

## Wyznaczanie stanu wyężenia w pierścieniu cienkościennym zgniatanym w szczękach

Sebastian Sławski<sup>1</sup>, Tomasz Machoczek<sup>1</sup>, Sławomir Duda<sup>1</sup>

<sup>1</sup>InstituT Mechaniki Teoretycznej i Stosowanej, Politechnika Śląska  
email: sebastianslawski@gmail.com, tomasz.machoczek@polsl.pl, slawomir.duda@polsl.pl

**STRESZCZENIE:** W pracy przedstawiono etapy budowy modelu numerycznego z wykorzystaniem MES pierścienia i jego weryfikację na podstawie badań eksperymentalnych, poprzez analizę obrazu oraz z wykorzystaniem tensometrów oporowych. Wartości sił ściskających w trakcie przeprowadzania eksperymentów dobrano tak, aby możliwe było zestawienie odkształceń w wybranych punktach zarówno w zakresie odkształceń sprężystych jak i plastycznych. Przeprowadzona została statyczna próba rozciągania w celu wyznaczenia rzeczywistej krzywej zależności naprężenia od odkształcenia dla materiału z którego wykonany był badany element. Przeprowadzone eksperymenty zostały odwzorowane w symulacji numerycznej, a wyniki zestawiono ze sobą.

**SŁOWA KLUCZOWE:** pomiary tensometryczne, odkształcenia, analiza numeryczna MES, rzeczywista krzywa rozciągania

### 1. Cel i zakres pracy

Prowadzenie badań symulacyjnych obiektów w środowiskach numerycznych dla różnorodnych warunków brzegowych, a następnie wyciąganie przydatnych wniosków z przeprowadzonych badań wymaga posiadania wiarygodnego modelu odzwierciedlającego najistotniejsze cechy obiektu rzeczywistego.

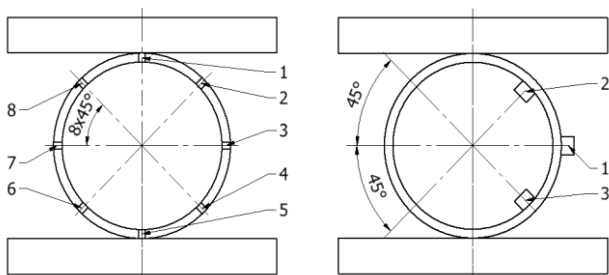
Celem pracy jest opracowanie modelu numerycznego rury cienkościennej przydatnego do prowadzenia wielorakich badań, szczególnie z uwzględnieniem stanu plastycznego.

Cel ten realizowano poprzez budowę modelu fragmentu rury tj. pierścienia. Opracowany model MES charakteryzował się mniejszą liczbą elementów skończonych w stosunku do pełnego elementu, co w przypadku prowadzenia szeregu obliczeń numerycznych znacznie przyspieszało uzyskanie rozwiązania. Celem weryfikacji poprawności otrzymanego rozwiązania przeprowadzono badania eksperymentalne na adekwatnym elemencie wyznaczając odkształcenia i przemieszczenia w wytypowanych miejscach pierścienia.

### 2. Przeprowadzenie eksperymentu

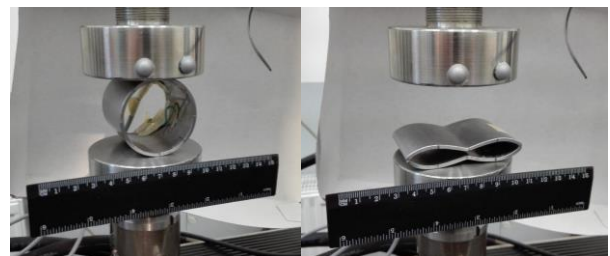
Przeprowadzony eksperyment polegał na ściskaniu dwóch próbek w kształcie pierścienia o średnicy 52 mm, grubości ścianki 2,5 mm oraz długości 50 mm w szczękach maszyny wytrzymałościowej. Dla jednej z nich przygotowano instalację do badań tensometrycznych.

Na czołach obydwu próbek naniesiono markery, które posłużyły do wyznaczenia przemieszczeń w tych punktach. Obraz w trakcie zgniatania próbek rejestrowany był za pomocą szybkiej kamery Phantom V9.1.



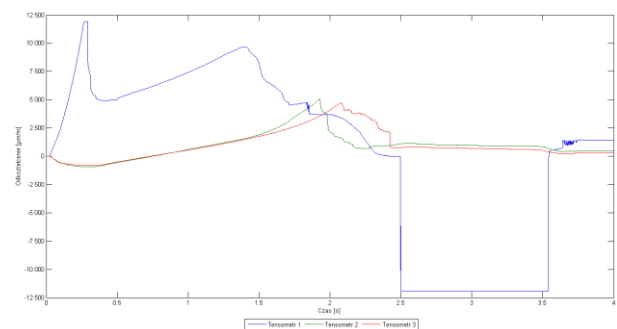
Rys. 1. a) Położenie punktów dla których wyznaczono przemieszczenia; b) miejsca naklejenia tensometrów

Na pierścieniu naklejone zostały tensometry oporowe firmy Vishay, typ EA-13-120LZ-120/E.



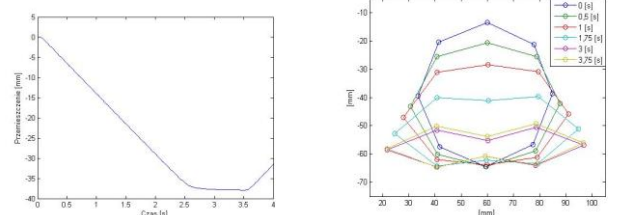
Rys. 2. a) Próbkę umieszczoną w szczękach maszyny wytrzymałościowej; b) próbkę zniszczoną w trakcie eksperymentu

W trakcie trwania eksperymentu zarejestrowano odkształcenia w miejscach naklejenia tensometrów. Wyniki badań zostały przedstawione na rys. 3.



Rys. 3. Odształcenia powierzchni, na których naklejono tensometry – zakres plastyczny

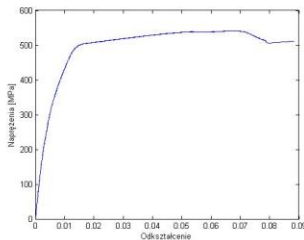
Przebieg zmian położenia wybranych punktów w trakcie trwania eksperymentu przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. a) Przemieszczenie tłoka siłownika; b) przemieszczenia obserwowanych punktów

### 3. Analiza numeryczna

Symulacje numeryczne procesu zgniatania przeprowadzono z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Do zbudowania modelu numerycznego oraz przeprowadzenia symulacji wykorzystano program ANSYS Workbench 15. Symulacje zrealizowano w module Explicit Dynamics. Przeprowadzone symulacje są odzwierciedleniem eksperymentów prowadzonych na maszynie wytrzymałościowej. Wybrany model materiałowy umożliwił analizę w zakresie odkształceń plastycznych. Z badanego elementu pobrano wycinki do przeprowadzenia statycznej próby rozciągania. Została ona zrealizowana zgodnie z obowiązującą normą [1]. Na podstawie zarejestrowanych danych wyznaczono rzeczywistą krzywą rozciągania oraz wartość modułu Younga wynoszącą 234 GPa.



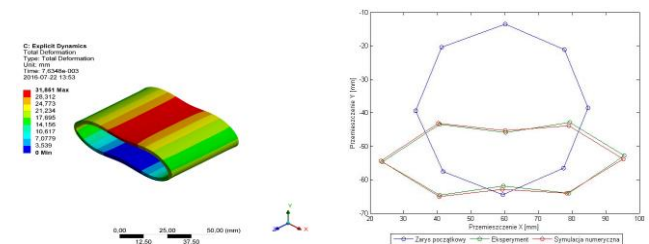
Rys. 5. Rzeczywista krzywa rozciągania

Wyznaczona rzeczywista krzywa rozciągania została zaimplementowana do biblioteki materiałowej w sposób uproszczony. Geometria badanego elementu została odzwierciedlona, a szczęki maszyny zostały zamodelowane w sposób uproszczony. Opracowany model poddano dyskretyzacji, w wyniku której powstało 207396 węzłów oraz 169518 elementów skończonych typu quad. Kontakt pomiędzy elementami zdefiniowano jako Frictional. Warunki brzegowe jakie zostały zdefiniowane to: odebranie możliwości przemieszczeń translacyjnych bryle odpowiadającej nieruchomemu tłoczkowi, odebranie możliwości przemieszczeń translacyjnych w kierunkach innych niż kierunek działania siły ściskającej bryle odpowiadającej przemieszczającemu się tłoczkowi oraz wartość siły z jaką tłoczek obciąża próbkę. Wartości siły ściskającej równe są wartościom sił z jakimi ściskana była próbka w trakcie przeprowadzania eksperymentów. Bryły reprezentujące tłoczyska maszyny wytrzymałościowej zostały zdefiniowane jako ciała nieodkształcalne.

### 4. Wnioski

Wyniki analizy odpowiadającej eksperymentowi przeprowadzonemu w zakresie sprężystym zestawiono dla przypadku odpowiadającego działaniu największej wartości siły ściskającej. W doświadczeniu polegającym na zgnieciu próbki, porównania dokonano natomiast dla przypadku, w którym opierając się na wskazaniach tensometrów dochodziło do pierwszych uszkodzeń materiału. W przypadku odkształceń sprężystych średnia wartość błędów względnego przemieszczeń w wybranych punktach wynosiła 41%. Przemieszczenia wyznaczano na podstawie zarejestrowanego obrazu. Pominięcie błędów wynikających z różnicy przemieszczeń mniejszej niż przemieszczenie odpowiadające 1px powoduje spadek wartości średniego błędów względnego do 22%. Wartość średniego błędów względnego przemieszczeń w przypadku

analizy odpowiadającej odkształceniom plastycznym wynosi 18,6%. Wartości średnich błędów przemieszczeń na kierunku działania siły ściskającej wynoszą odpowiednio 38% (31%) oraz 8%. W przypadku przemieszczeń mierzonych w zakresie sprężystym różnice pomiędzy wartościami zmierzonymi w trakcie eksperymentu a wynikiem symulacji numerycznej są mniejsze od wielkości przyjętego do analizy elementu skończonego. W przypadku przemieszczeń mierzonych w zakresie plastycznym różnice w zmierzonych przemieszczeniach przekraczały wielkość przyjętego do analizy elementu skończonego dla 25% zmierzonych wartości. Średnia wartość błędów względnego odkształceń sprężystych powierzchni wynosiła 20%. Dla odkształceń plastycznych powierzchni w miejscu naklejenia tensometru 2 (rysunek 1.b) wartości odkształceń pokrywały się. Odkształcenia odpowiadające powierzchni na której nakleiono tensometr 3 obarczone były 45% błędem względnym. Opracowany model numeryczny uznano za satysfakcjonujący, jego zachowanie odzwierciedlało zachowanie się rzeczywistego elementu w trakcie przeprowadzania eksperymentów. Rozbieżności pomiędzy wynikami otrzymanymi drogą eksperymentalną oraz poprzez przeprowadzenie analizy numerycznej w przypadku odkształceń plastycznych dotyczą opracowanego modelu materiałowego nie uwzględniającego uszkodzeń materiału, do których doszło w czasie przeprowadzania eksperymentu. Opracowany model może zostać zastosowany do oceny zachowania się elementu pod wpływem różnych wymuszeń.



Rys. 6. a) Barwna mapa przemieszczeń – symulacja numeryczna z zastosowaniem rzeczywistej krzywej rozciągania; b) wizualizacja przemieszczeń charakterystycznych punktów

Tabela 1. Wartości odkształceń powierzchni na których naklejone zostały tensometry

Tensometr	Odkształcenie [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	
	Eksperyment	Symulacja numeryczna
Zakres sprężysty		
1	560	431
2	-120	-108
3	-150	-108
Zakres plastyczny		
1	3688	48961
2	2175	2166
3	4074	2239

### Literatura

- [1] PN-EN ISO 6892-1. Metale – Próba rozciągania. Część 1: Metoda badania w temperaturze pokojowej.
- [2] A. Jakubowicz, Z. Orłowski: *Wytrzymałość materiałów*, Wydawnictwa Naukowo – Techniczne, Warszawa, 1984.
- [3] O. Zienkiewicz: *Metoda elementów skończonych*, Wydawnictwo Arkady, Warszawa, 1972.