe będzie przeprowadzenie odpowiedniego partycjonowania. Po wyborze omawianej opcji niezbędny jest wybór górnej płaskiej kwadratowej powierzchni elementu, zatwierdzenie poleceniem *Done* oraz wybór krawędzi stanowiącej dowolną boczną krawędź wybranej powierzchni, po czym nastąpi automatycznie przekierowanie do szkicownika. Po skorzystaniu z opcji *Create Circle: Center and Perimeter*  należy narysować i zwymiarować okrąg zgodnie z rys. 8.13. Po opuszczeniu szkicownika poleceniem *Done* lub dwukrotnym kliknięciem środkowego klawisza myszy, nastąpi przejście do głównych opcji projektowania.



**Rys. 8.13.** Szkic służący do wykonania partycji

Następnym etapem jest wykonanie podziału elementu, na podstawie narysowanego szkicu. Niezbędne jest użycie opcji *Partition Cell: Define Cutting Plane* . Przytrzymując zaznaczoną opcję należy wybrać podopcję *Partition Cell: Extrude/Sweep Edges* . Po wyborze opisanej opcji partycjonowania, zaznaczyć narysowany szkic w postaci okręgu, zatwierdzić poleceniem *Done* oraz wybrać jedną z dwóch dostępnych opcji w dolnej części okna roboczego o nazwie *Extrude Along Direction*. Następnie konieczne jest wybranie krótkiej pionowej krawędzi, stanowiącej grubość wyciągnięcia profilu, zgodnie z rys. 8.14.






**Rys. 8.14.** Wybór krawędzi celem wykonania partycji

W przypadku automatycznego zdefiniowania kierunku partycjonowania, przeciwnego do osi Z, należy skorzystać z polecenia *OK*. Po poprawnym zdefiniowaniu etapu partycjonowania, proces należy zakończyć poleceniem *Create Partition*.

### 8.3 Definicja właściwości materiałowych – *moduł Property*

Właściwości materiałowe przypisuje się w module *Property* poprzez użycie opcji *Create Material*   $\sigma$ . W nowo otwartym oknie następuje określenie nazwy materiału jako *Aluminium*. Następnie, należy przejść do zakładki *Mechanical/Elasticity/Elastic*, w celu określenia podstawowych cech opisujących materiał. Moduł odkształcalności liniowej wynosi *Young's Modulus: 70000* [MPa] oraz współczynnik Poissona stanowiący stosunek odkształcenia poprzecznego do podłużnego *Poisson's Ratio: 0.33*. Po wprowadzeniu danych należy bezpośrednio przejść do zakładki *Mechanical/Plasticity/Plastic*. W pierwszym wierszu w opcji *Yield Stress* należy nanieść wartość granicy plastyczności materiału wynoszącą w tym przypadku 245 [MPa], natomiast odkształcenie plastyczne, odpowiadające poziomowi granicy plastyczności *Plastic Strain* wynosi 0. Po przejściu klawiszem *Enter* z klawiatury do drugiego wiersza, należy zdefiniować *Yield Stress* jako granicę wytrzymałości materiału równą 395 [MPa], przy odpowiadającym jej wydłużeniu plastycznym próbki przy zerwaniu wynoszącym 10%, które musi być zdefiniowane liczbowo w podopcji *Plastic Strain* jako 0.1. Z uwagi na realizację zagadnienia dynamicznego, niezbędne jest określenie gęstości materiału. Celem określenia pożądanej gęstości, należy przejść do zakładki *General/Density*. W polu *Mass Density*, konieczne jest wpisanie gęstości w poprawnej jednostce. Z uwagi na to, iż model był tworzony w [mm], gęstość musi być podana w jednostce zgodnej jako [t/mm<sup>3</sup>]. Gęstość z reguły podawana jest w jednostce [kg/m<sup>3</sup>], jednak do celów numerycznych poprawnie zamodelowanego procesu, niezbędne jest


przeliczenie 2700 [kg/m<sup>3</sup>] na poprawny typ jednostki. W omawianym polu należy nanieść wartość 2.7E-009.


Finalnie poza trzema już wprowadzonymi właściwościami, konieczne jest zdefiniowanie właściwości niszczących materiał *Aluminium*. Definicja właściwości niszczących odbywa się po przejściu do opcji *Mechanical/Damage for Ductile Metals/Ductile Damage*. W odniesieniu do wybranej opcji, należy wprowadzić szereg zależności pomiędzy odkształceniami i naprężeniami niszczącymi. Początkowo możliwe jest określenie stopnia ewolucji zniszczenia materiału w ramach podopcji o nazwie *Suboptions/Damage Evolution* w prawej części nowo otwartego okna. W komórce określonej jako *Displacement at Failure*, należy nanieść wartość 0.001, stanowiącą parametr określający zachodzące zniszczenie, na skutek wystąpienia przemieszczeń większych od wartości zadeklarowanej w obrębie badanego materiału, podczas procesu uderzenia. Po zatwierdzeniu naniesionego parametru poleceniem *OK*, należy przejść do szczegółowej definicji zniszczenia materiału. Szereg wartości niezbędnych do naniesienia w odpowiednich komórkach przedstawiono na poniższym rysunku.

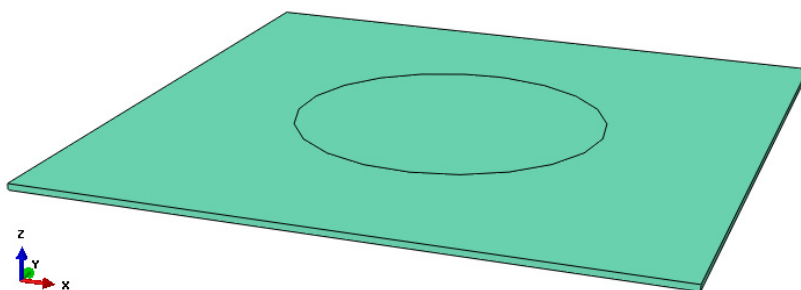
	Fracture Strain	Stress Triaxiality	Strain Rate
1	33	-3.33	0.01
2	33	-0.33	0.01
3	23	-0.26	0.01
4	16.5	-0.2	0.01
5	11.5	-0.13	0.01
6	8.1	-0.06	0.01
7	5.7	0	0.01
8	4.1	0.06	0.01
9	2.8	0.13	0.01
10	2	0.2	0.01
11	1.4	0.26	0.01
12	1	0.33	0.01
13	0.7	0.4	0.01
14	0.5	0.46	0.01
15	0.38	0.53	0.01
16	0.61	1	0.01
17	7.5	3.33	0.01

Rys. 8.15. Właściwości dotyczące zniszczenia materiału

Po wprowadzeniu powyżej przedstawionych parametrów należy użyć polecenia *OK*.

W ramach następnego etapu należy utworzyć sekcje z odpowiednio przypisanymi właściwościami materiałowymi za pomocą narzędzia *Create Section* , definiując nazwę sekcji jako *Aluminium* oraz właściwości *Solid/Homogeneous*, zatwierdzając wprowadzone dane poleceniem *Continue*. W nowo otwartym oknie należy wybrać *Material: Aluminium*, zatwierdzając *OK*.


Utworzoną w powyższy sposób sekcję należy przypisać do wykonanego modelu o nazwie *Płytką\_kwadratowa*, wybierając kolejno nad ekranem roboczym w okienku *Part* poszczególną część oraz wykorzystując narzędzie *Assign Section* . Po zaznaczeniu odpowiedniej części i zatwierdzeniu wyboru poleceniem *Done*, należy wybrać odpowiednią sekcję *Aluminium* o typie *Solid* i zaakceptować przypisanie sekcji poleceniem *OK*. Po poprawnym przypisaniu sekcji materiałowej element zmieni barwę na kolor zielony zgodnie z rys. 8.16.

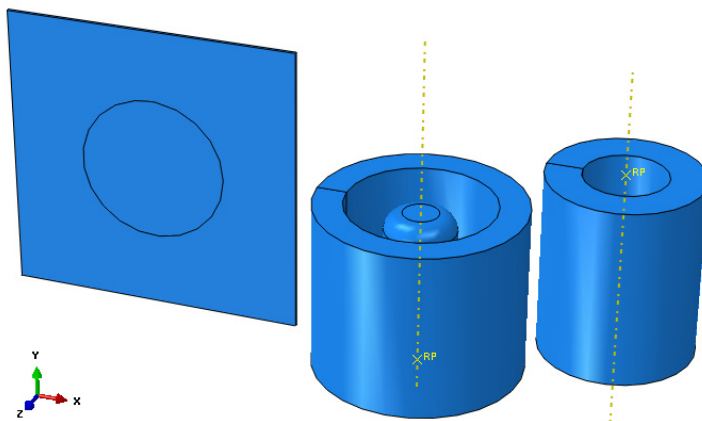


**Rys. 8.16.** Element z przypisanymi właściwościami materiałowymi


Pozostałym elementom nie należy przypisywać właściwości materiałowych, ze względu na to iż stanowią one nieodkształcalne bryły.

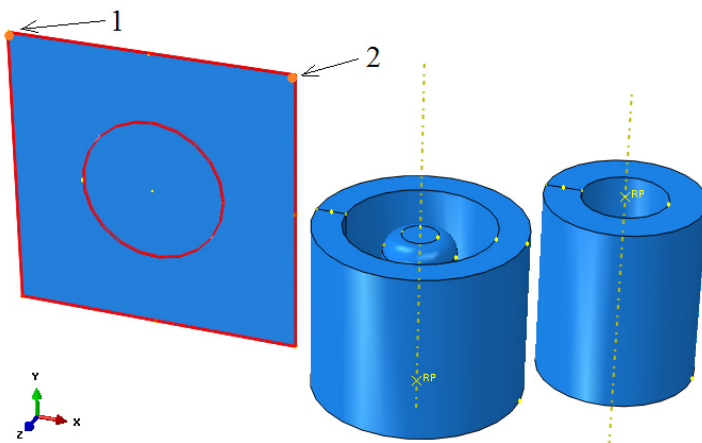
## 8.4 Tworzenie instancji części – *moduł Assembly*

W bieżącym module należy dokonać utworzenia instancji wykonanych elementów w ramach wcześniejszego projektowania. Model numeryczny składa się z trzech elementów, przy czym każdy zostanie zaimportowany jednokrotnie. W tym celu należy wykorzystać narzędzie *Create Instance* , zaznaczając w oknie listy części elementy z wciśniętym klawiszem *Shift* (ewentualnie przy użyciu klawisza *Ctrl* przy pojedynczym zaznaczaniu poszczególnych części), przy uwzględnieniu opcji *Auto-offset from other instances*, co finalnie należy zatwierdzić poleceniem *OK*. Utworzoną instancję części przedstawiono na rys. 8.17.




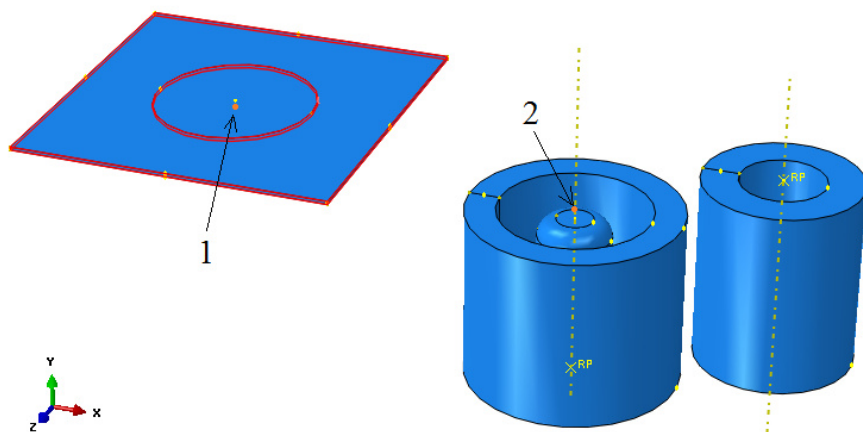
Rys. 8.17. Wstawienie instancji części

W ramach modułu *Assembly* konieczne jest dokonanie złożenia wstawionych instancji. Po wczytaniu elementów należy je złożyć odpowiednio w przestrzeni, gdzie początkowo konieczne jest użycie opcji *Rotate Instance* , zaznaczenie elementu *Plytka\_kwadratowa* oraz wybranie polecenia *Done*. Kolejny krok stanowi wybór dwóch punktów, wzdłuż których będzie ustalona oś obrotu elementu. Punkty powinny być wybrane w kolejności przedstawionej na rys. 8.18, po czym należy wybrać zatwierdzić klawiszem *Enter* w ramach zdefiniowanego kąta obrotu *Angle of rotation: -90* oraz poleceniem *OK*.



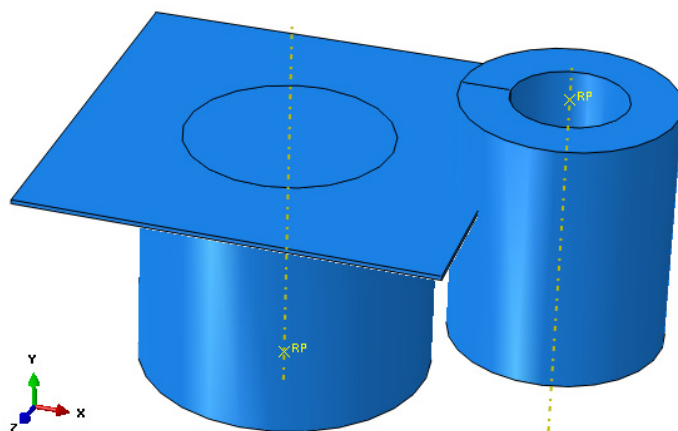
Rys. 8.18. Wybór punktów do obrotu elementu *Plytka\_kwadratowa*

Następnie konieczne jest użycie opcji *Translate Instance* , wybór elementu *Plytka\_kwadratowa* oraz zatwierdzenie opcją *Done*. Po wyborze odpowiednich punktów, zgodnie z rys. 8.19 (początkowo punktu z elementu *Plytka\_kwadratowa*, znajdującego się w dolnej środkowej części elementu, natomiast kolejno punktu z elementu *Matryca*, znajdującego się na osi obrotu bryły, w górnej części osi *Y* związanej z elementem) i zatwierdzeniu wyboru omawianych punktów opcją *OK*, nastąpi realizacja translacji.




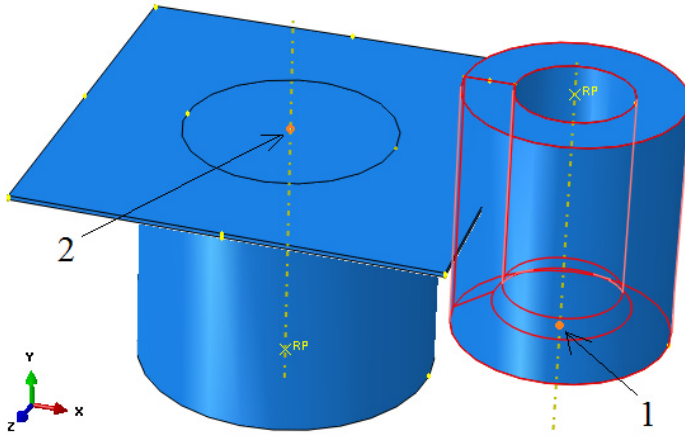
Rys. 8.19. Wybór punktów do translacji elementu *Plytka\_kwadratowa*

Graficzna prezentacja częściowego złożenia modelu numerycznego została przedstawiona na rys. 8.20.



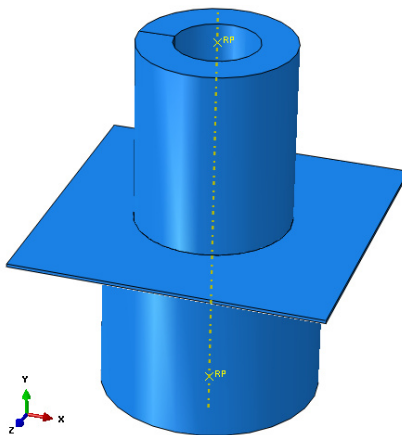
Rys. 8.20. Wizualizacja przeprowadzonej translacji

W dalszym etapie konieczne jest przeprowadzenie translacji elementu *Stempel* względem elementu *Płytką\_kwadratowa*. W tym celu niezbędne jest użycie opcji *Translate Instance* , wybór elementu *Stempel* oraz zatwierdzenie opcją *Done*. Po wyborze odpowiednich punktów, zgodnie z rys. 8.21 (początkowo punktu z elementu *Stempel*, znajdującego się w dolnej środkowej części elementu, natomiast kolejno punktu z elementu *Płytką\_kwadratowa*, znajdującego się na osi obrotu bryły, w górnej części osi *Y* związanej z elementem) i zatwierdzeniu wyboru omawianych punktów opcją *OK*, nastąpi realizacja translacji.



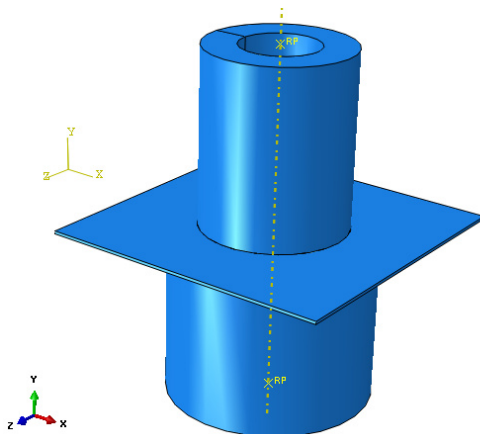
**Rys. 8.21.** Wybór punktów do translacji elementu *Stempel*

Graficzna prezentacja złożenia modelu została przedstawiona na rys. 8.22.




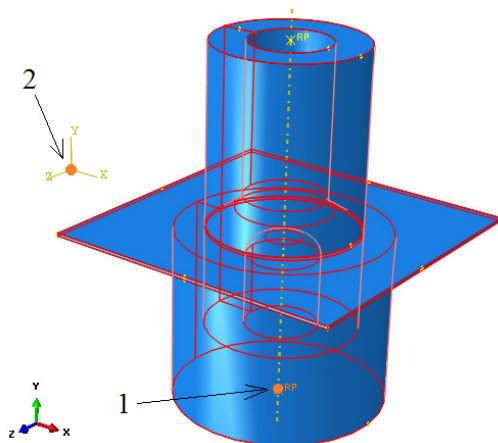
**Rys. 8.22.** Złożenie modelu numerycznego

Końcowy etap procesu złożenia stanowi sprawdzenie, w jaki sposób jest usytuowany w przestrzeni globalny układ współrzędnych względem modelu numerycznego. W przypadku zgodnym z graficzną prezentacją, jak na rys. 8.23 należy przenieść układ współrzędnych, tak by znajdował się w osi modelu.

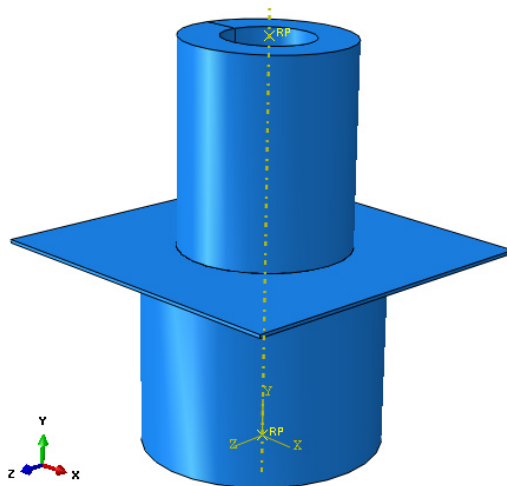


Rys. 8.23. Prezentacja położenia układu współrzędnych

Niezbędne jest użycie opcji *Translate Instance* , jednocześnie zaznaczenie wszystkich elementów modelu numerycznego oraz zatwierdzenie wyboru poleceniem *Done*. Dalszy etap stanowi wybór odpowiedniego punktu na złożeniu, względem punktu związanego z początkiem układu współrzędnych. Po wyborze odpowiednich punktów należy dokonać zatwierdzenia translacji poleceniem *OK*.




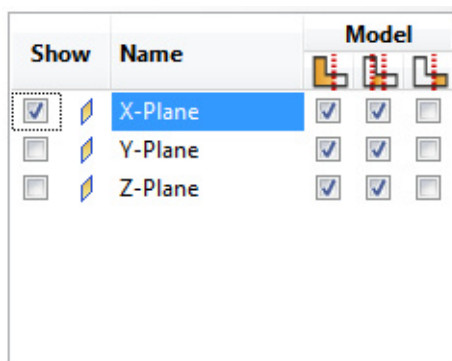
Rys. 8.24. Wybór punktów celem translacji modelu względem układu współrzędnych



Rys. 8.25. Wizualizacja poprawnego usytuowania układu współrzędnych

W przypadku, gdy układ współrzędnych znajduje się opcjonalnie na osi związanej ze złożonym modelem numerycznym, nie ma konieczności dokonywania translacji na niższe bądź wyższe położenie w osi modelu.

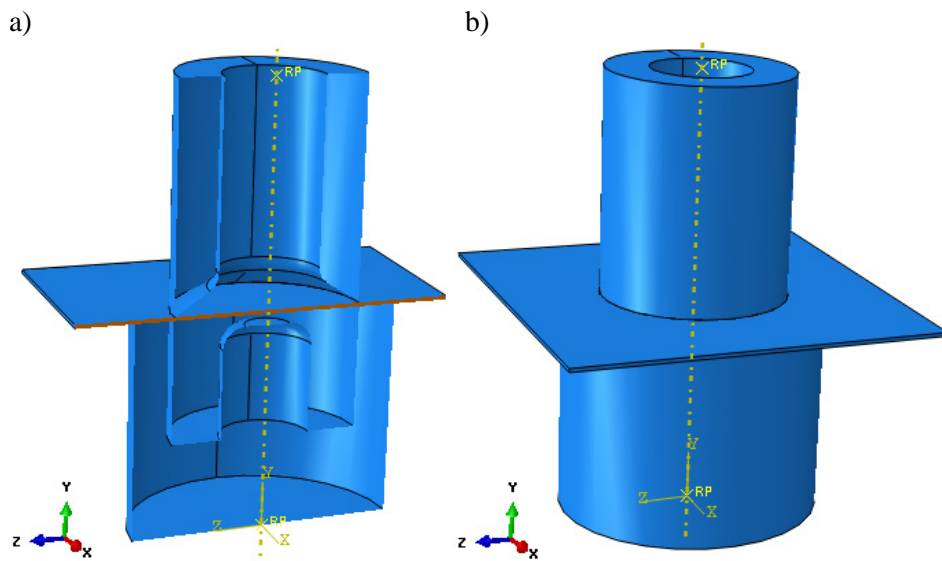
Po zrealizowaniu wszelkich rotacji i translacji, niezbędne jest sprawdzenie, czy zostały wybrane odpowiednie punkty w ramach szeregu dokonanych operacji złożeniowych. Celem walidacji poprawności złożenia, należy z górnej listwy dostępnych opcji programu, wybrać narzędzie *View Cut Manager*  oraz zaznaczyć poszczególne składowe w ramach dokonania przekroju elementu, zgodnie z rys. 8.26, po czym należy poleceniem *Dismiss* zamknąć okno przekroju. Wykonanie przekroju stanowi niezbędny etap względem dalszych etapów analizy.



Rys. 8.26. Okno definiowania przekroju



Graficzna prezentacja złożeń została przedstawiona zarówno w przekroju oraz bez, na rys. 8.27. W przypadku, gdy zostały popełnione błędy w ramach złożeń, konieczna jest poprawa w definiowaniu zadeklarowanych rotacji oraz translacji, przy wykorzystaniu odpowiednich opcji.




Rys. 8.27. Złożenie: a) model z przekrojem, b) model bez przekroju

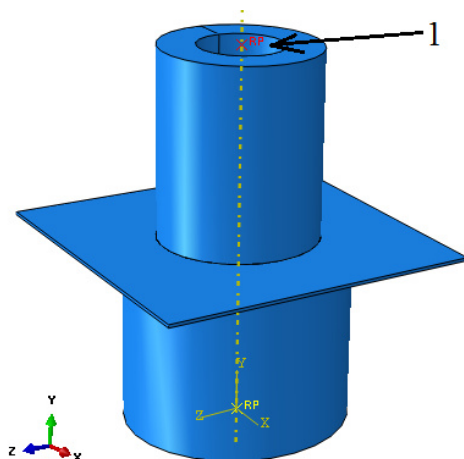
## 8.5 Definicja analizy numerycznej – *moduł Step*

Analiza numeryczna przeprowadzona zostanie jako zadanie dynamiczne. Wybierając narzędzie *Create Step*, należy ustalić nazwę kroku obliczeniowego jako *Dynamika* i wybrać typ analizy jako *Dynamic, Explicit* oraz zatwierdzić wybór poleceniem *Continue*. W nowo otwartym oknie w pierwszej z zakładek *Basic*, należy nanieść wyłącznie wartość czasu trwania analizy numerycznej w polu *Time period: 0.017* oraz włączyć opcję *NIgeom* na *ON*. Podana wartość jest wyrażona w sekundach. Ze względu na długi okres oczekiwania towarzyszący skomplikowanym obliczeniom dynamicznym, czas analizy jest możliwie najkrótszy oraz wcześniejsze złożenie uwzględnia od razu styk elementu *Stempel* z elementem *Plytka\_kwadratowa*. W trzeciej z zakładek *Mass scaling*, konieczne jest użycie opcji *Use scaling definitions below* oraz wybranie w dolnej części otwartego okna roboczego polecenia *Create*. W okienku *Scale by factor*, należy nanieść wartość *40000* oraz zatwierdzić opcją *OK*. Okno związane z określaniem procesu dynamicznego również powinno być


zaakceptowane poleceniem *OK*. Zgodnie z zasadą przyspieszenia procesu obliczeniowego związanego ze skalowaniem masy obiektów poddanych procesom dynamicznym, naniesiona wartość skalowania ma wpływ na przebieg samej analizy i otrzymany wynik powinien zostać przeanalizowany. W przypadku wykorzystywania w obliczeniach procesu skalowania masy, przyspieszy znacząco realizacja obliczeń. Skalowanie masy, często wiąże się z występowaniem niepożądanych błędów numerycznych, jednak przy niewielkim współczynniku skalowania, błędy symulacyjne są często niezauważalne. Z uwagi na fakt, iż w prezentowanym przykładzie został zdefiniowany bardzo wysoki współczynnik skalowania masy, uzyskany rezultat badawczy może być obarczony wystąpieniem błędów w ramach obliczeń numerycznych (przykładem może być wystąpienie niepożądanego postaci deformacji wykrawanej próbki).


W odniesieniu do narzędzia *Field Output Manager* , należy wybrać opcję *Created* (dwukrotnym kliknięciem myszy), po czym z okna dostępnych wyników wybrać dodatkowo z opcji *Failure/Fracture* podopcję *DMICRT*. Podobnie z opcji *State/Field/User/Time*, należy wybrać podopcję *STATUS* oraz wszelkie wybory zatwierdzić poleceniem *OK*, po czym następnie opcja *Dismiss*.

Dodatkowo w bieżącym module, konieczne jest utworzenie punktu pomiarowego, w odniesieniu do którego będą zbierane wyniki przemieszczenia elementu *Stempel* w zadeklarowanym czasie analizy. Celem utworzenia omawianego punktu pomiarowego, niezbędne jest wybranie zakładki *Tools/Set/Create*. W nowo otwartym oknie należy zdefiniować nazwę *Pomiar*, wybrać typ *Geometry* oraz wybrać polecenie *Continue*. Następnym krokiem jest wskazanie punktu referencyjnego *RP* znajdującego się w górnej części elementu *Stempel*, zgodnie z rys. 8.28.




Rys. 8.28. Wybór odpowiedniego punktu *RP* celem utworzenia punktu pomiarowego


Wybór omawianego punktu należy finalnie zatwierdzić poleceniem *Done*. W opisany sposób został zdefiniowany punkt pomiarowy. Następny krok dotyczy przypisania do utworzonego punktu pomiarowego, odpowiednich właściwości, związanych ze zbieraniem pożądaných wyników. W tym celu należy przejść do opcji *Field Output Manager* . W dolnej części nowo otwartego okna, niezbędne jest wybranie polecenia *Create*, po czym należy zdefiniować nazwę na *Pomiar* i wybrać finalnie polecenie *Continue*. W oknie związanym z wyprowadzaniem wyników, z górnej podopcji *Domain*, niezbędne jest wybranie opcji *Set* oraz z prawej rozwijalnej listy wcześniej utworzonego punktu pomiarowego o nazwie *Pomiar*. Z poniższej listy możliwych do wyprowadzenia wyników w ramach *Output Variables*, należy rozwinąć wyniki dotyczące przemieszczeń *Displacement/Velocity/Acceleration* i dokonać wyboru wyłącznie pierwszej z dostępnych podopcji wyników *U, Translations and rotations*. Po finalnym zwinięciu sekcji dotyczącej przemieszczeń, należy kolejno opuścić bieżące okno opcji wyprowadzania wyników dostępnym poleceniem *OK*, znajdującym się w jego dolnej części.

W ramach stale otwartego okna *Field Output Manager* , została utworzona dodatkowa druga sekcja o nazwie *Pomiar*, związana z wyprowadzeniem wyników dotyczących utworzonego punktu pomiarowego o nazwie jednakowej jak definiowana sekcja. Opisana procedura umożliwi wyprowadzenie wyników przemieszczeń w czasie dla nowo zdefiniowanego punktu pomiarowego. Proces ten pozwoli na wygenerowanie wykresu przemieszczenia (niezbędnego do wykrojania i przetłoczenia próbki) od czasu analizy w ramach badanego procesu.

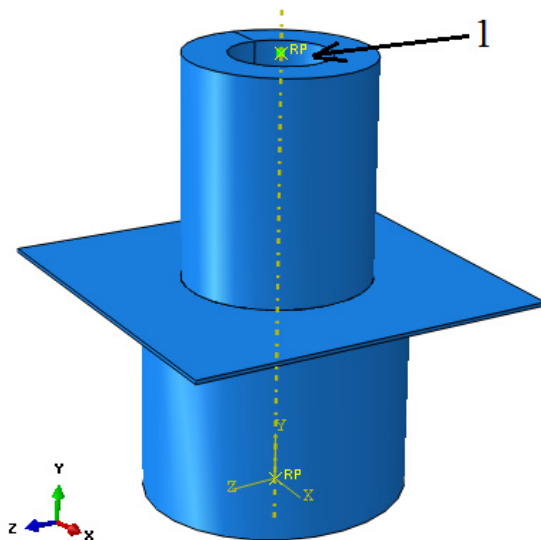
## 8.6 Interakcje modelu numerycznego – moduł *Interaction*

W module związanym z interakcjami należy początkowo ustalić typ kontaktu oraz miejsca współpracy podzespołów, wchodzących w skład całego modelu. W tym celu niezbędne jest wstępne zdefiniowanie rodzaju kontaktu, jaki ma występować na powierzchniach styku elementów. Należy wybrać polecenie *Create Interaction Property* , nazwę zdefiniować jako *Kontakt* oraz wybrać typ współpracy powierzchni z listy o nazwie *Contact* i zatwierdzić wybór przyciskiem *Continue*. W nowo otwartym oknie niezbędne jest określenie cech wybranego kontaktu. Należy, zatem wybrać początkowo zakładkę *Mechanical/Tangential Behavior*, zaznaczyć opcję *Frictionless*. Kolejno w zakładce *Mechanical/Normal Behavior* powinna zostać wybrana opcja „*Hard*” *Contact* oraz *Default* w odpowiednich oknach wyboru, z faktu uwzględnienia niezbędnego rodzaju kontaktu na powierzchniach normalnych współpracujących podzespołów. Dodatkowo zaznaczenie opcji *Allow separation after contact* spowoduje ciągłą współpracę elementów skończonych, związanych w wykonaną

wytłoczką względem wszelkich podzespołów podlegających kontaktowi z przetłaczanym elementem. Wszelkie wybory zatwierdzić należy opcją *OK*.

Następnym zagadnieniem do zdefiniowania będzie określenie miejsca współpracy zaprojektowanych podzespołów kompletnego modelu. Należy początkowo wybrać opcję *Create Interaction* , zdefiniować nazwę jako *Kontakt*, z informacji *Step* wybrać z rozwinięcia utworzony krok obliczeniowy o nazwie *Initial* i typ kontaktu *General contact (Explicit)* oraz zatwierdzić wszystkie wybory poleceniem *Continue*. W nowo otwartym oknie bez zmian pozostawić należy typ kontaktu jako *All\* with self*, przy czym w dolnej części okna roboczego z właściwości kontaktowych *Contact properties*, konieczny jest wybór w podopcji *Global property assignment*, wcześniej utworzonej relacji o nazwie *Kontakt*. Wszelkie operacje należy zatwierdzić poleceniem *OK*.

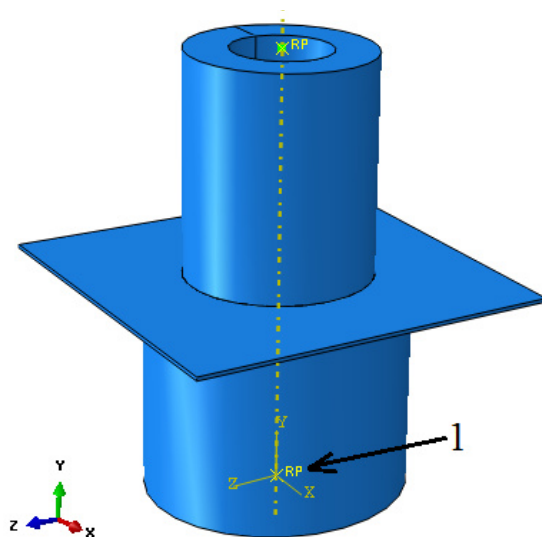
Dodatkowo w ramach modułu *Interaction* niezbędne jest określenie ciężaru własnego oddziałujących obiektów względem siebie. Z uwagi na fakt, iż ciężar przypisywany jest wyłącznie do elementów nieodkształcalnych, element *Plytka\_kwadratowa* nie będzie uwzględniany w tym procesie. Celem zdefiniowania masy poszczególnych elementów nieodkształcalnych, należy skorzystać z zakładki *Special/Inertia/Create*. W nowo otwartym oknie należy zdefiniować nazwę pierwszego elementu jako *Stempel* i wybrać podopcję *Point mass/inertia* oraz wybór zatwierdzić poleceniem *Continue*. Następny etap stanowi wybór odpowiedniego punktu *RP* zgodnie z rys. 8.29.



Rys. 8.29. Wybór odpowiedniego punktu *RP* celem przypisania masy obiektu *Stempel*

Po wyborze omawianego punktu, niezbędne jest skorzystanie z polecenia *Done*. W nowo otwartym oknie w ramach opcji *Mass Isotropic*, należy nanieść wartość *0.0005* oraz zatwierdzić poleceniem *OK*. Podana masa obiektu została odpowiednio przeliczona z wartości *0.5* [kg] na *0.0005* [t].


Analogicznie należy zachować się względem przypisania masy do odpowiednich punktów *RP* zgodnych z rys. 8.30 w przypadku w przypadku elementu *Matryca*. W odniesieniu do elementu *Matryca*, masa wynosi *0.005* [t].



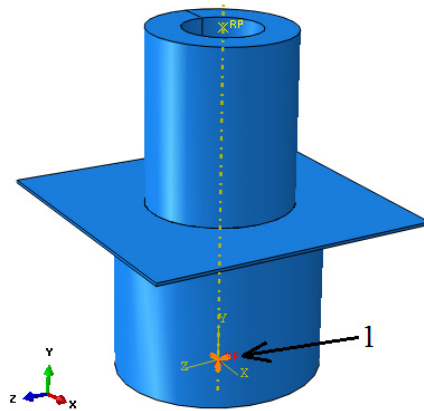
Rys. 8.30. Wybór odpowiedniego punktu *RP* celem przypisania masy obiektu *Matryca*

## 8.7 Definicja warunków brzegowych – moduł *Load*

Warunki brzegowe modelu numerycznego stanowią określenie odpowiedniego utwierdzenia elementu o nazwie *Matryca* oraz ustalenie prędkości, z jaką poruszać się powinien element o nazwie *Stempel*.


Definicję warunków brzegowych należy rozpocząć od utwierdzenia podzespołu *Matryca*. W tym celu konieczny jest wybór opcji *Create Boundary Condition* , nadając nazwę *Utwierdzenie\_Matryca*, w kroku analizy *Step: Initial*, jednocześnie wybierając metodę definicji warunków brzegowych *Displacement/Rotation*. Po zatwierdzeniu ustawień poleceniem *Continue*, należy zaznaczyć i zatwierdzić poleceniem *Done*, punkt referencyjny *RP* przypisany do obiektu *Matryca*, zgodnie z rys. 8.31.

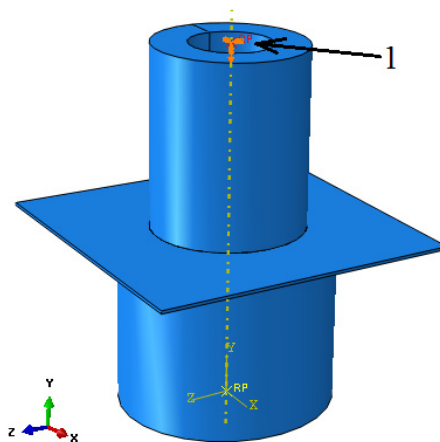
Następnie konieczne jest zablokowanie wszystkich sześciu stopni swobody, po czym akceptacji wyboru dokonuje się opcją *OK*.



Rys. 8.31. Wybór odpowiedniego punktu *RP* celem utwierdzenia elementu *Matryca*


Następny etap definicji warunków brzegowych stanowi określenie prędkości wykrawania i następnie tłoczenia w odniesieniu do elementu *Stempel*.

Definicję warunków brzegowych należy rozpocząć od zadeklarowania odpowiedniego typu relacji prędkości w ramach podzespołu *Stempel*. W tym celu konieczny jest ponowny wybór opcji *Create Boundary Condition* , nadając nazwę *Prędkosc\_Stempel*, w kroku analizy *Step: Dynamika*, jednocześnie wybierając metodę definicji warunków brzegowych *Velocity/Angular velocity*. Po zatwierdzeniu ustawień poleceniem *Continue*, należy zaznaczyć i zatwierdzić poleceniem *Done*, punkt referencyjny *RP* przypisany bezpośrednio do obiektu *Stempel*, zgodnie z rys. 8.32.

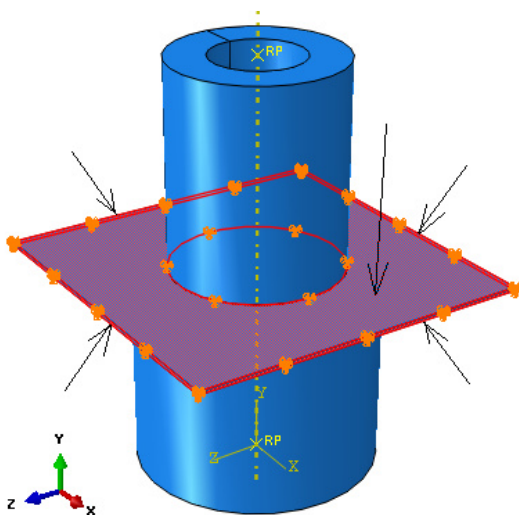


Rys. 8.32. Wybór odpowiedniego punktu *RP* celem zdefiniowania prędkości elementu *Stempel*

Następnie konieczne jest zablokowanie pięciu stopni swobody ( $V1$ ,  $V3$ ,  $VR1$ ,  $VR2$ ,  $VR3$ ), poza jednym dotyczącym możliwości przemieszczania się względem osi  $Y$ , oznaczonym jako  $V2$ , w ramach, którego należy zdefiniować prędkość przemieszczenia się elementu *Stempel*. Po zablokowaniu omawianych stopni swobody i wybraniu stopnia swobody oznaczonego  $V2$  należy nanieść ujemną wartość  $-1000$  [mm/s]. Finalny etap definicji warunku brzegowego stanowi dokonanie akceptacji wyboru stopni swobody opcją *OK*.

Ostatni etap w ramach definiowania warunków brzegowych stanowi utwierdzenie powierzchni bocznych i górnej elementu *Plytka\_kwadratowa*. W tym celu konieczne jest skorzystanie z opcji *Create Boundary Condition* , nadając nazwę *Utwardzenie\_Plytka\_kwadratowa*, w kroku analizy *Step: Initial*, jednocześnie wybierając metodę definicji warunków brzegowych *Displacement/Rotation*. Po zatwierdzeniu ustawień poleceniem *Continue*, należy zaznaczyć i zatwierdzić poleceniem *Done*, wszystkie cztery powierzchnie boczne (z użyciem klawisza *Shift*) obiektu *Plytka\_kwadratowa* oraz powierzchnię górną bez wydzielonego obszaru walcowego, zgodnie z rys. 8.33.


Następnie konieczne jest zablokowanie wszystkich trzech translacyjnych stopni swobody  $U1$ ,  $U2$  i  $U3$ , po czym akceptacji wyboru dokonuje się opcją *OK*.





**Rys. 8.33.** Wybór odpowiednich powierzchni celem utwierdzenia elementu *Plytka\_kwadratowa*

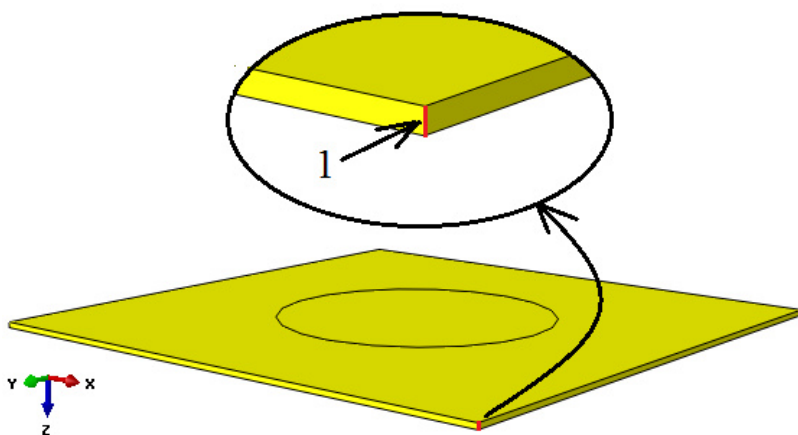
W opisany powyżej sposób zostały zdefiniowane wszelkie warunki brzegowe. Przypisane warunki brzegowe są wystarczające, celem poprawnego przeprowadzenia początkowo procesu wykrawania oraz następnie tłoczenia próbki aluminiowej po wykrojeniu.

## 8.8 Budowa siatki elementów skończonych – *moduł Mesh*

Proces dyskretyzacji w ramach bieżącego modułu odbędzie się kilku etapowo. Po przełączeniu wyświetlania *Object: Part: Plytka\_kwadratowa*, możliwe będzie rozpoczęcie procesu przypisywania siatki elementów skończonych. Początkowo celem określenia typu i parametrów siatki elementów skończonych, należy wykorzystując narzędzie *Assign Mesh Controls*  zaznaczyć cały element *Plytka\_kwadratowa* oraz zatwierdzając poleceniem *Done* ustawić parametry siatki na *Hex/Sweep/Medial axis* oraz zatwierdzić całość poleceniem *OK*.

Wykorzystując narzędzie *Seed Part* , należy ustalić globalną gęstość siatki dyskretyzowanej części w poleceniu *Approximate global size* na wartość *1* i zatwierdzić kolejno poleceniem *OK*.


Następny etap stanowi zdefiniowanie minimalnej gęstości siatki po grubości elementu. W tym celu należy użyć opcji *Seed Edges* . Po wybraniu opisanej opcji, niezbędne jest zaznaczenie odpowiedniej pionowej krawędzi, stanowiącej grubość elementu zgodnie z rys. 8.34 oraz zatwierdzenie dokonanego wyboru poleceniem *Done*.




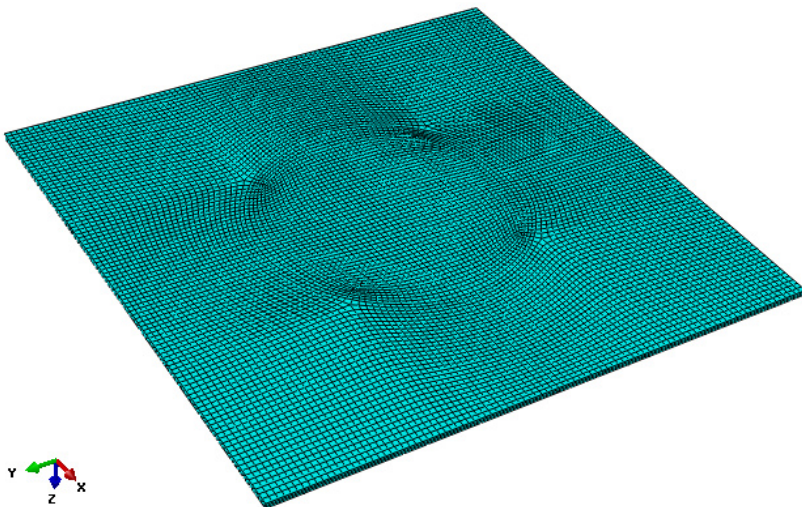
Rys. 8.34. Wybór odpowiedniej krawędzi elementu *Plytka\_kwadratowa*

W nowo otwartym oknie, konieczność stanowi zdefiniowanie ilości elementów skończonych po grubości podzespołu (celem uwzględnienia procesu zginania). W zakładce *Basic*, w sekcji *Method* należy wybrać typ metody podziału oznaczony jako *By number*. W ramach opcji *Sizing Controls*, liczbę elementów po grubości *Number of elements*, należy zdefiniować na *3* oraz użyć polecenia *OK* zatwierdzającego dotychczasowe ustawienia.




Kolejny krok stanowi ustalenie rodzaju elementu skończonego zastosowanego w dyskretyzacji modelu *Płytką\_kwadratową*. Używając narzędzia *Assign Element Type* , konieczność stanowi zaznaczenie całego obiektu oraz zatwierdzenie poleceniem *Done*, po czym należy dokonać następujących wyborów w ramach dostępnych opcji *Element Library: Explicit*, *Geometric Order: Linear*, typ *Family: 3D Stress* oraz w zakładce *Hex*, niezbędne jest włączenie opcji *Element deletion: Yes*. Akceptacji dokonanych zmian należy dokonać za pomocą polecenia *OK*.


Ostatni etap związany z elementem *Płytką\_kwadratową*, stanowi przypisanie zdefiniowanej siatki. W tym celu wykorzystując narzędzie *Mesh Part* , i zatwierdzając wybór polecenia opcją dostępną w dolnej części okna roboczego *Yes*, nastąpi przypisanie siatki elementów skończonych na cały element *Płytką\_kwadratową*. Opisany element po procesie dyskretyzacji będzie prezentował się zgodnie z rys. 8.35.




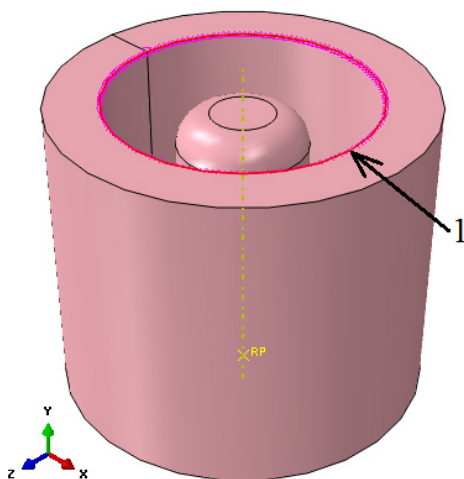
**Rys. 8.35.** Model dyskretny elementu *Płytką\_kwadratową*

W dalszej części niezbędne jest prowadzenie procesu dyskretyzacji w odniesieniu do nieodkształcalnych elementów. Po przełączeniu wyświetlania *Object: Part: Matryca*, będzie możliwe rozpoczęcie procesu przypisywania siatki elementów skończonych.

Początkowo celem określenia typu i parametrów siatki elementów skończonych, należy wykorzystując narzędzie *Assign Mesh Controls* , zaznaczyć cały element *Matryca* oraz zatwierdzając poleceniem *Done* ustawić parametry siatki na *Quad/Free* z algorytmem jej tworzenia względem osi symetrii modelu *Medial axis* oraz użyć polecenia *OK*.


Wykorzystując narzędzie *Seed Part* , należy ustalić globalną gęstość siatki dyskretyzowanej części w poleceniu *Approximate global size* na wartość 2 i zatwierdzić kolejno poleceniem *OK*. Kolejny krok stanowi ustalenie rodzaju elementu skończonego zastosowanego w dyskretyzacji modelu *Matryca*.

Następny etap stanowi zdefiniowanie minimalnej gęstości siatki w obszarze styku z elementem *Plytka\_kwadratowa*. W tym celu należy użyć opcji *Seed Edges* . Po wybraniu opisanej opcji, niezbędne jest zaznaczenie odpowiedniej krawędzi okręgu elementu *Matryca*, przedstawionej na rys. 8.36 oraz zatwierdzenie wyboru poleceniem *Done*.

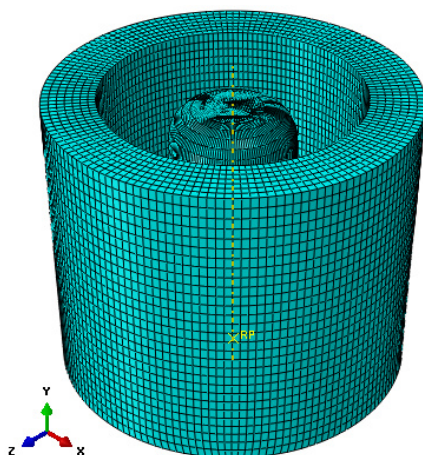


**Rys. 8.36.** Wybór odpowiedniej krawędzi elementu *Matryca*

W nowo otwartym oknie, konieczność stanowi zdefiniowanie wielkości pojedynczego elementu siatki na zaznaczonej krawędzi okręgu podzespołu (celem możliwości poprawnej realizacji procesu wykrawania). W zakładce *Basic*, w sekcji *Method* należy wybrać typ metody podziału oznaczony jako *By size*. W ramach opcji *Sizing Controls*, wartość wielkości elementu siatki *Approximate element size*, należy zdefiniować na równą 1 – tak by gęstość siatki była zgodna z gęstością siatki na krawędzi okręgu, wydzielonego obszaru w elemencie *Plytka\_kwadratowa*, po czym użyć polecenia *OK* zatwierdzającego dotychczasowe ustawienia oraz opcji *Done*.

Używając narzędzia *Assign Element Type* , konieczność stanowi zaznaczenie całego obiektu oraz zatwierdzenie poleceniem *Done*, po czym należy dokonać następujących wyborów w ramach dostępnych opcji *Element Library*: *Explicit*, *Geometric Order: Linear*, typ *Family: Discrete Rigid Element*. Akceptacji dokonanych zmian należy dokonać za pomocą polecenia *OK*.

Ostatni etap związany z elementem *Matryca*, stanowi przypisanie zdefiniowanej siatki. W tym celu wykorzystując narzędzie *Mesh Part*, i zatwierdzając wybór polecenia opcją dostępną w dolnej części okna roboczego *Yes*, nastąpi przypisanie siatki elementów skończonych na cały element *Matryca*. Opisywany element po procesie dyskretyzacji będzie zaprezentowany zgodnie z rys. 8.37.



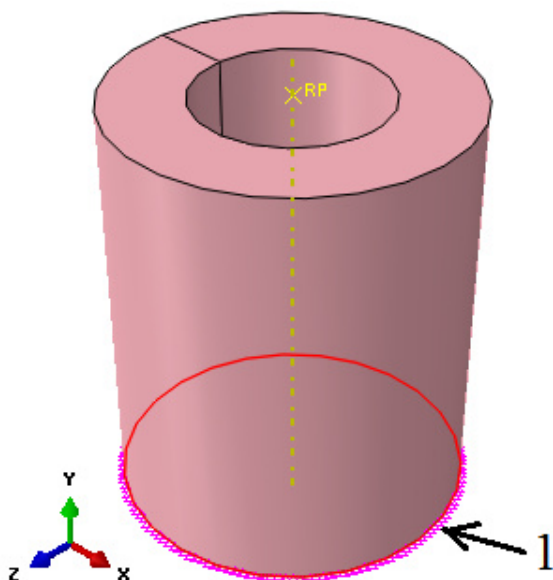
Rys. 8.37. Model dyskretny elementu *Matryca*

W ostatnim etapie niezbędne jest prowadzenie procesu dyskretyzacji w odniesieniu do ostatniego nieodkształcalnego elementu. Po przełączeniu wyświetlania *Object: Part: Stempel*, należy postępować w sposób analogiczny do procesu dyskretyzacji podzespołu *Matryca*.

Początkowo celem określenia typu i parametrów siatki elementów skończonych, należy wykorzystując narzędzie *Assign Mesh Controls* zaznaczyć cały element *Stempel* oraz zatwierdzając poleceniem *Done* ustawić parametry siatki na *Quad/Free* z algorytmem jej tworzenia względem osi symetrii modelu *Medial axis* oraz użyć polecenia *OK*.


Wykorzystując narzędzie *Seed Part*, należy ustalić globalną gęstość siatki dyskretyzowanej części w poleceniu *Approximate global size* na wartość 2 i zatwierdzić kolejno poleceniem *OK*. Kolejny krok stanowi ustalenie rodzaju elementu skończonego zastosowanego w dyskretyzacji modelu *Stempel*.


Następny etap stanowi zdefiniowanie minimalnej gęstości siatki w obszarze styku z elementem *Plytka\_kwadratowa*. W tym celu należy użyć opcji *Seed Edges*. Po wybraniu opisanej opcji, niezbędne jest zaznaczenie odpowiedniej krawędzi okręgu elementu *Stempel*, przedstawionej na rys. 8.38 oraz zatwierdzenie wyboru poleceniem *Done*.

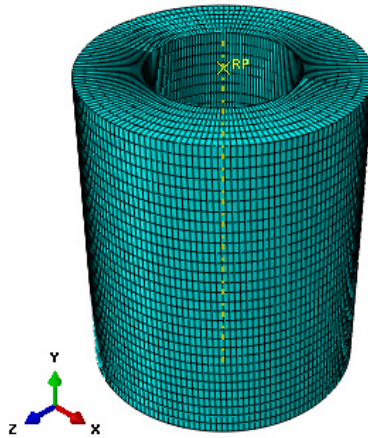


Rys. 8.38. Wybór odpowiedniej krawędzi elementu *Stempel*

W nowo otwartym oknie, konieczność stanowi zdefiniowanie wielkości pojedynczego elementu siatki na zaznaczonej krawędzi okręgu podzespołu (celem możliwości poprawnej realizacji procesu wykrawania). W zakładce *Basic*, w sekcji *Method* należy wybrać typ metody podziału oznaczony jako *By size*. W ramach opcji *Sizing Controls*, wartość wielkości elementu siatki *Approximate element size*, należy zdefiniować na równą *1* – tak by gęstość siatki była zgodna z gęstością siatki na krawędzi okręgu, wydzielonego obszaru w elemencie *Plytka\_kwadratowa*, po czym użyć polecenia *OK* zatwierdzającego dotychczasowe ustawienia oraz opcji *Done*.

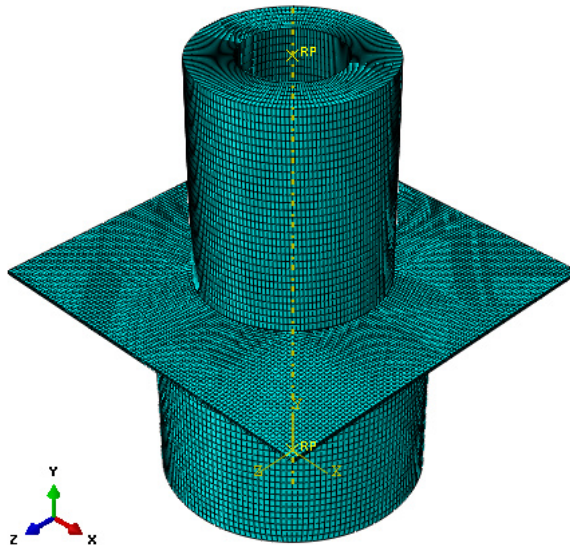
Używając narzędzia *Assign Element Type* , konieczność stanowi zaznaczenie całego obiektu oraz zatwierdzenie poleceniem *Done*, po czym należy dokonać następujących wyborów w ramach dostępnych opcji *Element Library*: *Explicit*, *Geometric Order: Linear*, typ *Family: Discrete Rigid Element*. Akceptacji dokonanych zmian należy dokonać za pomocą polecenia *OK*.

Ostatni etap związany z elementem *Stempel*, stanowi przypisanie zdefiniowanej siatki. W tym celu wykorzystując narzędzie *Mesh Part* , i zatwierdzając wybór polecenia opcją dostępną w dolnej części okna roboczego *Yes*, nastąpi przypisanie siatki elementów skończonych na cały element *Stempel*. Opisywany element po procesie dyskretyzacji będzie prezentował się zgodnie z rys. 8.39.




Rys. 8.39. Model dyskretny elementu *Stempel*


W ramach modułu *Mesh*, możliwe jest dodatkowo przedstawienie graficznej prezentacji całego modelu numerycznego, z przypisaną siatką elementów skończonych po przełączeniu bieżącego poziomu wyświetlania w odniesieniu do opcji *Object: Assembly*. Wizualizacja modelu numerycznego po pełnej dyskretyzacji jest zgodna z rys. 8.40.



Rys. 8.40. Model dyskretny całego złozenia


## 8.9 Wykonanie obliczeń numerycznych – *moduł Job*



W celu przygotowania zadania obliczeniowego należy wykorzystując narzędzie *Create Job* , nanieść nazwę zadania *Name: Proces\_wykrawania* oraz zatwierdzić poleceniem *Continue*. W przypadku możliwości równoległego wykorzystania w procesie obliczeń numerycznych większej liczby rdzeni procesora, można w zakładce *Parallelization* wybrać opcję *Use multiple processors* wpisując odpowiednią liczbę rdzeni (np. 2 lub 4). Następnie należy zatwierdzić zadanie obliczeniowe z ustawieniami domyślnymi poleceniem *OK*.

Obliczenia numeryczne należy uruchomić wykorzystując narzędzie *Job Manager* , poprzez wybranie polecenia *Submit*. Przebieg procesu obliczeń numerycznych można obserwować poprzez włączenie polecenia *Monitor*.

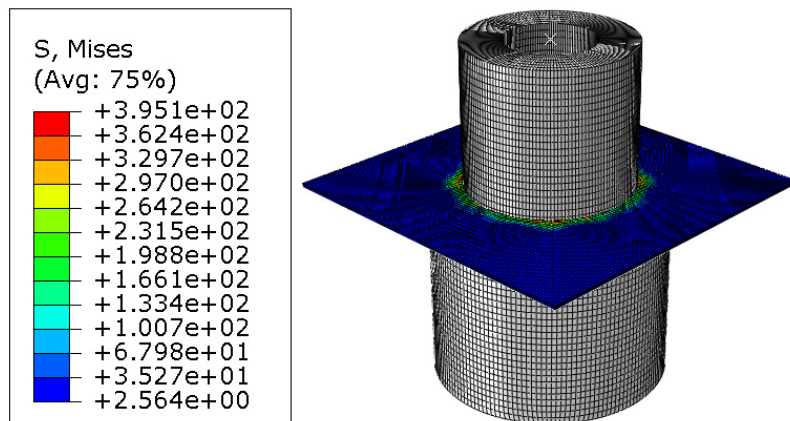
Zakończenie procesu obliczeń numerycznych zostanie zasygnalizowane odpowiednim komunikatem w oknie dialogowym *Monitor* oraz przez osiągnięcie w zakładce *Total Time* wartości zgodnej w parametrem czasu analizy zdefiniowanym w ramach ustalonych kroków obliczeniowych *0.017*. Po zakończeniu procesu obliczeń w celu prezentacji wyników należy włączyć polecenie *Results*.

## 8.10 Wyniki obliczeń numerycznych – *moduł Visualization*


Analiza otrzymanych wyników przeprowadzona zostanie w głównej mierze na podstawie wizualizacji odkształceń plastycznych elementu *Plytka\_kwadratowa* oraz rozkładów naprężeń zredukowanych z uwzględnieniem postępujących zjawisk dynamicznych, zgodnie z hipotezą wytrzymałościową Hubera-Misesa-Hencky'ego (H-M-H). Wizualizację rozkładów naprężenia zredukowanego H-M-H przy jednoczesnym wystąpieniu postępującego procesu dynamiki otrzymamy aktywując narzędzie *Plot Contours on Deformed Shape*  – w ramach, czego opcjonalnie zostanie wyświetlony poziom naprężeń. Zwiększenie czcionki wyświetlanych wartości liczbowych można uzyskać wykorzystując narzędzie z górnego menu programu *Viewport/Viewport Annotation Options*. W tym celu należy w nowo otwartym oknie dialogowym w zakładce *Legend* zaznaczyć polecenie *Set Font*, po czym podopcję *Size*, zmieniając rozmiar czcionki wyświetlanej na ekranie – zmianę należy zatwierdzić poleceniem *OK*.



W celu obserwacji zachowania się modelu krok po kroku w trakcie procesu dynamicznego należy posługiwać się przewijaniem klatek animacji przy użyciu opcji *Previous* lub *Next*  , znajdujących się nad oknem roboczym programu. Wyświetlane wartości naprężenia zredukowanego podawane są w tym przypadku w [MPa], co wynika bezpośrednio z jednostek wprowadzanych w trakcie przygotowania modelu numerycznego. Ogólną mapę naprężenia zredukowanego

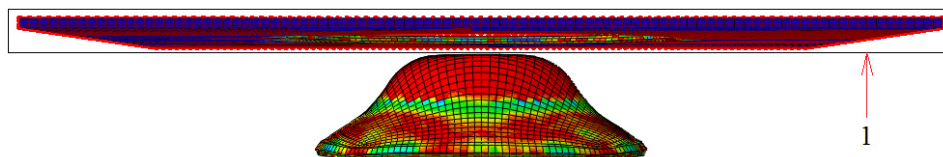
w modelu numerycznym, w odniesieniu do ostatniego kroku obliczeniowego – wykonanie wykrojonej wytłoczki, przedstawiono na rys. 8.41. Maksymalne wartości naprężeń osiągają poziom 395 MPa ( $+3.951e+02$  oznacza  $3.951 \times 10^2 = 395.1$ ).



Rys. 8.41. Wynik rozkładu naprężeń

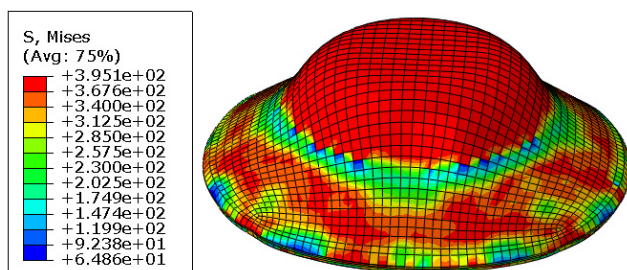
Wybierając opcję *Create Display Group* , możliwa będzie wizualizacja wyników wyłącznie w odniesieniu do wykrojonego i przetłoczonego elementu. W nowo otwartym oknie, niezbędny jest wybór sekcji *Part instances*, z prawej części okna zaznaczenie elementu *Plytka\_kwadratowa* oraz użycie polecenia *Replace* w dolnej części bieżącego okna roboczego. Ostatecznie należy zatwierdzić powyższe wybory i opuścić dotychczas wyświetlane okno poleceniem *Dismiss*.

Dodatkowo konieczne jest wybranie opcji *Apply Right View* , z górnej listwy programu, za pomocą, której będzie najefektywniej przedstawiony rzut elementu *Plytka\_kwadratowa*. Kolejny krok stanowi ponowne użycie opcji *Create Display Group* , po czym należy skorzystać z podopcji *Elements/Pick from viewport* oraz zaznaczyć cały płaski nieodkształcony w ramach procesu wykrawania fragment elementu, zgodnie z rys. 8.42.



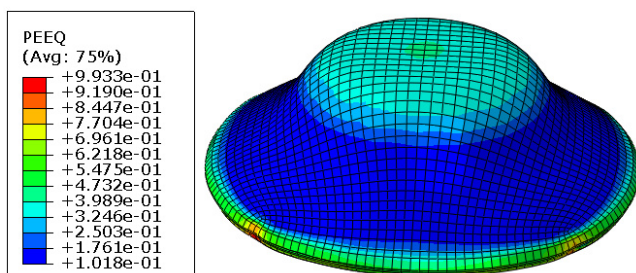
Rys. 8.42. Wybór obszaru do usunięcia z wizualizacji wyników

Po wyborze określonego obszaru oraz użyciu polecenia *Done*, niezbędne jest wybranie w nowo otwartym oknie opcji *Remove*, z dolnej części bieżącego okna. Po zatwierdzeniu dotychczasowych wyborów poleceniem *Dismiss*, nastąpi zamknięcie dotychczas aktywnego okna. W odniesieniu do graficznej prezentacji wyników zgodnie z rys. 8.43, zostanie wyświetlony w przestrzeni trójwymiarowej wyłącznie odcięty w ramach procesu wykrawania i przetłoczony fragment elementu *Plytka\_kwadratowa*.







**Rys. 8.43.** Rozkład naprężeń w ramach wykrojonej części

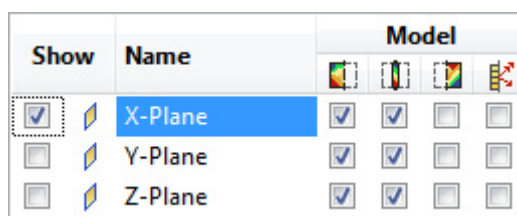
Następny etap stanowi wyświetlenie wyników związanych z odkształceniami plastycznymi elementu *Plytka\_kwadratowa*. W tym celu niezbędna jest zmiana dotychczasowej opcji wyświetlania wyników, z górnej listwy programu oznaczona jako *S* na opcję *PEEQ* – określającą ekwiwalentny (równoważny) stan odkształceń plastycznych, jaki towarzyszy naprężeniom (*S – Mises'a*). Wartość parametru należy odczytywać jako procentowy poziom odkształceń względem stanu początkowego, zatem dla przykładu otrzymany maksymalny wynik  $9.933e-01$  oznacza  $9.933 \times 10^{-1}$ , czyli  $0.993$ . Z uwagi na procentowy stopień odkształcenia otrzymany wynik należy przemnożyć przez wartość  $100$ , na podstawie, czego zostanie uzyskany procentowy poziom odkształcenia maksymalnego, wynoszący  $0.993 \times 100 = 99.3\%$ . Graficzna prezentacja mapy odkształceń plastycznych jest zgodna z rys. 8.44.






**Rys. 8.44.** Wynik mapy odkształceń plastycznych

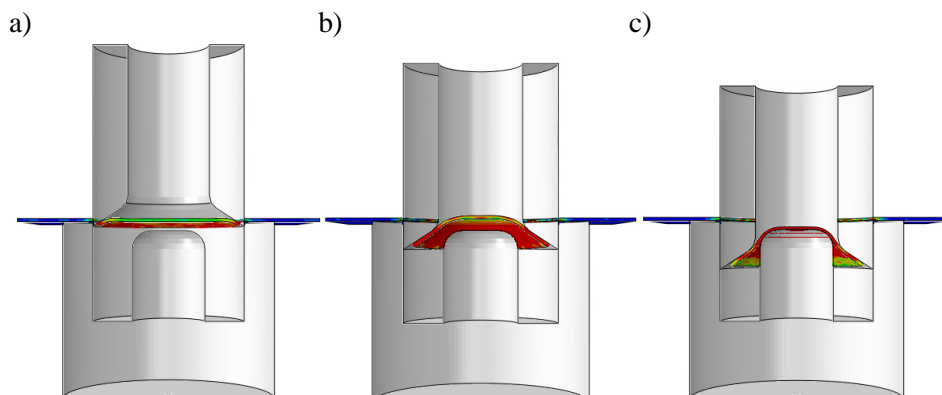


Przy użyciu opcji *Replace All* , nastąpi wyświetlenie wszelkich wcześniej ukrytych elementów. Przedstawienie procesu wykrawania z tłoczeniem należy rozpocząć od przewinięcia symulacji do stanu początkowego, w odniesieniu do czego niezbędne jest użycie narzędzia *First*  (z górnej listwy okna wizualizacji wyników), pozwalającego na wyświetlenie modelu w stanie początkowym. Celem możliwości wyświetlenia przebiegu procesu tłoczenia krok po kroku, przy jednoczesnej obserwacji modelu w przekroju, konieczne będzie skorzystanie z opcji *View Cut Manager* , tuż przy opcji *Active/Deactive View Cut* . W nowo otwartym oknie, należy wybrać poszczególne opcje wyświetlania przekroju, zgodnie z rys. 8.45, po czym należy poleceniem *Dismiss* zamknąć okno przekroju.




Rys. 8.45. Okno definiowania przekroju


Dodatkowo konieczne jest wybranie opcji *Apply Right View* . Przy użyciu narzędzia *Common Options*  oraz wybraniu w sekcji *Visible Edges* podopcji *Feature edges* i zatwierdzeniu wyboru poleceniem *OK*, zostaną wyłączone krawędzie siatki MES. Następnie w ramach użycia opcji przewijania klatki po klatce procesu wykrawania i tłoczenia oznaczonej jako *Next* , przedstawiono graficzną prezentację postępującego procesu, zgodnie z rys. 8.46.



Rys. 8.46. Proces wykrawania z tłoczeniem przedstawiony 3-etapowo

Widoczny efekt pogłębiającego się „pęcherza powietrza” pomiędzy elementem *Stempel* i *Płytką\_kwadratowa* podczas szybkiego procesu wykrawania, stanowi błąd numeryczny, wynikający z opisywanego w module *Step*, skalowania masy. Zastosowany proces skalowania masy, pozwolił na znaczące przyspieszenie czasu obliczeń, przy jednoczesnym obarczeniu modelu numerycznego niepożądanymi błędami obliczeniowymi.

Dodatkowo w odniesieniu do bieżącego modułu *Visualization*, możliwe jest przedstawienie charakterystyki pracy modelu w postaci wykresu przemieszczenia w czasie, w odniesieniu do elementu *Stempel*. Za pomocą narzędzia *Create XY Data* , następnie wyboru opcji *ODB field output* oraz zatwierdzenia wyboru poleceniem *Continue*, możliwe będzie określenie danych, niezbędnych do wygenerowania omawianej charakterystyki. W nowo otwartym oknie, w ramach zakładki *Variables*, należy dokonać wyboru w podopcji *Position*, sekcji *Unique Nodal*. W odniesieniu do wybranej sekcji z dostępnej listy wyników, konieczne jest wybranie parametru *U2*, stanowiącego przemieszczenie zgodne z osią *Y* (po rozwinięciu głównej sekcji wyników *U*). Następnie po przejściu do zakładki *Elements/Nodes* w ramach sekcji *Method*, niezbędne jest wybranie opcji *Node sets*. Z wyświetlonych parametrów, stanowiących punkty w ramach, których możliwe jest wyprowadzenie wyników, należy wybrać *Set* o nazwie *Pomiar*. Wszelkie dotychczasowe wybory należy zaakceptować poleceniem *Save*, a następnie opcją *OK*, celem dalszej możliwości wyprowadzenia pożądanej charakterystyki. Po wyprowadzeniu wyników w ramach utworzonego punktu pomiarowego, bieżące okno należy zamknąć poleceniem *Dismiss*.

Ponownie używając narzędzia *Create XY Data* , następnie dokonując wyboru opcji *Operate on XY data* oraz zatwierdzeniu wyboru poleceniem *Continue*, możliwe będzie wygenerowanie omawianej charakterystyki. W odniesieniu do nowo otwartego okna, w ramach sekcji *Operators*, niezbędny jest wybór dostępnym suwakiem, funkcji o nazwie *abs(A)* – wyznaczającej wartość bezwzględną z określonych danych. Następny etap stanowi wstawienie do zależności, wyprowadzonych uprzednio wyników obliczeń. W tym celu należy uaktywnić kursor myszy, wewnątrz nawiasu funkcji *abs* oraz dokonać wyboru wyników przemieszczeń *U:U2*. W opisany powyżej sposób została określona zależność funkcyjna, pozwalająca na wygenerowanie charakterystyki przemieszczenia elementu *Stempel* względem osi *Y* w czasie trwania procesu. Zależność matematyczna powinna być zgodna z rys. 8.47.

Enter an expression by typing and selecting XY Data and Operators below.

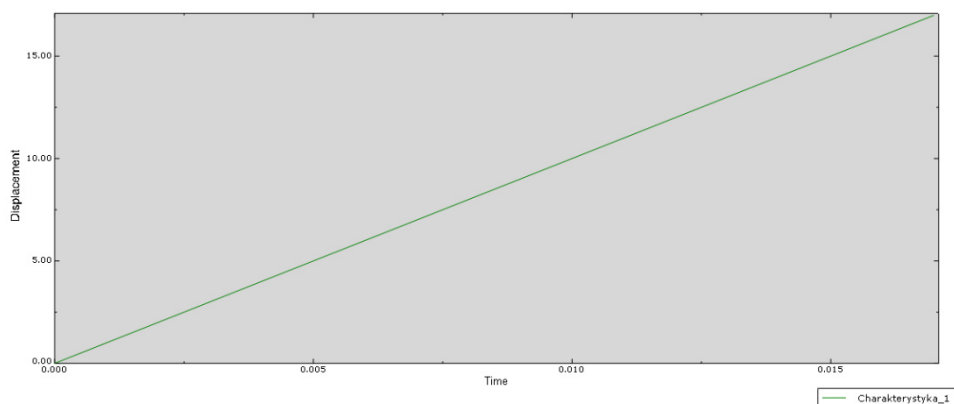
Example: `maxEnvelope( "XYData-2", "XYData-4" ) * 2.5 + "XYData-5"`

`abs ( "U:U2 PŁ: STEMPEL-1 N: 10834" )`

**Rys. 8.47.** Prezentacja zależności matematycznej

Przy użyciu polecenia *Save as* możliwe jest zapisanie otrzymanego wykresu, pod nazwą *Charakterystyka\_1*, zatwierdzając naniesioną nazwę opcją *OK*. Następnie należy zamknąć okno związane z generowaniem zależności matematycznej poleceniem *Cancel*. Po wybraniu narzędzia *XY Data Manager* oraz zaznaczeniu w nowo otwartym oknie nazwy *Charakterystyka\_1* i użyciu opcji *Plot*, nastąpi wygenerowanie pożądanej charakterystyki. Bieżące okno, należy zamknąć poleceniem *Dismiss*. Celem uwydatnienia prezentacji wykresu, należy skorzystać z zakładki *Option/XY Options/Axis*. W nowo otwartym oknie w ramach sekcji *X Axis*, z zaznaczoną opcją *Time*, konieczne jest wybranie dolnej zakładki *Axis* oraz w opcji *Format*, ustalenie typu jednostki na *Decimal* oraz naniesienie wartości 3 w polu *Precision*. Następnie po wybraniu opcji *Font*, należy zwiększyć czcionkę np. na wartość 10 i dokonać zatwierdzenia poleceniem *OK*. W sposób analogiczny należy zmienić typ wyświetlanej jednostki oraz wielkość czcionki dla sekcji *Y Axis* po wybraniu opcji *Displacement*. Po dokonaniu wszelkich zmian, niezbędne jest zamknięcie bieżącego okna poleceniem *Dismiss*.

Korzystając z zakładki *Option/XY Options/Chart Legend*, w nowo otwartym oknie przy użyciu polecenia *Font* i zwiększeniu czcionki legendy na wartość 12 oraz zatwierdzeniu wyboru poleceniem *OK*, możliwe będzie zwiększenie tekstu opisującego legendę. Ostatecznie bieżące okno należy zamknąć poleceniem *Dismiss*. Graficzna prezentacja otrzymanej charakterystyki po wszelkich modyfikacjach, jest zgodna z rys. 8.48.



**Rys. 8.48.** Charakterystyka przemieszczenia w czasie elementu *Stempel*

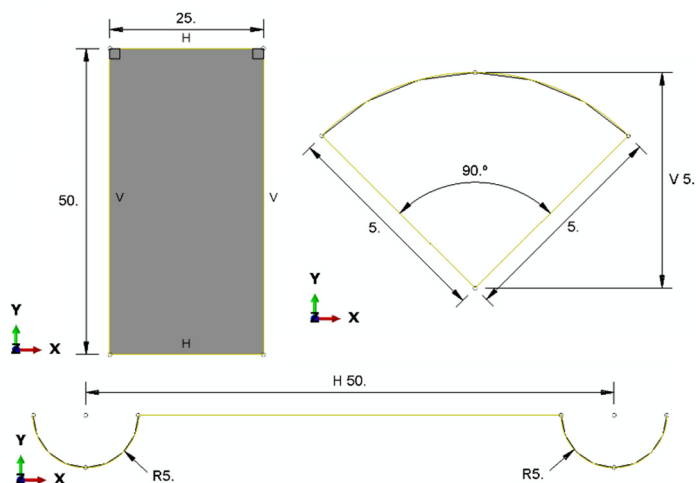
## 9. BADANIE CZTEROPUNKTOWEGO ZGINANIA KONSTRUKCJI – ZAGADNIENIE DODATKOWE

### 9.1 Wprowadzenie

Przedmiotem prowadzonej analizy numerycznej jest model numeryczny procesu czteropunktowego zginania. Badania zostaną zrealizowane w ramach obliczeń statycznych, uwzględniając relacje kontaktowe, przy wykorzystaniu zaawansowanego modelu materiałowego.

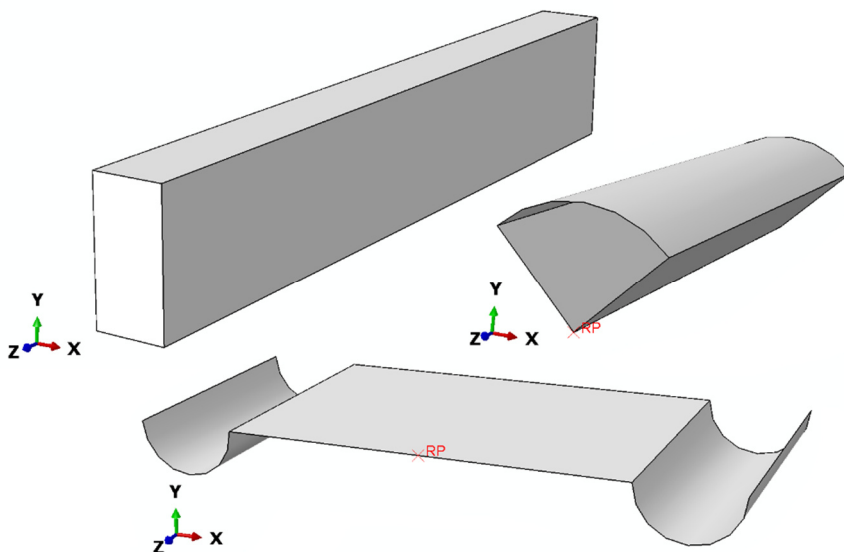
### 9.2 Budowa modelu geometrycznego – *moduł Part*

Szkic elementu *Belka* należy przygotować w ramach opcji *Create Part*, przy uwzględnieniu typu *3D, Deformable, Solid* – poprzez wyciągnięcie *Extrusion* (przygotowany szkic należy następnie wyciągnąć na 300 [mm]). Drugi model – *Podpora*, należy przygotować przy wykorzystaniu narzędzia *Create Part*, z zaznaczonymi podopcjami *3D, Analytical Rigid*, jako wyciągnięcie *Extruded shell* (przygotowany szkic należy kolejno wyciągnąć na 25 [mm]). Trzeci model – *Obciążnik*, należy przygotować przy wykorzystaniu narzędzia *Create Part*, z zaznaczonymi podopcjami *3D, Discrete Rigid, Shell* jako wyciągnięcie *Extrusion* (przygotowany szkic należy kolejno wyciągnąć na 25 [mm]).



Rys. 9.1. Sparametryzowane szkice wszystkich podzespołów

Dodatkowo konieczne jest także w ramach opcji **Tools/Reference point**, dokonanie wyboru dowolnego punktu na podspole *Podpora*, celem utworzenia punktu referencyjnego, do którego będą przypisane dalsze warunki brzegowe. W sposób analogiczny należy postąpić generując punkt referencyjny w przypadku elementu *Obciążnik*.

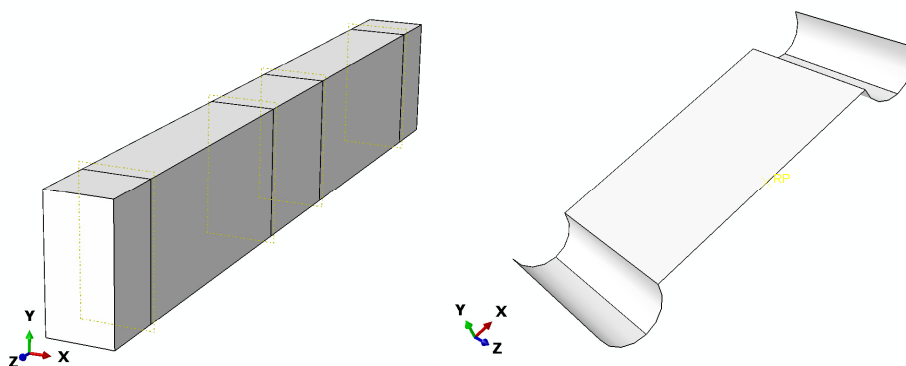


Rys. 9.2. Modele przestrzenne podspolów

W przypadku elementu *Belka*, należy wykonać kilka partycji. Początkowo wykorzystując opcję **Tools/Datum/Plane/Offset from plane** należy wybrać powierzchnię stanowiącą przekrój poprzeczny elementu. Następny etap stanowi skorzystanie z opcji **Enter Value** oraz określenie kierunku w ramach nowo generowanych płaszczyzn do podziału elementu (gdy kierunek będzie zwrócony w głąb materiału, należy wybrać poleceniem **OK**, w przeciwnym razie najpierw opcję **Flip** a następnie **OK**). Następnie należy określić wartość odsunięcia od powierzchni przekroju pierwszej płaszczyzny na odległość 25 [mm] i dokonać zatwierdzenia. Analogicznie postępując należy przygotować trzy pozostałe płaszczyzny, odległe od powierzchni przekroju odpowiednio o 125, 175 oraz 275 [mm]. Proces partycjonowania odbywa się w oparciu o wykorzystanie w ramach opcji **Partition Cell: Define Cutting Plane**, odpowiedniej podopcji **Partition Cell: Use Datum Plane**. Po wybraniu dowolnej płaszczyzny podziału, należy wykonać partycję poleceniem **Create Partition**. W analogiczny sposób konieczne jest przygotowanie pozostałych trzech partycji, przy czym należy pamiętać, że po wykonaniu pierwszej z nich, każdorazowo należy zaznaczać wstępnie cały model.

W przypadku elementu *Obciążnik* również konieczność stanowi wykonanie partycji. Proces partycjonowania odbywa się w oparciu o wykorzystanie w ramach opcji *Partition Face: Sketch*, odpowiedniej podopcji *Partition Face: Use Shortest Path Between 2 Points*. Następnie należy wybrać pierwszą powierzchnię cylindryczną oraz zaznaczyć punkt leżący na środku pierwszego łuku oraz kolejno punkt leżący na środku drugiego łuku. Analogicznie postępując należy wykonać partycję w przypadku drugiej powierzchni cylindrycznej.

Poprawnie przeprowadzony proces partycjonowania dla obydwu podzespołów przedstawiono na poniższym rysunku.



Rys. 9.3. Graficzna prezentacja elementów po partycjonowaniu

### 9.3 Definicja właściwości materiałowych – *moduł Property*

W bieżącym module, konieczne jest utworzenie modelu materiałowego z uwzględnieniem zaawansowanych właściwości. W ramach opcji *Create Material* należy określić cechy materiałowe dla materiału *Beton*. Przykładowe właściwości dla tego materiału to: *Mechanical/Elasticity/Elastic*  $E = 30268$  [MPa],  $\nu = 0.18$ . Następnie należy zdefiniować zaawansowane właściwości w ramach zakładki *Mechanical/Plasticity/Concrete Damaged Plasticity*. W pierwszej kategorii danych *Plasticity* należy nanieść dane zgodnie z poniższym rysunkiem.

Dilation Angle	Eccentricity	fb0/fc0	K	Viscosity Parameter
35	0.1	1.16	0.667	0.007985

Rys. 9.4. Dane materiałowe w ramach kategorii *Plasticity*

W drugiej kategorii danych *Compressive Behavior* oraz podopcji *Suboptions/Compression Damage* należy nanieść dane zgodnie z poniższym rysunkiem.

	Yield Stress	Inelastic Strain
1	88.821716	0
2	90.123432	0.000302
3	88.547828	0.000529
4	83.788256	0.000865
5	75.610979	0.001314
6	64.786311	0.001851
7	52.801574	0.002426
8	41.242046	0.002987
9	31.204256	0.003497
10	27.567876	0.003729

	Damage Parameter	Inelastic Strain
1	0	0
2	0	0.000302
3	0.016135	0.000529
4	0.069019	0.000865
5	0.159878	0.001314
6	0.280152	0.001851
7	0.413316	0.002426
8	0.541755	0.002987
9	0.653286	0.003497
10	0.7	0.003729

Rys. 9.5. Dane materiałowe związane z oddziaływaniem ściskania

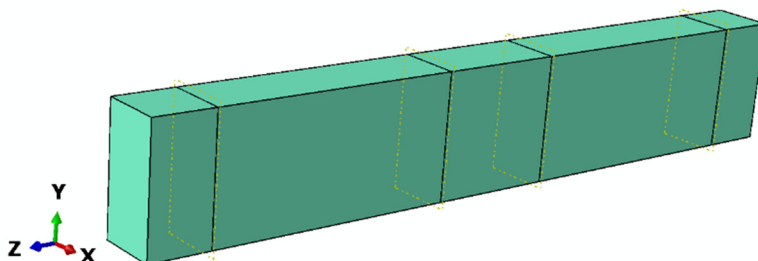
W trzeciej kategorii danych *Tensile Behavior* oraz podopcji *Suboptions/Tension Damage* należy nanieść dane zgodnie z poniższym rysunkiem.

	Yield Stress	Cracking Strain
1	10.82525	0
2	5.991675	0.000516
3	4.244932	0.00093
4	3.32409	0.001317
5	2.749788	0.001693
6	2.355023	0.002063
7	2.06581	0.002429
8	1.844154	0.002794
9	1.668467	0.003156
10	1.525541	0.003518

	Damage Parameter	Cracking Strain
1	0	0
2	0.445215	0.000516
3	0.606951	0.00093
4	0.692214	0.001317
5	0.74539	0.001693
6	0.781942	0.002063
7	0.808721	0.002429
8	0.829245	0.002794
9	0.845512	0.003156
10	0.858746	0.003518

Rys. 9.6. Dane materiałowe związane z oddziaływaniem rozciągania

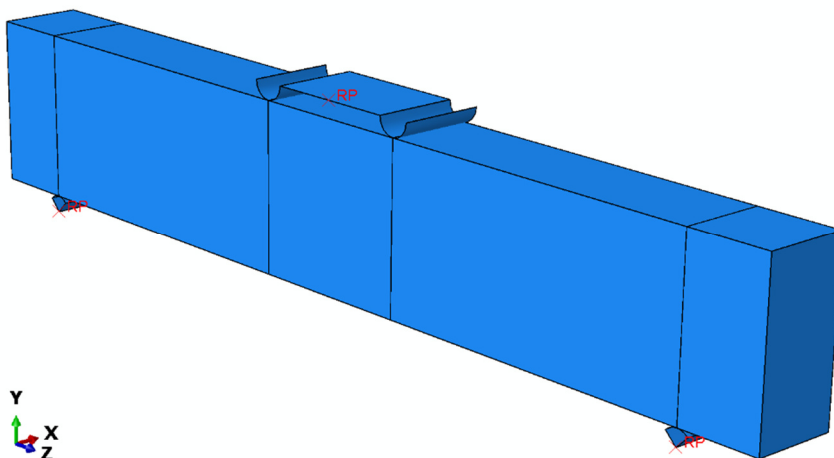
Następnie należy utworzyć sekcję materiałową, przy wykorzystaniu opcji **Create Section** o typie **Solid/Homogeneous** oraz należy przypisać utworzoną sekcję opcją **Assign Section** wyłącznie do podzespołu *Belka*.



Rys. 9.7. Model ze zdefiniowanym materiałem

## 9.4 Tworzenie instancji części – *moduł Assembly*

W ramach bieżącego modułu, niezbędne jest wczytanie podzespołów opcją **Create Instance**, przy czym dwukrotnie należy wczytać podzespół *Podpora* oraz kolejno dokonać złożenia dostępnymi narzędziami **Translate Instance** oraz **Rotate Instance**. Efekt poprawnie przygotowanego złożenia powinien być zgodny z poniższym rysunkiem.



Rys. 9.8. Złożenie modelu numerycznego



## 9.5 Definicja analizy numerycznej – *moduł Step*

W bieżącym module konieczne jest utworzenie kroku obliczeniowego o nazwie *Statyka*, poleceniem **Create Step** w kategorii **Static, General** oraz włączenie opcji **Nlgeom** stosowanej w ramach uwzględniania nieliniowości geometrycznych, występującej przy dużych odkształceniach. W zakładce **Incrementation** wartość w polu **Initial** należy zdefiniować na *0.01*.

W ramach opcji **Field Output Manager** należy wybrać dwukrotnie polecenie **Created**, gdzie kolejno z sekcji **Failure/Fracture** wybrać dodatkowo **DamageC** oraz **DamageT**, umożliwiając przyszłą wizualizację uszkodzenia materiału.

## 9.6 Interakcje modelu numerycznego – *moduł Interaction*

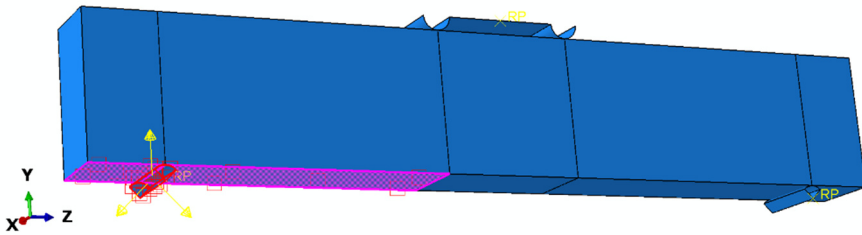
W ramach bieżącego modułu należy opcją **Create Interaction Property** zdefiniować typ kontaktu, jako **Contact** oraz w ramach dokonanego wyboru wybrać opcję **Mechanical/Tangential Behavior** i **Mechanical/Normal Behavior**.

Następnie konieczność stanowi deklaracja kontroli kontaktu w ramach zagadnienia numerycznego. W tym celu z drzewa historii tworzenia modelu, należy dwukrotnym kliknięciem na opcji **Contact Controls** wybrać polecenie **Continue** i następnie zmienić parametr na **Automatic stabilization** zatwierdzając opcją **OK**.

W dalszym etapie konieczne jest określenie obszarów współpracy podzespołów. Opcją **Create Interaction**, w ramach kroku **Step: Statyka** należy określić typ współpracy **Surface-to-surface contact**, po czym po akceptacji wybranego typu kontaktu, niezbędne jest określenie odpowiednich miejsc współpracy podzespołów.

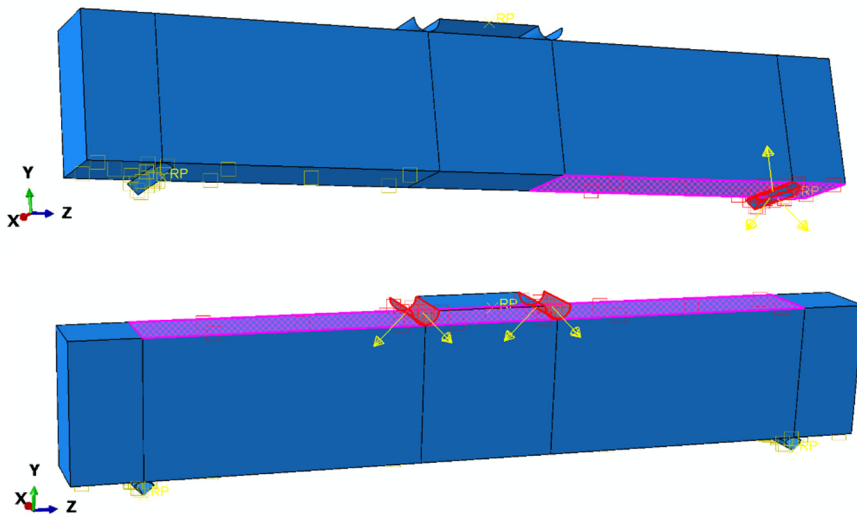
W tym celu należy dokonać zaznaczenia dowolnego elementu *Podpora* i określić odpowiedni kolor w ramach wyboru (**Brown** lub **Purple**, w zależności który z kolorów jest po stronie zewnętrznej). Wybór należy zatwierdzić opcją **Done** oraz następnie wybrać podopcję **Surface** w dolnej części okna roboczego. W dalszym kroku należy dokonać wyboru dwóch powierzchni (z klawiszem *Shift*) w ramach elementu *Belka* (przylegających do wybranego elementu *Podpora*) zatwierdzając wybór poleceniem **Done**.

W nowo otwartym oknie należy wybrać opcję **Adjust only to remove overclosure** oraz zmienić kategorię z **Contact Control: Default** na **Contact Controls: ContCtrl-1** i zatwierdzić opcją **OK**.



**Rys. 9.9.** Definicja pierwszej pary kontaktowej

W analogiczny sposób należy zdefiniować drugą parę kontaktową (między drugim elementem *Podpora* i odpowiednimi powierzchniami elementu *Belka*) oraz trzecią relację kontaktową (między elementem *Obciążnik* i odpowiednimi powierzchniami elementu *Belka*).



**Rys. 9.10.** Definicja drugiej oraz trzeciej pary kontaktowej

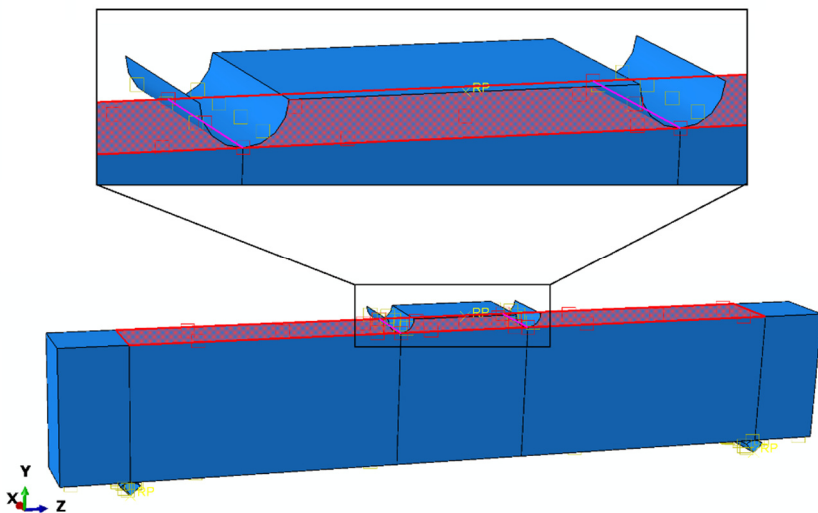
W stosunkowo analogiczny sposób konieczność stanowi przygotowanie czwartej pary kontaktowej, umożliwiającej poprawne rozpoczęcie współpracy pomiędzy podzespołami (kontakt pomiędzy górnymi powierzchniami elementu *Belka* oraz krawędziami dolnymi elementu *Obciążnik*, wygenerowanymi w zakresie początkowego partycjonowania).

Po początkowym wyborze górnych powierzchni elementu *Belka* w ramach definiowanego kontaktu, jedyną różnicą w odniesieniu do poprzednich relacji

kontaktowych jest to, iż krawędzie przynależne do elementu *Obciążnik* zostają wybierane w ramach podopcji *Node Region*.

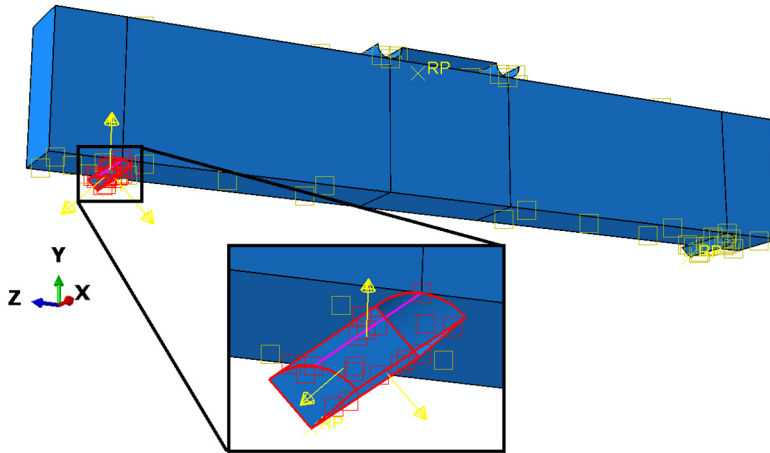
Celem poprawnego wyboru odpowiednich krawędzi elementu *Obciążnik*, należy bezpośrednio skorzystać z dostępnej opcji *Create Display Group* i podopcji *Part/Model instances* oraz metody *Pick from viewport*. Konieczne jest wybranie elementu *Obciążnik* zatwierdzając poleceniem *Done*, po czym należy użyć kolejno opcji *Replace*, zamykając okno wyboru poleceniem *Dismiss*. Po zaznaczeniu krawędzi powstałych w procesie partycjonowania, należy w dalszym etapie zakończyć definiowanie czwartej relacji kontaktowej, podobnie jak było w poprzednich przypadkach.

Po zdefiniowaniu omawianych relacji kontaktowych należy skorzystać z opcji *Replace All* w górnej części okna roboczego – celem wyświetlenia wszystkich podzespołów.

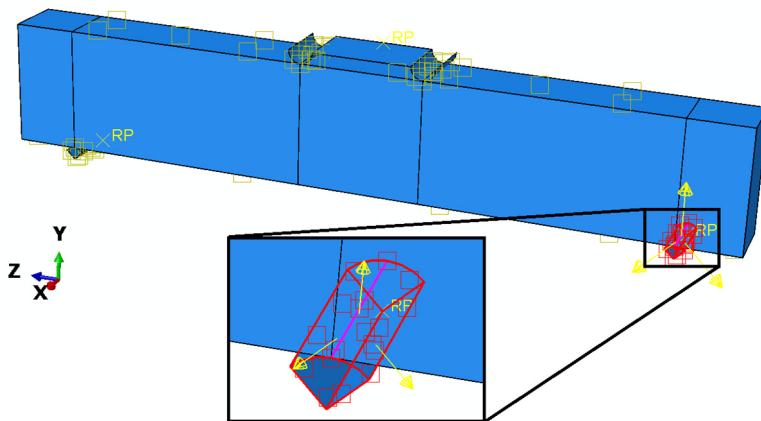


Rys. 9.11. Definicja czwartej pary kontaktowej

Dodatkowo, powinny zostać zdefiniowane jeszcze dwie pary kontaktowe, umożliwiające poprawne zainicjowanie współpracy w przypadku obciążania konstrukcji betonowej. W tym celu należy zdefiniować piątą parę kontaktową, pomiędzy pierwszym elementem *Podpora* (z określeniem koloru *Brown* lub *Purple*, w zależności który jest po stronie zewnętrznej) oraz przylegającą do niego krawędzią elementu *Belka* (w ramach opcji *Node Region*). Ostatnia para kontaktowa powinna zostać zdefiniowana w sposób analogiczny, pomiędzy drugim elementem *Podpora* i przylegającą do niego krawędzią podzespołu *Belka*. Graficzną prezentację opisanych relacji przedstawiono na poniższym rysunku.



Rys. 9.12. Definicja piątej pary kontaktowej



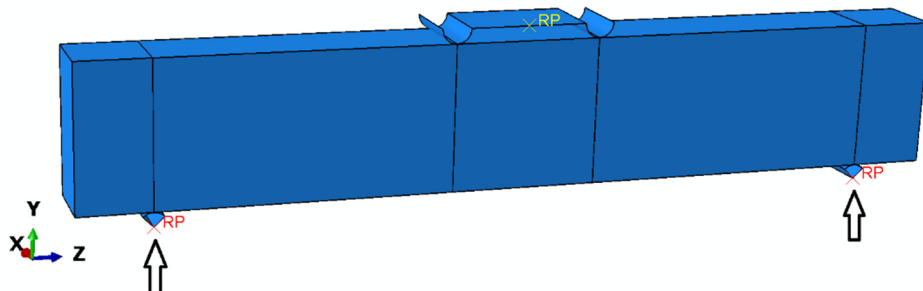
Rys. 9.13. Definicja szóstej pary kontaktowej

## 9.7 Definicja warunków brzegowych – *moduł Load*

W odniesieniu do bieżącego modułu, należy zdefiniować warunki brzegowe związane z utwierdzeniem podpór w punktach referencyjnych, zablokować odpowiednie stopnie swobody na wybranych krawędziach belki oraz zadeklarować przemieszczenie w ramach obciążnika.

Po skorzystaniu z narzędzia *Create Boundary Condition*, niezbędne jest zdefiniowanie typu warunku *Displacement/Rotation*, w kroku obliczeniowym

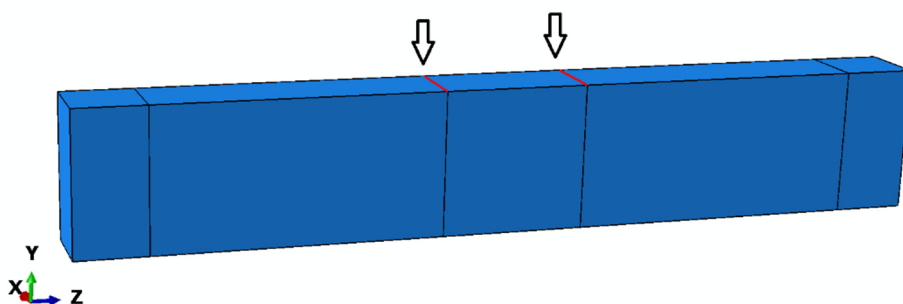
*Initial* oraz po zaakceptowaniu wyboru, konieczne jest zaznaczenie punktów referencyjnych na podporach, gdzie po akceptacji wyboru punktów, należy zablokować wszystkie stopnie swobody.



Rys. 9.14. Wybór punktów referencyjnych celem utwierdzenia elementów typu *Podpora*

Celem poprawnego wyboru odpowiednich krawędzi elementu *Belka*, należy bezpośrednio skorzystać z opcji *Create Display Group* i podopcji *Part/Model instances* oraz metody *Pick from viewport*. Konieczne jest wybranie elementu *Belka* zatwierdzając wybór poleceniem *Done*, po czym należy użyć kolejno opcji *Replace*, zamykając okno wyboru poleceniem *Dismiss*.

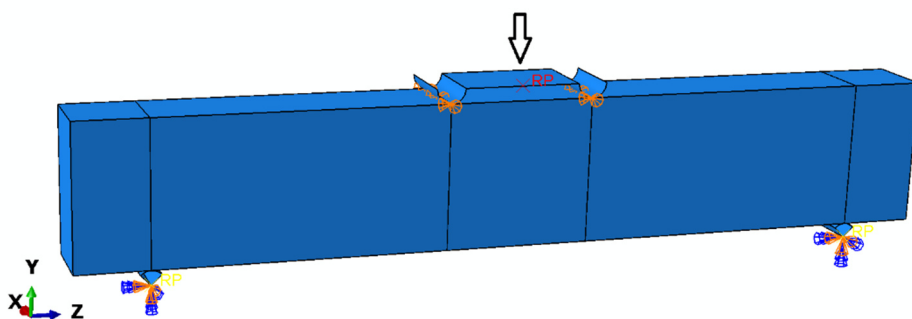
Następnie po ponownym skorzystaniu z opcji *Create Boundary Condition*, niezbędne jest wybranie typu warunku brzegowego *Displacement/Rotation*, w kroku obliczeniowym *Initial* oraz po zaakceptowaniu wyboru, zaznaczenie dwóch odcinków (na górnej powierzchni elementu *Belka*) powstałych w procesie partycjonowania i zablokowanie (po akceptacji wyboru) dwóch translacyjnych stopni swobody oznaczonych jako *U1* i *U3*, ze względu braku możliwości przemieszczania się wybranych linii na belce w kierunku osi *X* i *Z*.



Rys. 9.15. Wybór krawędzi do określenia warunku brzegowego w elemencie *Belka*

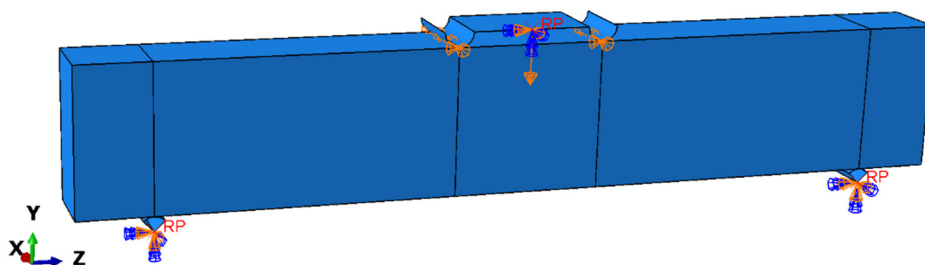
Po zdefiniowaniu omawianego warunku brzegowego, należy skorzystać z opcji **Replace All** w górnej części okna roboczego – celem wyświetlenia wszystkich podzespołów.

Przeszczenie w ramach elementu *Obciążnik* zostanie zdefiniowane przy analogicznym wykorzystaniu opcji **Create Boundary Condition**. W tym celu niezbędne jest zdefiniowanie typu warunku **Displacement/Rotation**, w kroku obliczeniowym *Statyka* oraz po zaakceptowaniu wyboru, konieczne jest zaznaczenie punktu referencyjnego. Po akceptacji wyboru omawianego punktu, należy zablokować wszystkie stopnie swobody, natomiast w ramach stopnia odpowiadającego za przemieszczenie względem osi *Y*, niezbędne jest określenie warunku brzegowego  $U2 = -2$  [mm] – co umożliwi realizację przemieszczenia elementu *Obciążnik* względem podzespołu *Belka*.



Rys. 9.16. Wybór punktu referencyjnego do deklaracji warunku przemieszczeniowego

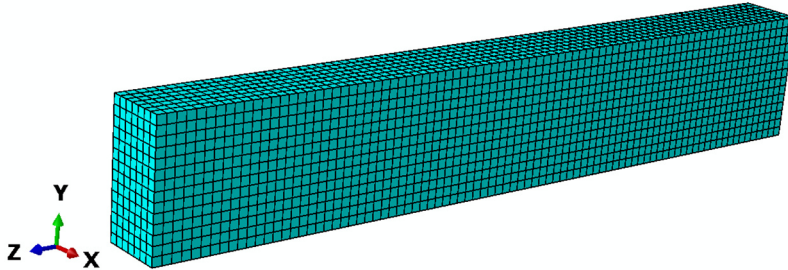
Graficzna prezentacja zdefiniowanych odpowiednio warunków brzegowych została zaprezentowana na poniższym rysunku.



Rys. 9.17. Graficzna prezentacja warunków brzegowych

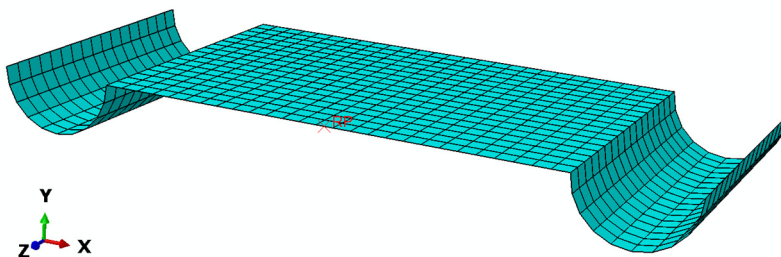
## 9.8 Budowa siatki elementów skończonych – *moduł Mesh*

W module *Mesh*, należy przejść do kategorii *Object: Part* (tak by został wyświetlony wyłącznie element *Belka*) i zdefiniować typ siatki elementu *Belka*, przy użyciu opcji *Assign Mesh Controls*. Po zaznaczeniu całego podzespołu *Belka* należy określić typ *Hex/Structured*. Zagęszczenie siatki ustawić opcją *Seed Part* na 3.5 [mm]. Przypisanie siatki odbywa się przy użyciu opcji *Mesh Part*.



Rys. 9.18. Model dyskretny elementu *Belka*

Następnie należy w ramach kategorii *Object: Part* wyświetlić element *Obciążnik* i zdefiniować typ siatki, przy użyciu opcji *Assign Mesh Controls*. Po zaznaczeniu całego podzespołu *Obciążnik* i zatwierdzeniu, należy określić typ *Quad/Free/Medial axis*. Zagęszczenie siatki ustawić opcją *Seed Part* na 1.5 [mm]. Przypisanie siatki odbywa się przy użyciu opcji *Mesh Part*.

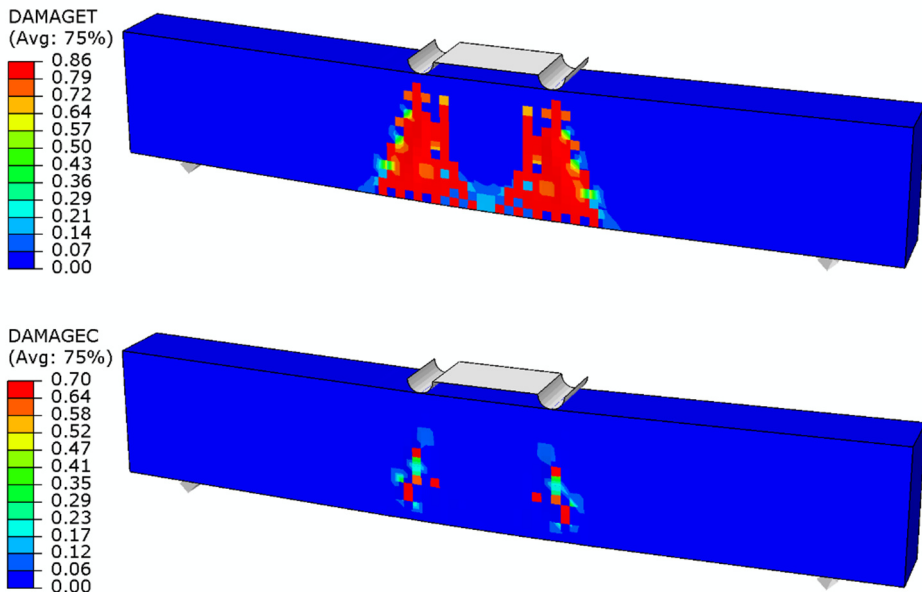


Rys. 9.19. Model dyskretny elementu *Obciążnik*

W przypadku ostatniego podzespołu *Podpora* nie występuje deklaracja siatki, zatem proces dyskretyzacji obejmuje jedynie dwa elementy układu.

## 9.9 Wykonanie obliczeń numerycznych – moduł Job

W bieżącym module konieczne jest przygotowanie zadania obliczeniowego, w ramach opcji **Create Job** oraz wybranie zakładki **Parallelization** celem ustalenia większej liczby rdzeni do obliczeń. W ramach opcji **Job Manager** należy poleceniem **Submit** uruchomić proces obliczeniowy i oczekiwać na status **Completed**. Po wykonanych obliczeniach, wykorzystując opcję **Results** i kolejno **Plot Contours on Deformed Shape** należy wyświetlić wynik uszkodzenia na skutek rozciągania i ściskania (parametry **DAMAGET** i **DAMAGEC**).

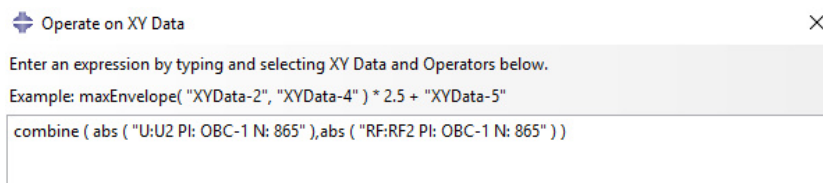


Rys. 9.20. Wynik analizy numerycznej – uszkodzenie materiału

Dodatkowo, możliwe jest wygenerowanie wykresu uzależniającego wartość obciążenia od przemieszczenia (w ramach elementu *Obciążnik*). W tym celu należy skorzystać z narzędzia **Create XY Data/ODB field output** akceptując **Continue**. Po wyborze danej opcji należy kolejno wybrać kategorie **Position: Unique Nodal**, po czym zmienną **RF2** z kategorii **RF** oraz zmienną **U2** z kategorii **U**. Następnie należy przejść do zakładki **Element/Nodes**, gdzie konieczne jest skorzystanie z opcji **Edit Selection** i dokonanie wyboru i kolejno zatwierdzenia punktu referencyjnego w ramach podzespołu *Obciążnik* i zapisanie wyboru opcją **Save** i **Dismiss**.

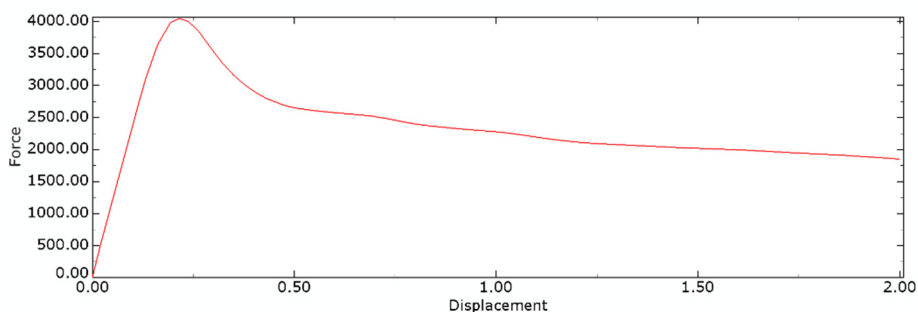


Następny etap stanowi wybór w ramach głównej opcji **Create XY Data** podopcji **Operate on XY data** i **Continue**. Celem wygenerowania wykresu obciążenia od przemieszczenia, należy wybrać polecenie **combine(X,X)** oraz **abs(A)**, po czym zaznaczyć zmienną **U:U2** i dodać ją do funkcji wykresu poleceniem **Add to Expression**. Następnie konieczne jest odseparowanie pierwszej zmiennej w ramach definiowanej funkcji odpowiednim separatorem (stanowiącym przecinek pomiędzy dwoma skrajnymi domkniętymi nawiasami w prawej części równania) oraz należy ponownie skorzystać z funkcji **abs(A)** i zaznaczyć zmienną **RF:RF2** i dodać ją do funkcji wykresu poleceniem **Add to Expression**.



Rys. 9.21. Przykładowa postać funkcji służącej wygenerowaniu wykresu

Po wybraniu opcji **Plot Expression** zostanie wygenerowany pożądany wykres.



Rys. 9.22. Wynik analizy numerycznej – wykres obciążenia od przemieszczenia

W ramach dodatkowego ćwiczenia, możliwe jest przeprowadzenie analizy w sposób dynamiczny. Należy przy tym zwrócić uwagę na wszelkie zmiany z tym związane, czyli: definicję gęstości materiału, zmianę rodzaju analizy, możliwe zmiany w relacjach kontaktowych, przedefiniowanie warunków brzegowych (zamiana przemieszczenia na prędkość) oraz zmianę typu elementów skończonych w modelu dyskretnym.

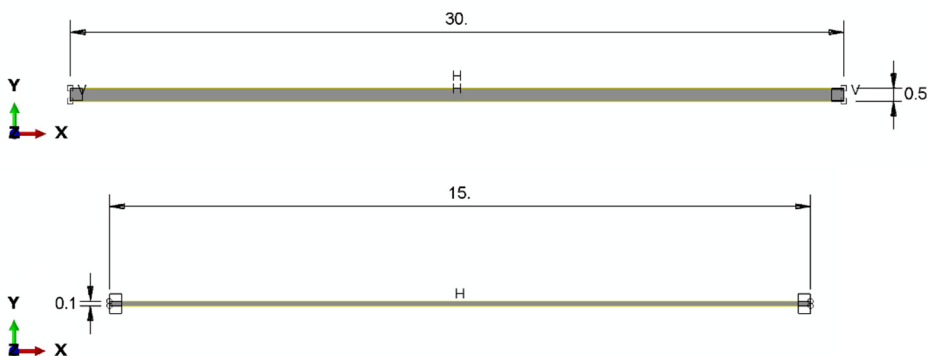
## 10. POŁĄCZENIE ADHEZYJNE – ZAGADNIENIE DODATKOWE

### 10.1 Wprowadzenie

Przedmiotem prowadzonej analizy numerycznej jest model numeryczny połączenia adhezyjnego (zakładkowego). Badania numeryczne zostaną zrealizowane na dwa sposoby (wykorzystanie elementów kohezyjnych lub warstwy kohezyjnej w ramach współpracujących powierzchni) w ramach obliczeń statycznych, uwzględniając niezbędne interakcje, z wykorzystaniem zaawansowanego modelu materiałowego.

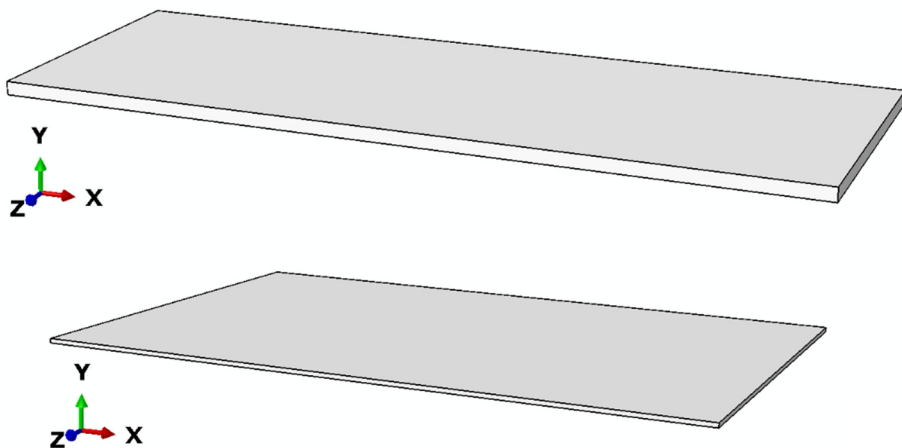
### 10.2 Budowa modelu geometrycznego – *moduł Part*

Szkic elementu *Probka* oraz *Klej*, należy przygotować w ramach opcji *Create Part*, przy uwzględnieniu typu *3D, Deformable, Solid* – poprzez wyciągnięcie *Extrusion* (obydwa szkice należy następnie wyciągnąć na 10 [mm]). Graficzna prezentacja sparametryzowanych szkiców została zaprezentowana na poniższym rysunku, gdzie szkic pierwszy dotyczy elementu *Probka*, natomiast drugi element *Klej*, stanowi docelowo warstwę kleju w ramach przygotowanego połączenia.



Rys. 10.1. Sparametryzowane szkice podzespołów

Graficzna prezentacja elementów przestrzennych została zaprezentowana na rys. 10.2.



Rys. 10.2. Modele przestrzenne

### 10.3 Definicja właściwości materiałowych – moduł Property

W bieżącym module, konieczne jest przygotowanie osobnych modeli materiałowych dla obydwu obiektów. W ramach opcji **Create Material** należy początkowo zdefiniować cechy materiałowe dla materiału *Stal*. Przykładowe właściwości definiowane w ramach narzędzia: **Mechanical/Elasticity/Elastic** stanowią  $E = 210000$  [MPa],  $\nu = 0.3$ . Następnie należy zdefiniować właściwości plastyczne w ramach opcji **Mechanical/Plasticity/Plastic** zgodnie z poniższym rysunkiem.

Yield Stress	Plastic Strain
360	0
510	0.2

Rys. 10.3. Dane materiałowe w ramach opcji *Plastic*

Po poprawnym określeniu parametrów materiałowych dla materiału *Stal* oraz akceptacji wprowadzonych danych, należy kolejno przygotować drugi model materiałowy, związany z warstwą zamodelowanego kleju. Ponownie wykorzystując opcję **Create Material** należy zdefiniować cechy materiałowe dla materiału *Klej*. Przykładowe właściwości sprężyste definiowane w ramach narzędzia: **Mechanical/Elasticity/Elastic** z uwzględnieniem dodatkowej opcji

**Type: Traction**, stanowią sztywność na kierunku normalnym  $E/Enn = 10000$  [N/mm<sup>3</sup>] oraz na kierunku stycznym (na ścinanie)  $G1/Ess = 5000$  [N/mm<sup>3</sup>] i  $G2/Ett = 5000$  [N/mm<sup>3</sup>]. Następnie należy zdefiniować właściwości niszczące z użyciem narzędzia **Mechanical/Damage for Traction Separation Laws/Maxs Damage** zgodnie z poniższym rysunkiem.

Nominal Stress Normal-only Mode	Nominal Stress First Direction	Nominal Stress Second Direction
50	25	25

Rys. 10.4. Dane materiałowe w ramach opcji *Maxs Damage*

W kolejnym kroku należy zdefiniować właściwości odpowiadające za ewolucję uszkodzenia materiału, wykorzystując narzędzie **Suboptions/Damage Evolution**. W ramach ewolucji uszkodzenia konieczność stanowi określenie typu uszkodzenia **Type: Energy**, przy jednoczesnym wprowadzeniu niezbędnego parametru uszkodzenia, zgodnie z poniższym rysunkiem.

Fracture Energy
0.24

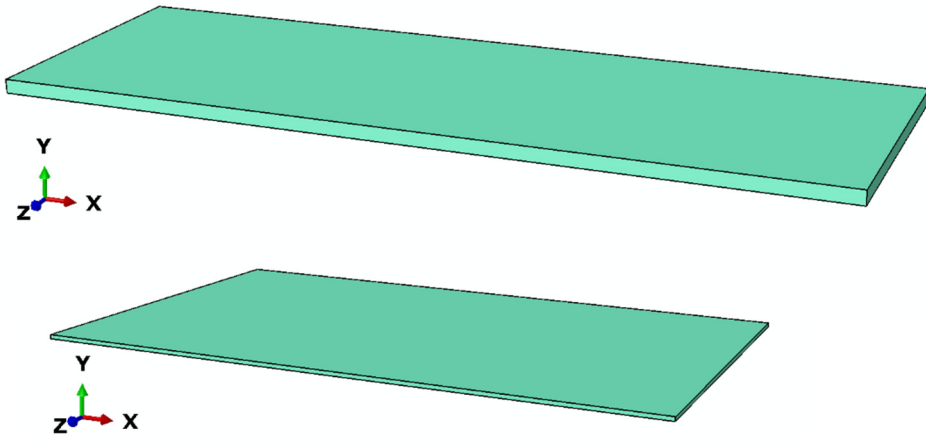
Rys. 10.5. Parametr ewolucji uszkodzenia

Ostatni parametr, odpowiadający za stabilizację modelu materiałowego w ramach modelowanego zagadnienia, należy zdefiniować zgodnie z poniższym rysunkiem, wykorzystując opcję **Suboptions/Damage Stabilization Cohesive**.

Viscosity coefficient:	0.0001
------------------------	--------

Rys. 10.6. Parametr stabilizacji uszkodzenia

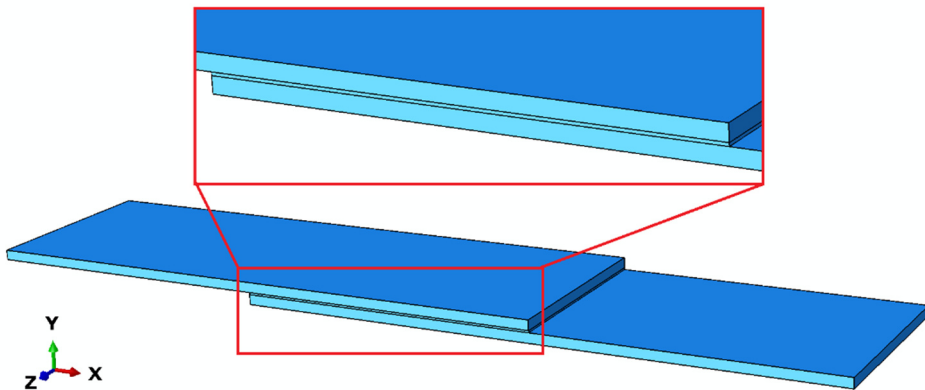
Następnie należy utworzyć różne sekcje materiałowe dla obydwu materiałów. Wykorzystując opcję **Create Section** oraz narzędzie **Solid/Homogeneous** należy dokonać poprawnego wyboru materiału *Stal*. Kolejny etap stanowi przypisanie utworzonej sekcji opcją **Assign Section** do podzespołu *Probka*. Ponownie wykorzystując opcję **Create Section** oraz kolejno **Other/Cohesive** należy dokonać wyboru materiału *Klej* wraz z opcją **Traction Separation**. Ostatni krok stanowi przypisanie utworzonej sekcji opcją **Assign Section** do elementu *Klej*.



Rys. 10.7. Modele ze zdefiniowanymi materiałami

#### 10.4 Tworzenie instancji części – *moduł Assembly*

W ramach bieżącego modułu niezbędne jest wczytanie podzespołów opcją *Create Instance*, przy czym dwukrotnie należy wczytać podzespół *Probka* oraz kolejno dokonać złożenia dostępnymi narzędziami *Translate Instance* oraz *Rotate Instance*. Efekt poprawnie przygotowanego złożenia powinien być zgodny z poniższym rysunkiem.



Rys. 10.8. Złożenie modelu numerycznego

## 10.5 Definicja analizy numerycznej – *moduł Step*

W bieżącym module konieczne jest utworzenie kroku obliczeniowego o nazwie *Statyka*, poleceniem **Create Step** w kategorii **Static, General** oraz włączenie opcji **Nlgeom** stosowanej w ramach uwzględniania nieliniowości geometrycznych, występującej przy dużych odkształceniach. Dodatkowo, należy uwzględnić stabilizację zagadnienia numerycznego z wykorzystaniem opcji **Automatic stabilization: Specify dissipated energy fraction** z ustawieniami domyślnymi. W zakładce **Incrementation** należy zdefiniować niezbędne parametry kroku obliczeniowego: **Maximum number of increments: 300**, **Increment size (Initial): 0.01** oraz **Increment size (Minimum): 1E-06**.

W ramach opcji **Field Output Manager** należy wybrać dwukrotnie polecenie **Created**, gdzie kolejno z sekcji **Failure/Fracture** wybrać dodatkowo **SDEG** oraz z sekcji **State/Field/User/Time** wybrać podopcję **STATUS** umożliwiającą przyszłą wizualizację uszkodzenia materiału.

## 10.6 Interakcje modelu numerycznego – *moduł Interaction*

W ramach bieżącego modułu należy zdefiniować relacje pomiędzy łączonymi elementami *Probka* oraz *Klej*. W tym celu konieczność stanowi wykorzystanie opcji **Create Constraint** przy zdefiniowaniu typu relacji złącznej jako **Tie**, gdzie po akceptacji wyboru relacji, niezbędne jest określenie odpowiednich miejsc współpracy podzespołów.

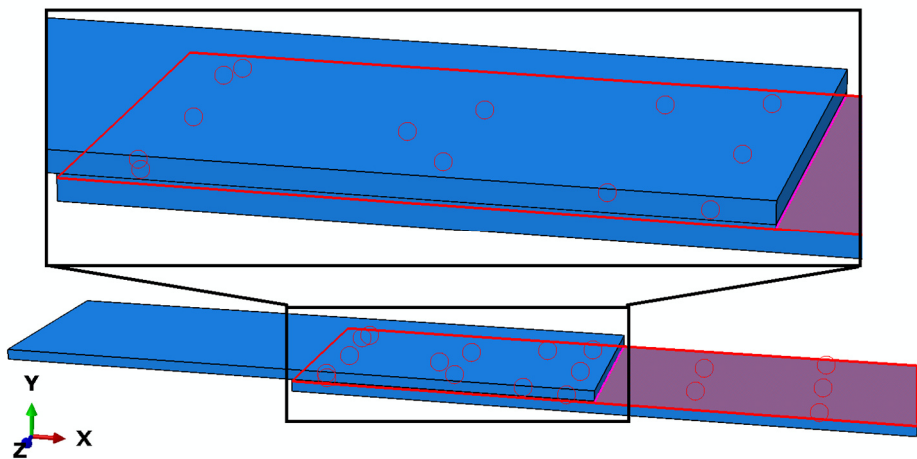
W tym celu należy wybrać podopcję **Surface** oraz dokonać zaznaczenia górnej powierzchni w ramach dolnego elementu *Probka* i zatwierdzić opcją **Done**.

W ramach poprawnej możliwości wyboru odpowiedniej powierzchni elementu *Klej*, należy bezpośrednio skorzystać z dostępnej opcji **Create Display Group** i podopcji **Part/Model instances** oraz metody **Pick from viewport**. Konieczne jest wybranie elementu *Klej* zatwierdzając poleceniem **Done**, po czym należy użyć kolejno opcji **Replace**, zamykając okno wyborem poleceniem **Dismiss**.

Następnie należy ponownie wybrać podopcję **Surface** w dolnej części okna roboczego oraz zaznaczyć dolną powierzchnię w ramach elementu *Klej* (która bezpośrednio przylega do uprzednio wybranej powierzchni elementu *Probka*), zatwierdzając wybór poleceniem **Done**.

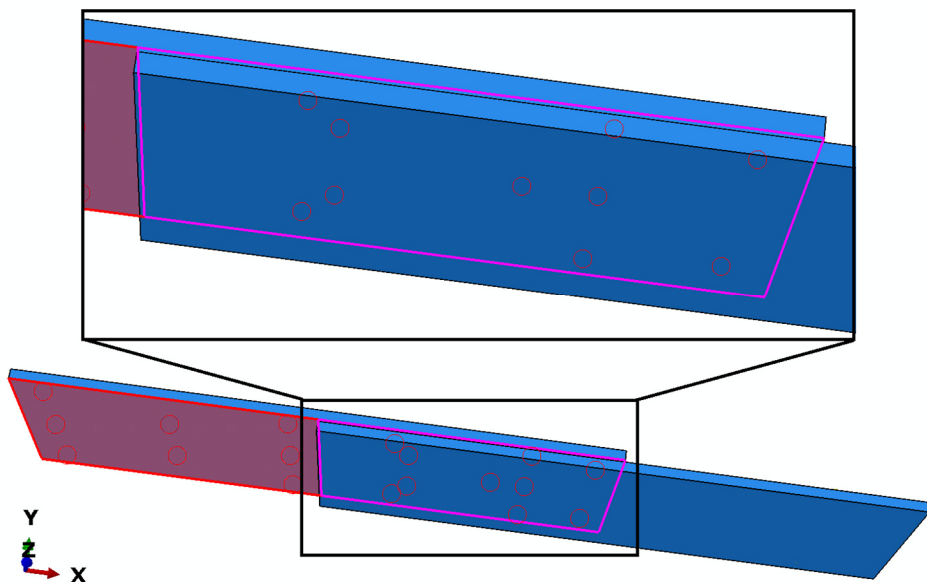
Nowo otwarte okno definiowanej relacji należy zaakceptować z ustawieniami domyślnymi poleceniem **OK**.

Po zdefiniowaniu relacji typu **Tie**, należy skorzystać z opcji **Replace All** w górnej części okna roboczego – celem wyświetlenia wszystkich podzespołów.



Rys. 10.9. Definicja pierwszej relacji typu *Tie*

W analogiczny sposób należy zdefiniować drugą relację złączną typu *Tie* (pomiędzy dolną powierzchnią górnego elementu *Probka* i górną powierzchnią elementu *Klej*).

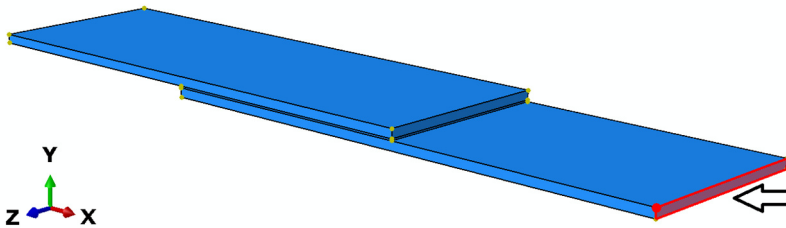


Rys. 10.10. Definicja drugiej relacji typu *Tie*

## 10.7 Definicja warunków brzegowych – moduł Load

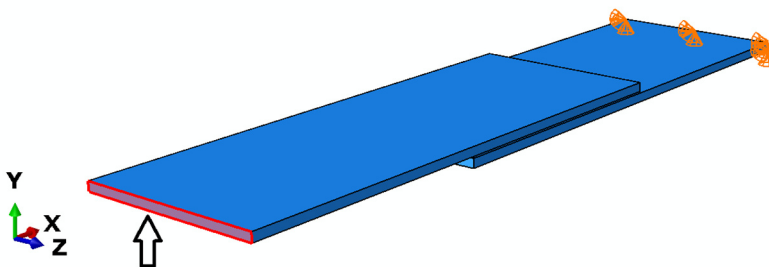
W odniesieniu do bieżącego modułu, należy zdefiniować warunki brzegowe związane z utwierdzeniem jednej powierzchni pierwszego elementu *Probka* i zadeklarowaniem przemieszczenia w przypadku drugiego elementu *Probka*.

Po skorzystaniu z narzędzia *Create Boundary Condition*, niezbędne jest zdefiniowanie typu warunku *Displacement/Rotation*, w kroku obliczeniowym *Initial* oraz po zaakceptowaniu wyboru, konieczne jest zaznaczenie skrajnej (znajdującej się po prawej stronie) powierzchni elementu *Probka*, gdzie po akceptacji wyboru powierzchni, należy zablokować wszystkie translacyjne stopnie swobody  $U1$ ,  $U2$  i  $U3$ .



Rys. 10.11. Wybór powierzchni do warunku utwierdzenia

Następnie po ponownym skorzystaniu z opcji *Create Boundary Condition*, niezbędne jest wybranie typu warunku brzegowego *Displacement/Rotation*, w kroku obliczeniowym *Statyka* oraz po zaakceptowaniu wyboru, zaznaczenie skrajnej powierzchni drugiego elementu *Probka* (znajdującej się po lewej stronie) (na górnej powierzchni elementu). Po akceptacji wyboru, należy zablokować dwa translacyjne stopnie swobody oznaczone jako  $U2$  i  $U3$ , natomiast w ramach pierwszego stopnia swobody, należy określić przemieszczenie  $U1 = -1.5$  [mm].

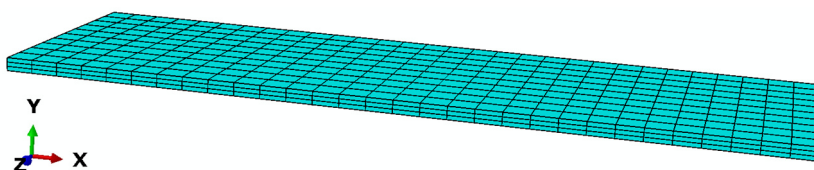


Rys. 10.12. Wybór powierzchni do warunku przemieszczenia



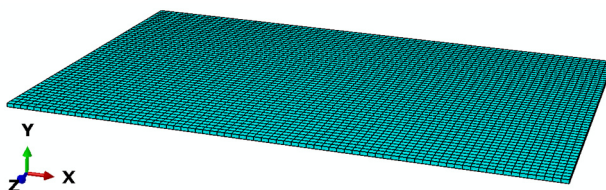
## 10.8 Budowa siatki elementów skończonych – moduł *Mesh*

W module *Mesh*, należy przejść do kategorii **Object: Part** (tak by został wyświetlony wyłącznie element *Probka*) i zdefiniować typ siatki elementu *Probka*, przy wykorzystaniu narzędzia *Assign Mesh Controls* definiując rodzaj **Hex/Structured**. Zagęszczenie globalne siatki opcją **Seed Part** należy określić na 1 [mm]. Dodatkowo, należy zagęścić siatkę lokalnie, z wykorzystaniem opcji **Seed Edges**, po czym należy wybrać dowolną pionową krawędź (stanowiącą grubość podzespołu) i określić ilość elementów skończonych na grubości opcją **Basic/Method/By number** na wartość 3. Przypisanie siatki odbywa się przy użyciu opcji **Mesh Part**.



Rys. 10.13. Model dyskretny elementu *Probka*

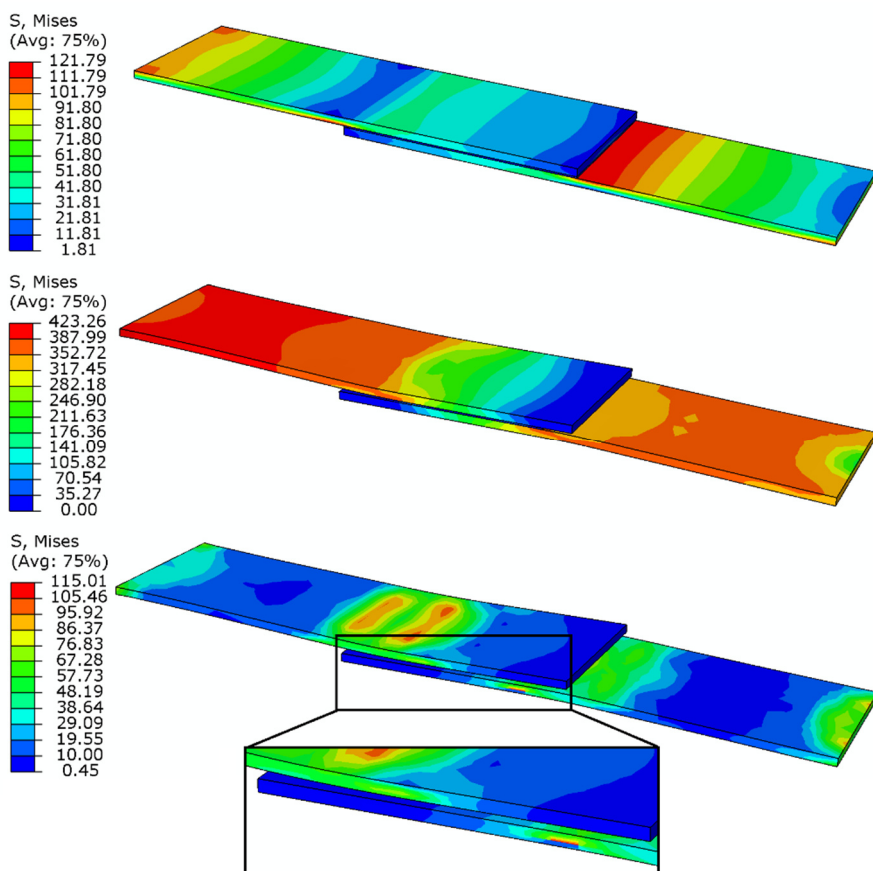
Następnie należy w ramach kategorii **Object: Part** wyświetlić element *Klej* i zdefiniować typ siatki, przy wykorzystaniu analogicznych opcji, poza użyciem narzędzia do zagęszczenia lokalnego **Seed Edges**. W przypadku narzędzia **Seed Part** należy siatkę zagęścić globalnie na 0.2 [mm]. W ramach opcji **Assign Stack Direction** należy zaznaczyć górną powierzchnię modelu przestrzennego i zatwierdzić opcją **Yes**. Dodatkowo, konieczność stanowi zmiana rodzaju elementów skończonych w ramach obiektu *Klej*. W tym celu, należy skorzystać z narzędzia **Assign Element Type**, gdzie po zaznaczeniu i zatwierdzeniu zaznaczenia modelu przestrzennego, niezbędne jest zdefiniowanie rodzaju elementu **Cohesive**, przy ustaleniu parametrów **Viscosity: Specify** na wartość 0.0001 oraz **Element Deletion: Yes**. Po zatwierdzeniu ustawień, pozostałe czynności związane z definicją modelu dyskretnego pozostają bez zmian.



Rys. 10.14. Model dyskretny elementu *Klej*

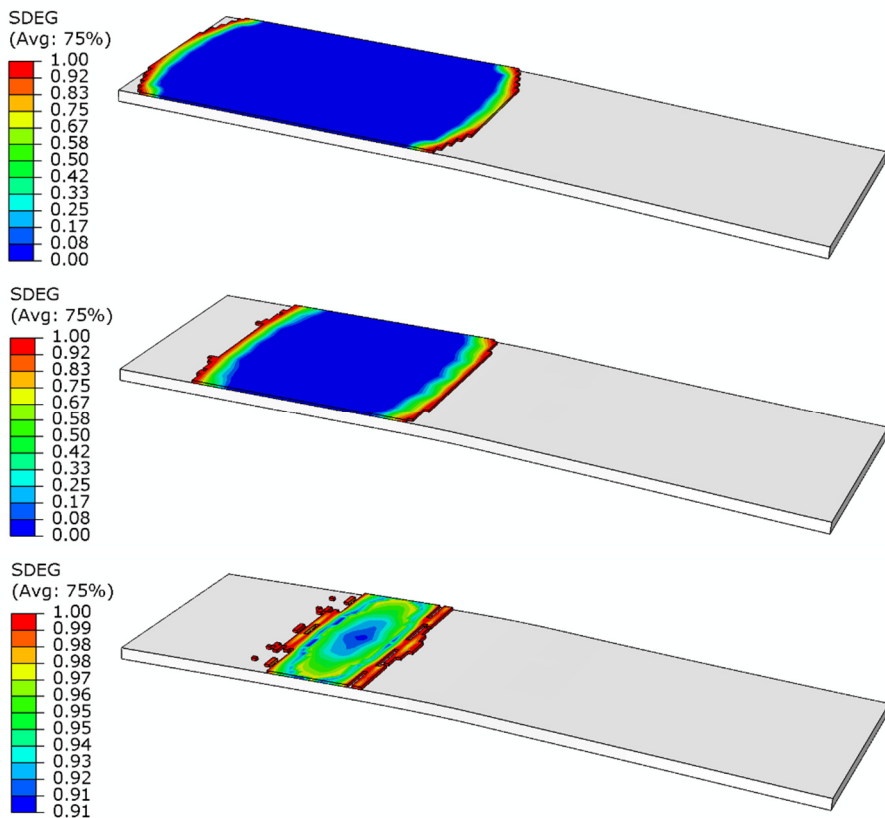
## 10.9 Wykonanie obliczeń numerycznych – moduł Job

W bieżącym module konieczne jest przygotowanie zadania obliczeniowego, w ramach opcji **Create Job** oraz wybranie zakładki **Parallelization** w celu ustalenia większej liczby rdzeni do obliczeń. W ramach opcji **Job Manager** należy poleceniem **Submit** uruchomić proces obliczeniowy i oczekiwać na status **Completed**. Po wykonanych obliczeniach, wykorzystując opcję **Results** i kolejno **Plot Contours on Deformed Shape** należy bezpośrednio wyświetlić wynik naprężeń (parametr  $S$ ). Wynik rozkładu naprężeń przedstawiono w kilku etapach, początkowej, pośredniej i końcowej fazie obciążania układu.



Rys. 10.15. Wynik analizy numerycznej – rozkład naprężeń

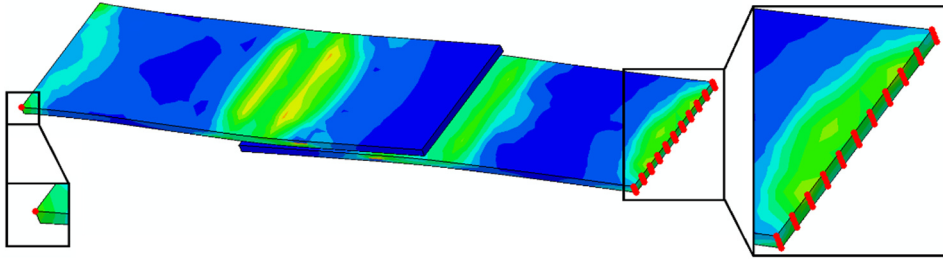
Wynik postępującego uszkodzenia połączenia adhezyjnego (parametr  $SDEG$ ) zaprezentowano również w trzech etapach, z ukryciem górnego elementu *Probka*.



**Rys. 10.16.** Wynik analizy numerycznej – uszkodzenie warstwy kohezcyjnej

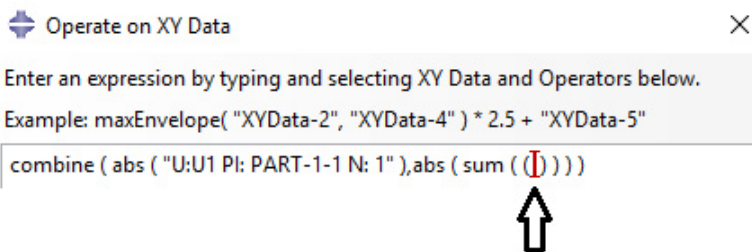
Dodatkowo, możliwe jest wygenerowanie wykresu uzależniającego wartość obciążenia od przemieszczenia (w ramach elementów *Probka*). W tym celu należy skorzystać z narzędzia **Create XY Data/ODB field output** akceptując **Continue**. Po wyborze danej opcji należy kolejno wybrać kategorie **Position: Unique Nodal**, po czym zmienną *RF1* z kategorii *RF*. Następnie należy przejść do zakładki **Element/Nodes**, gdzie konieczne jest skorzystanie z opcji **Edit Selection/Pick from viewport**. Następnie należy dokonać wyboru wszystkich (dokładnie 44) węzłów obliczeniowych na powierzchni utwierdzenia w ramach odpowiedniego modelu *Probka*, po czym zatwierdzenia wyboru i zapisania opcją **Save**.

Następnie należy wybrać zakładkę **Variables** i odznaczyć zmienną *RF1*, natomiast zaznaczyć zmienną *UI* z kategorii *U*. Kolejno należy przejść do zakładki **Element/Nodes**, gdzie konieczne jest skorzystanie z opcji **Edit Selection/Pick from viewport**. Następnie należy zaznaczyć dowolny węzeł na powierzchni poddanej przemieszczeniu w ramach odpowiedniego modelu *Probka* po czym zatwierdzenia wyboru i zapisania opcją **Save** i **Dismiss**.



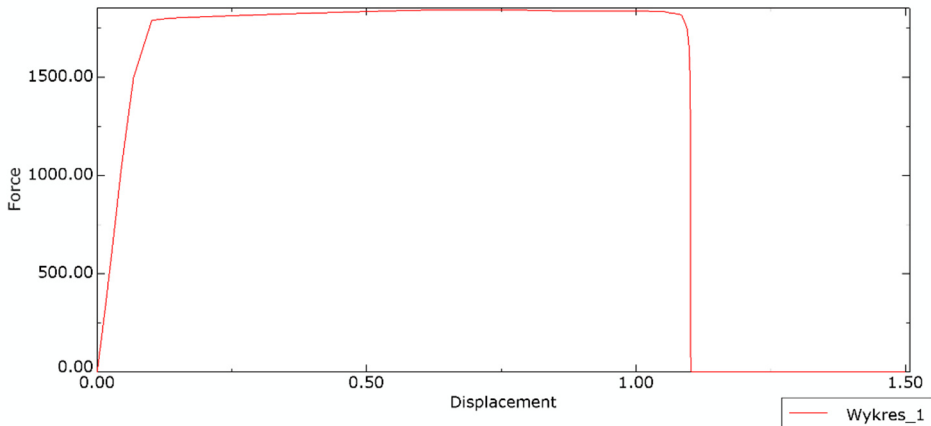
**Rys. 10.17.** Wybór zbioru węzłów w ramach zmiennej *RF1* oraz wybór pojedynczego węzła w przypadku zmiennej *U1*

Następny etap stanowi wybór w ramach głównej opcji **Create XY Data** podopcji **Operate on XY data** i **Continue**. W celu wygenerowania wykresu obciążenia od przemieszczenia, należy wybrać polecenie **combine(X,X)** oraz **abs(A)**, po czym zaznaczyć zmienną *U:U1* i dodać ją do funkcji wykresu poleceniem **Add to Expression**. Następnie konieczne jest odseparowanie pierwszej zmiennej w ramach zdefiniowanej funkcji odpowiednim separatorem (stanowiącym przecinek pomiędzy dwoma skrajnymi domkniętymi nawiasami w prawej części równania) oraz należy ponownie skorzystać z funkcji **abs(A)** i funkcji **sum((A,A,...))**. Po wyborze omawianych funkcji należy zaznaczyć jednocześnie wszystkie parametry *RF:RF1*, po czym dodać je do funkcji wykresu poleceniem **Add to Expression** oraz zapisać wykres opcją **Save As** jako *Wykres\_1* i zatwierdzić poleceniem **OK**.



**Rys. 10.18.** Przykładowa postać funkcji służącej wygenerowaniu wykresu, z wyszczególnieniem obszaru do wstawienia wszystkich parametrów *RF1*

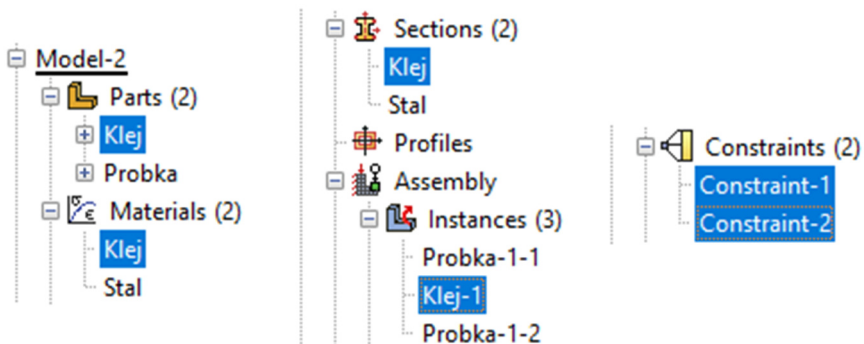
Po skorzystaniu z dostępnego narzędzia **Plot Expression** możliwe będzie wygenerowanie pożądanego wykresu. Graficzna prezentacja charakterystyki obciążenia (jako reakcji) uzależnionego od przemieszczenia będzie zgodna z poniższym rysunkiem.



**Rys. 10.19.** Wynik analizy numerycznej – wykres obciążenia od przemieszczenia

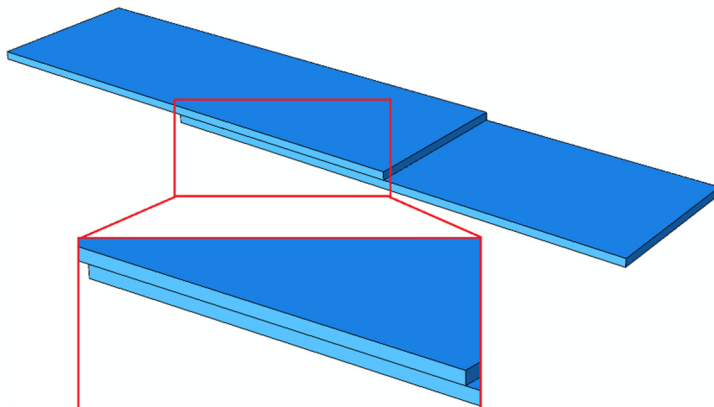
Po poprawnym wygenerowaniu wykresu, należy wybrać narzędzie *XY Data Manager*, po czym zaznaczyć wszystkie parametry, poza nazwą *Wykres\_1* i je usunąć poleceniem *Delete* i zakończyć edycję opcją *Dismiss*.

Następny etap stanowi modyfikacja przygotowanego modelu numerycznego, w celu zastąpienia zamodelowanej warstwy kleju, inną metodą wykonania połączenia adhezyjnego, w ramach deklaracji powierzchni kohezyjnych. W drzewie historii tworzenia modelu należy skopiować model o nazwie *Model-1* (prawym klawiszem myszy w ramach opcji *Copy Model*) zdefiniować nową nazwę *Model-2* i zatwierdzić opcją *OK*. Nowy model powinien zawierać podkreślenie pod nazwą (*Model-2*) – co oznacza możliwość jego modyfikacji. Istotny etap stanowi usunięcie z drzewa historii: geometrii, właściwości i relacji związanych z modelem *Klej*, zgodnie z poniższym rysunkiem.



**Rys. 10.20.** Prezentacja wybranych składowych drzewa historii do usunięcia

Następny etap stanowi modyfikacja złozenia w module *Assembly*. Z uwagi na usunięcie obiektu stanowiącego warstwę kleju, należy złączyć ze sobą obydwie elementy o nazwie *Probka*, w sposób przedstawiony na poniższym rysunku.



Rys. 10.21. Modyfikacja złozenia

Następnie w module *Step* należy w ramach opcji *Field Output Manager* wybrać dwukrotnie polecenie *Created*, gdzie kolejno z sekcji *Failure/Fracture* wybrać dodatkowo opcję *CSDMG*, umożliwiając w ten sposób wizualizację uszkodzenia w strefie kohezynnej (na styku współpracujących powierzchni).

Znaczne zmiany w przeciwieństwie do pierwszego modelu numerycznego należy wprowadzić w module *Interaction*. Początkowo, należy skorzystać z narzędzia *Create Interaction Property*, po czym wybrać rodzaj interakcji *Contact* i zatwierdzić wybór poleceniem *Continue*. W nowo otwartym oknie konieczność stanowi deklaracja relacji kontaktowych *Mechanical/Tangential Behavior* oraz *Mechanical/Normal Behavior* z ustawieniami domyślnymi. Dodatkowo należy wybrać opcję *Mechanical/Damage*, gdzie przy ustawionym kryterium *Criterion: Maximum nominal stress*, należy nanieść wartości naprężeń zgodnie z poniższym rysunkiem.

Normal Only	Shear-1 Only	Shear-2 Only
50	25	25

Rys. 10.22. Parametry inicjacji uszkodzenia

Następnie należy wybrać opcję *Specify damage evolution*, zaznaczyć opcję *Type: Energy* i nanieść parametr uszkodzenia zgodnie z poniższym rysunkiem.

<b>Fracture Energy</b>
0.24

Rys. 10.23. Parametr ewolucji uszkodzenia

Kolejny krok stanowi wybranie opcji *Specify damage stabilization* oraz wprowadzenie parametru stabilizacji uszkodzenia, zgodnie z poniższym rysunkiem.

Viscosity coefficient:

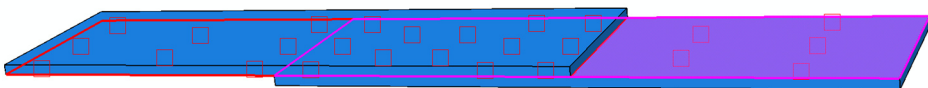
Rys. 10.24. Parametr stabilizacji uszkodzenia

Ostatni etap stanowi deklaracja parametrów opisujących sztywność na kierunku normalnym i stycznym (na ścinanie) z wykorzystaniem narzędzia *Mechanical/Cohesive Behavior*. Po zaznaczeniu opcji *Specify stiffness coefficients* należy wprowadzić wartości współczynników zgodnie z poniższym rysunkiem.

<b>Knn</b>	<b>Kss</b>	<b>Ktt</b>
10000	5000	5000

Rys. 10.25. Współczynniki sztywności

Wszelkie definiowane właściwości należy zatwierdzić poleceniem *OK*. Następnie należy również zdefiniować obszar w ramach relacji kontaktowej z wykorzystaniem narzędzia *Create Interaction* w kroku *Initial* oraz w ramach opcji *Surface-to-surface contact* oraz zatwierdzić wybór relacji poleceniem *Continue*. Definicję pary kontaktowej, należy rozpocząć od wyboru dowolnej powierzchni styku (między elementami współpracującymi) pierwszego elementu *Probka*, akceptacji opcją *Done* i w ramach opcji *Surface* zaznaczenia drugiej współpracującej powierzchni oraz akceptacji poleceniem *Done*, w ramach drugiego elementu *Probka*.

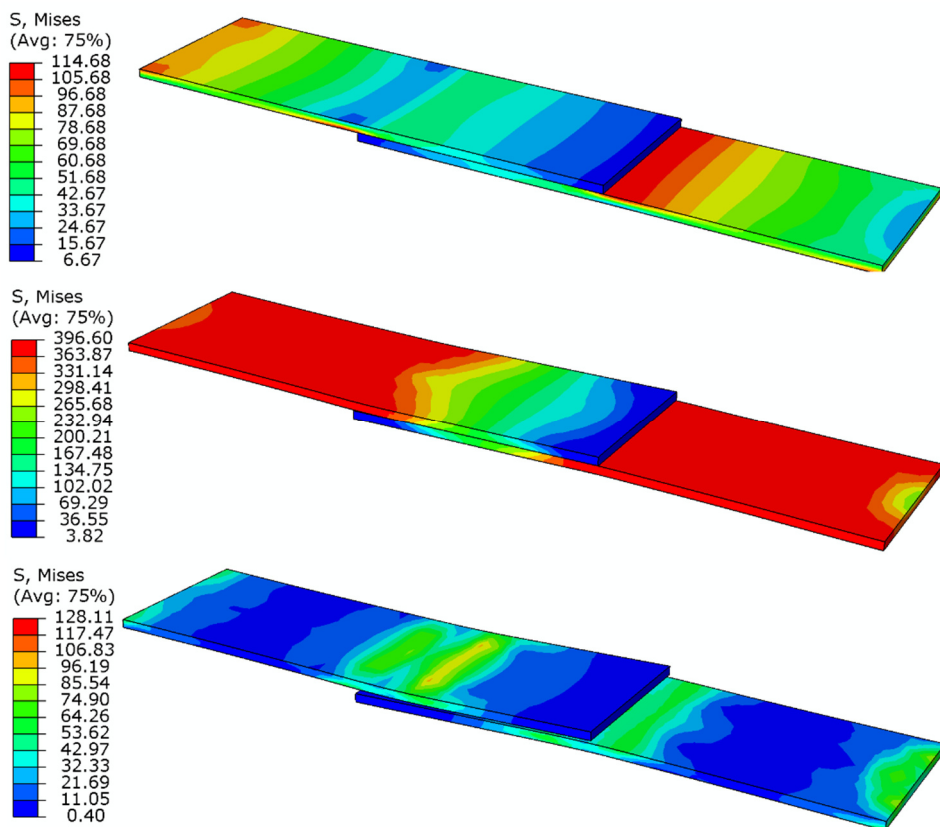


Rys. 10.26. Definicja relacji kontaktowej

W nowo otwartym oknie, konieczność stanowi wyłącznie zmiana opcji *Sliding formulation: Finite sliding* na *Sliding formulation: Small sliding* i akceptację relacji kontaktowej poleceniem *OK*.

Ostatni etap stanowi przejście do modułu *Job* oraz uruchomienie zadania obliczeniowego, w sposób analogiczny do pierwszego przypadku, z deklaracją innej nazwy zadania obliczeniowego.

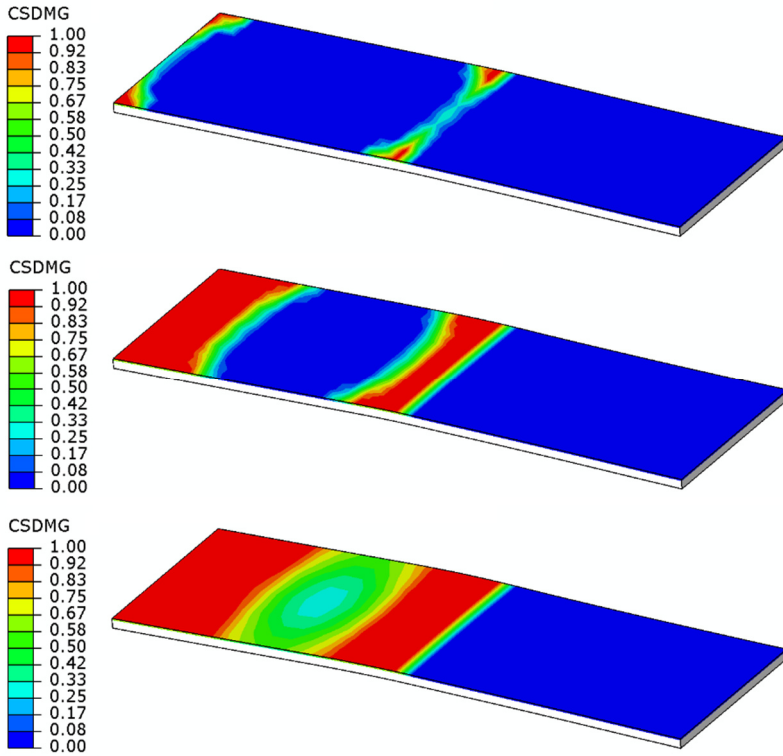
Po zakończeniu obliczeń należy wyświetlić otrzymane rezultaty analizy numerycznej, analogicznie jak w ramach pierwszych obliczeń numerycznych, zarówno w odniesieniu do otrzymanego rozkładu naprężeń (parametr *S*) jak i poziomu uszkodzenia (parametr *CSDMG*).



Rys. 10.27. Wynik analizy numerycznej – rozkład naprężeń

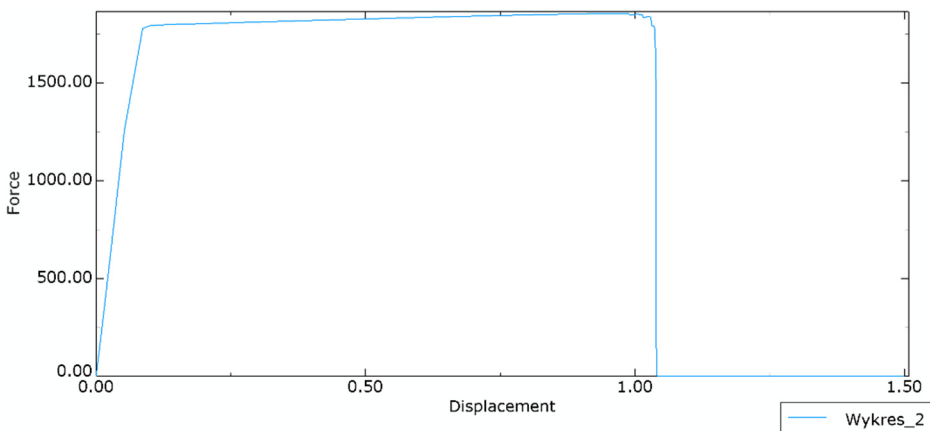
Graficzną prezentację uszkodzenia powierzchni kohezijnej zaprezentowano na poniższym rysunku.





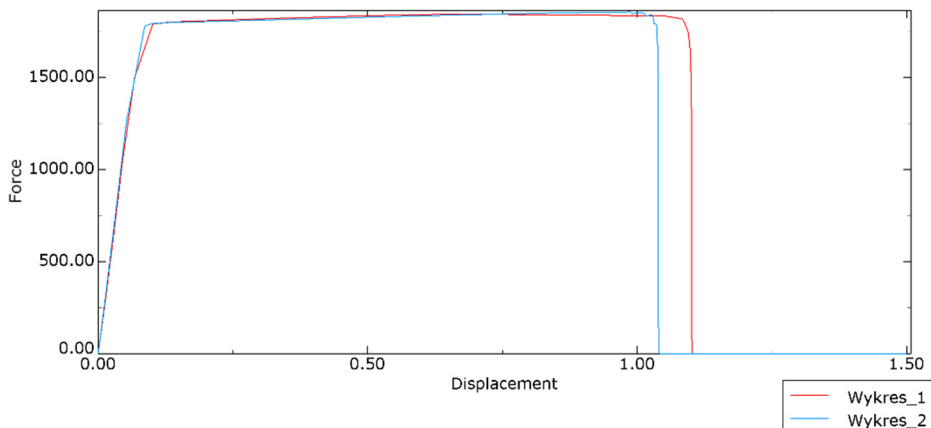
**Rys. 10.28.** Wynik analizy numerycznej – uszkodzenie w ramach powierzchni kohezynnej

Analogicznie należy również wygenerować wykres z nową nazwą *Wykres\_2*.



**Rys. 10.29.** Wynik analizy numerycznej – wykres obciążenia od przemieszczenia

Dodatkowo możliwe jest także – po skorzystaniu z narzędzia *XY Data Manager*, zestawienie jednocześnie dwóch wykresów. W tym celu należy zaznaczyć naraz obydwie nazwy *Wykres\_1* i *Wykres\_2* i zatwierdzić zaznaczenie opcją *Plot*.



**Rys. 10.30.** Wynik analizy numerycznej – porównanie wykresów

W ramach dodatkowego ćwiczenia możliwe jest przeprowadzenie analizy w sposób dynamiczny. Należy przy tym zwrócić uwagę na wszelkie zmiany z tym związane, czyli: definicję gęstości materiału, zmianę rodzaju analizy, możliwe zmiany w ramach definiowanych interakcji, zmianę warunków brzegowych (zamiana przemieszczenia na prędkość) oraz zmianę typu elementów skończonych w modelu dyskretnym.

## LITERATURA

1. Dębski H., Ponieważ G. Różyło P., Wójcik A.: *Podstawy metody elementów skończonych – przykłady obliczeń numerycznych w programie Abaqus®*, Politechnika Lubelska, Lublin 2015.
2. Różyło P.: *Stateczność i stany graniczne ściskanych cienkościennych profili kompozytowych*, Politechnika Lubelska, Lublin 2019.
3. Rusiński E., Czmochoński J., Smolnicki T.: *Zaawansowana metoda elementów skończonych w konstrukcjach nośnych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2000.
4. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L.: *The finite element method – Volume 1 The Basis*, Butterworth-Heinemann, Oxford 2000.
5. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L.: *The finite element method – Volume 2 Solid Mechanics*, Butterworth-Heinemann, Oxford 2000.
6. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L.: *The finite element method – Volume 3 Fluid Dynamics*, Butterworth-Heinemann, Oxford 2010.
7. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L.: *The finite element method for solid and structural mechanics*, Elsevier Butterworth-Heinemann, Amsterdam 2005.
8. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L., Zhu J.Z.: *The finite element method: Its Basis & Fundamentals*, Elsevier Butterworth-Heinemann, Amsterdam 2013.
9. Abaqus HTML Documentation.