

# MODELOWANIE EFEKTU SUPERSPRĘŻYSTOŚCI METODĄ ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH

Beata Młoczek

Instytut Nauki o Materiałach, Uniwersytet Śląski  
bmlocek@us.edu.pl

## Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki modelowania zjawiska supersprężystości metodą elementów skończonych. Przedyskutowano metodykę tworzenia modeli jednoosiowego rozciągania oraz trójpunktowego zginania. Analizę numeryczną prowadzono w środowisku obliczeniowym ANSYS 14.5. Wyznaczono wartości naprężeń normalnych w funkcji odkształcenia oraz wartości siły reakcji względem przemieszczenia belki ze stopu NiTi opisanej numerycznie. Uzyskane wyniki analiz numerycznych porównano z danymi eksperymentalnymi zamieszczonymi w pracy Auricchio i innych [1], uzyskując jakościowo dobrą zgodność. Użycie analiz numerycznych MES uzasadnione jest efektywną optymalizacją wytwarzania materiałów wykazujących efekt supersprężystości.

**Słowa kluczowe:** supersprężystość, metoda elementów skończonych, NiTi, jednoosiowe rozciąganie, trójpunktowe zginanie

## MODELING OF SUPERELASTIC EFFECT BY FINITE ELEMENT METHOD

### Summary

The paper presents the results of modeling using finite element method superelastic phenomena occurring in shape memory alloys. The methodology for modeling uniaxial tensile and three-point bending was discussed. Numerical analysis was carried out in 14.5 ANSYS. The values of tensile stress as a function of strain and the force reaction in relation to displacement for the NiTi beam were shown. The obtained results were compared with good qualitatively agreement with experimental data given in work Auricchio et al [1]. Using finite element method in optimization of manufacturing materials in which occur the superelastic effect was shown.

**Keywords:** superelasticity, finite element method, NiTi, uniaxial tensile test, three-point bending

### 1. WSTĘP

Rozwój nowoczesnych materiałów wymaga optymalizacji warunków procesu ich otrzymywania. Poszukiwanie funkcjonalnych materiałów o określonych parametrach wymaga zastosowania wielu technik eksperymentalnych. Szereg cennych informacji uzyskuje się także na podstawie obliczeń numerycznych, które polegają na modelowaniu parametrów materiału z założeniem warunków ich zastosowań. Symulacje komputerowe dostarczają informacji wymaganych dla opracowania rozwiązań technologicznych i konstrukcyjnych bez konieczności

przeprowadzania kosztownych doświadczeń, co istotnie usprawnia proces wytwarzania.

W grupie materiałów inteligentnych intensywnie badane są stopy wykazujące efekt pamięci kształtu, które oznaczają się jako SMA (SMA z ang. Shape Memory Alloys). Cechą charakterystyczną SMA jest ich zdolność powrotu do pierwotnego kształtu w określonych warunkach nawet po poddaniu trwałym odkształceniom rzędu 8 – 15%.

Przedstawicielem użytkowych stopów z pamięcią kształtu, o szerokim zakresie temperaturowym prze-

miany martenzyt – austenit (-100°C do 100°C), jest układ NiTi o dużej zawartości niklu, który występuje pod handlową nazwą Nitinol. Stop ten wykazuje najsilniejszy efekt pamięci kształtu w grupie wszystkich SMA i dodatkowo charakteryzuje się bardzo dobrymi właściwościami mechanicznymi [2]. Wymienione cechy predestynują Nitinol do zastosowań w przemyśle, na przykład jako oprawy okularów [3], złączki [4], zawory bezpieczeństwa [5]. Dodatkowo wykazują dobrą biofunkcjonalność i biokompatybilność.

Szczególnie ważnym przeznaczeniem stopów na osnowie NiTi o składzie chemicznym 49 - 51% at. niklu jest możliwość ich zastosowania w różnych dziedzinach medycyny, wynikająca z wysokiej tolerancji organizmu na implantowane elementy. Przykładem takich zastosowań są druty ortodontyczne [6], wiertła do leczenia kanałowego [7], chwytaki i koszyczki Dormii [8], korki Amplatzer [7,8], medyczne druty prowadzące [1], czy też stenty [1,7,8].

Dzięki zdolności do odzysku pierwotnego kształtu SMA używane są do konstruowania narzędzi medycznych, umożliwiając ich miniaturyzację, co wpływa na uproszczenie zabiegów chirurgicznych oraz zmniejszenie ilości powikłań pooperacyjnych i skrócenie czasu hospitalizacji oraz rekonwalescencji.

W niniejszej pracy przeanalizowano zjawisko supersprężystości Nitinolu występujące wówczas, gdy materiał charakteryzuje jedynie faza austenityczna, stosując metodę elementów skończonych. Obliczenia numeryczne prowadzone z użyciem pakietu ANSYS pozwoliły na wyznaczenie takich parametrów jak: naprężenia normalne, siła reakcji, odkształcenie i przemieszczenie. Uzyskane wyniki analizy numerycznej porównano z danymi eksperymentalnymi i numerycznymi przedstawionymi w pracy [1] i wykazano ich jakościowo dobrą zgodność. Uzyskane rezultaty świadczą o poprawności przyjętej metodyki obliczeń i sposobu analizy danych.

Celem pracy było przedstawienie znaczenia metody elementów skończonych przy optymalizacji procesu wytwarzania stopów z pamięcią kształtu wykazujących efekt supersprężystości,

## 2. METODYKA ANALIZY NUMERYCZNEJ

W niniejszej pracy materiałem badań był stop NiTi o zawartości 50,8% at. niklu. Parametrów wskazanego stopu użyto w procesie analizy numerycznej efektu supersprężystości. Zjawisko to występuje, gdy po przyłożeniu obciążenia mechanicznego następuje odkształcenie, w wyniku którego zachodzi przemiana fazowa: austenit-martenzyt odbliźniaczony. Całkowite zdjęcie naprężeń

zewnętrznych powoduje powstanie odwrotnej przemiany (martenzyt odbliźniaczony w austenit) i powrót materiału do swojego pierwotnego kształtu. W stanie tym materiał składa się w 100% z fazy austenitycznej bez trwałych odkształceń.

Obliczenia numeryczne przeprowadzono w środowisku ANSYS, umożliwiającym analizę zjawiska supersprężystości, jak również efektu pamięci kształtu [9]. Program ANSYS jest jednym z najbardziej zaawansowanych systemów obliczeniowych wykorzystujących metodę elementów skończonych, umożliwiając jednoznaczna i szybką analizę zjawisk zachodzących w konstrukcjach oraz materiałach, w tym także stopach z pamięcią kształtu. Istotną cechą programu jest to, że równania materiałowe opisujące supersprężystość i efekt pamięci kształtu zostały zaimplementowane w modelach opracowanych przez Auricchio [1] i wprowadzone zostały bezpośrednio do pakietu obliczeniowego.

Proces obliczeń numerycznych przebiegał w kilku etapach polegających na: skonstruowaniu geometrycznego modelu próbki w postaci belki o przekroju kołowym z założeniem, że jest ona wykonana ze stopu NiTi. Następnie wygenerowano siatkę MES, dobierając odpowiednią wielkość elementów skończonych wpływających na dokładność wyników. W kolejnym etapie nałożono warunki brzegowe, różne dla testu rozciągania i trójpunktowego zginania. Na tej podstawie przeprowadzono analizę metodą elementów skończonych z zastosowaniem modelu supersprężystości opisując jednoosiowe rozciąganie oraz trójpunktowe zginanie modelowej próbki. Uzyskane na podstawie obliczeń charakterystyki naprężenie-odkształcenie oraz siła-przemieszczenie zestawiono z danymi eksperymentalnymi oraz teoretycznymi prezentowanymi w pracy [1].

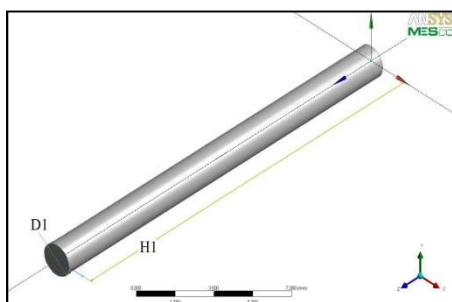
## 3. WYNIKI I ICH DYSKUSJA

### 3.1 STATYCZNA PRÓBA ROZCIĄGANIA BELKI NITI

Podstawową i najczęściej stosowaną metodą badań wytrzymałości materiałów konstrukcyjnych jest statyczna próba rozciągania ujęta normami PN-EN 10002-1:2004P [10], PN-EN ISO 6892-1:2010P [11] i PN-EN ISO 6892-2:2011E [12]. Badanie polega na osiowym rozciąganiu próbki ze stałą prędkością do momentu jej zerwania. Najczęściej stosuje się próbki o przekroju kołowym i prostokątnym [13], spotyka się również przekroje kwadratowe lub sześciokątne. Próbkę posiadają część pomiarową o stałym przekroju i kończą się główkami o większych wymiarach. Na podstawie wyników testu rozciągania można

wyznaczyć szereg parametrów materiałowych, m.in. wartość naprężenia rozrywającego, wydłużenie względne czy też stałe materiałowe, w tym współczynnik Poissona i moduł Younga. Parametry te są ważne dla konstruktorów na etapie projektowania obiektów mechanicznych, optymalizacji ich kształtu, wymiarów oraz masy.

W niniejszej pracy obliczenia numeryczne prowadzono z użyciem modelu belki o przekroju kołowym, którą poddano jednoosiowemu rozciąganiu do uzyskania odkształcenia  $\epsilon_l$  o wartości 7,5%. Stosowane systemy obliczeniowe do symulacji procesów zachodzących w materiale wymagają wprowadzenia początkowych parametrów charakteryzujących właściwości mechaniczne, takie jak moduł Younga i współczynnik Poissona. Test numeryczny procesu statycznego rozciągania belki (rys. 1) przeprowadzono na podstawie parametrów materiałowych zaczerpniętych z pracy [1]. Wykorzystując graficzny interfejs Design Modeler, zbudowano dwa modele geometryczne: model całej belki i jej 1/4 części.

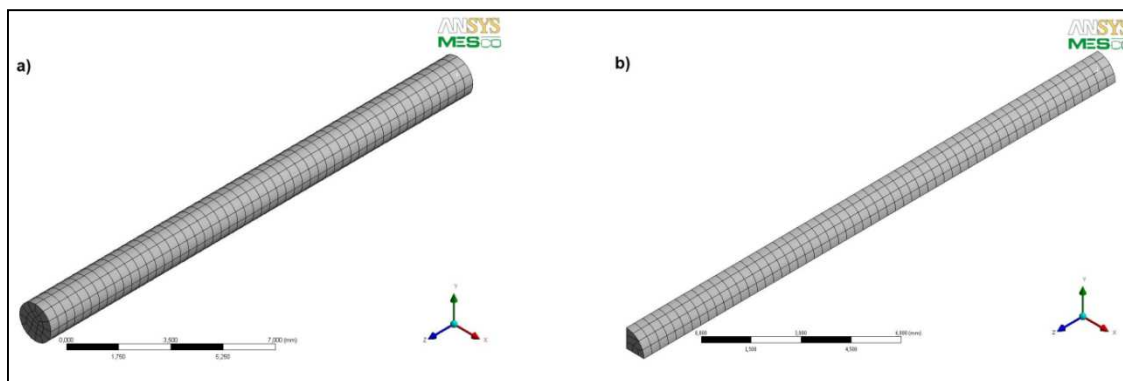


Rys. 1. Model geometryczny badanej próbki, gdzie  $D1= 1,49$  mm i  $H1= 20$  mm

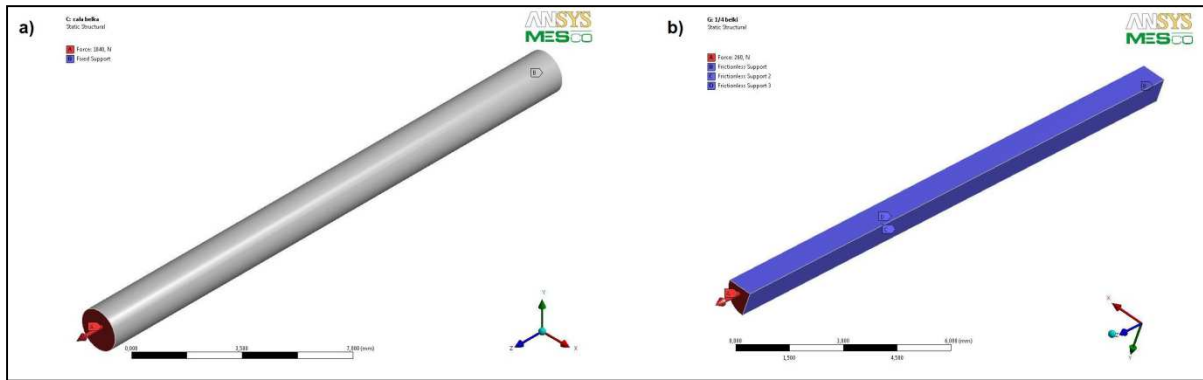
Następnie wygenerowano siatki MES (zbudowane z sześciątów posiadających po osiem węzłów) dla obu modeli, które przedstawiono na rysunku rys. 2a i 2b. Siatka MES składa się z węzłów, które opisują geometrię obiektu i przechowują wartości otrzymywanych własności. Kreacja siatki MES stanowi jeden

z najważniejszych czynników metody elementów skończonych i zamyka etap definiowania topologii. Poprawnie wygenerowana siatka MES jest bardzo ważnym elementem analizy, gdyż od jej jakości zależy dokładność i jednoznaczność oraz poprawność uzyskanych wyników. Wykorzystana w pracy aplikacja ANSYS Mechanical umożliwiła automatyczne generowanie siatki MES, co w znaczący sposób przyspieszyło i uprościło procedurę. Jednak funkcja ta sprawdza się tylko w przypadku mniej skomplikowanych geometrii, przy bardziej złożonych kształtach należy ręcznie wybrać metodę i wielkość elementów skończonych. Innym istotnym czynnikiem wpływającym na poprawność oraz dokładność uzyskiwanych rezultatów jest gęstość siatki. Im większa gęstość siatki MES, tym uzyskiwane rezultaty są dokładniejsze. Minusem tego etapu jest wydłużenie czasu analizy. Dlatego też gęstość siatki MES powinna być tak dobrana, aby spowolnienie czasu obliczeń powodowane dużą ilością użytych elementów skończonych było możliwie małe.

W kolejnym etapie analizy procesu jednoosiowego rozciągania modelowa belka została jednostronnie utwierdzona. W ten sposób odebrano modelowi sześć stopni swobody i zapewniono warunki statycznej wyznaczalności. Swobodny koniec belki obciążono siłą rozciągającą skierowaną zgodnie z osią Z globalnego układu współrzędnych (rys. 3a). Przemieszczenia liniowe występują jedynie wzdłuż osi Z. W przypadku modelu 1/4 części belki dodatkowo zastosowano tzw. podporę przesuwną na płaszczyźnie symetrii wzdłuż osi Y i Z, w ten sposób warunkując symetrię tak skonstruowanego modelu. W celu weryfikacji, numerycznie obliczone wartości parametrów materiałowych porównano z wartościami eksperymentalnymi i literaturowymi zamieszczonymi w pracy [1]. Na podstawie uzyskanych wyników odwzorowano próbę rozciągania w temperaturze 22 °C, przyjmując jako stałe następujące wartości:

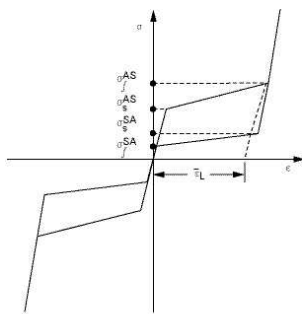


Rys. 2. Wygenerowana siatka MES dla a) modelu całej belki i b) modelu ćwiartki belki



Rys. 3. Warunki brzegowe statycznej próby rozciągania dla a) całej belki i b) ćwiartki belki

moduł Younga  $E= 60\ 000\ \text{MPa}$ , współczynnik Poissona  $\nu= 0,3$ , maksymalne odkształcenie resztkowe  $\varepsilon_l=7,5\%$ , parametry kinetyki przemiany austenitycznej i martenzytycznej  $\sigma_s^{AS}= 520\ \text{MPa}$ ,  $\sigma_f^{AS}=600\ \text{MPa}$ ,  $\sigma_s^{SA}=300\ \text{MPa}$ ,  $\sigma_f^{SA}=200\ \text{MPa}$  oraz współczynnik  $\alpha=0,15$ . Na rys. 4 przedstawiono schematycznie zależność naprężenie-odkształcenie dla modelowego, wyidealizowanego materiału wykazującego efekt supersprężystości z zaznaczeniem symboli wybranych parametrów materiałowych używanych w procesie analizy.



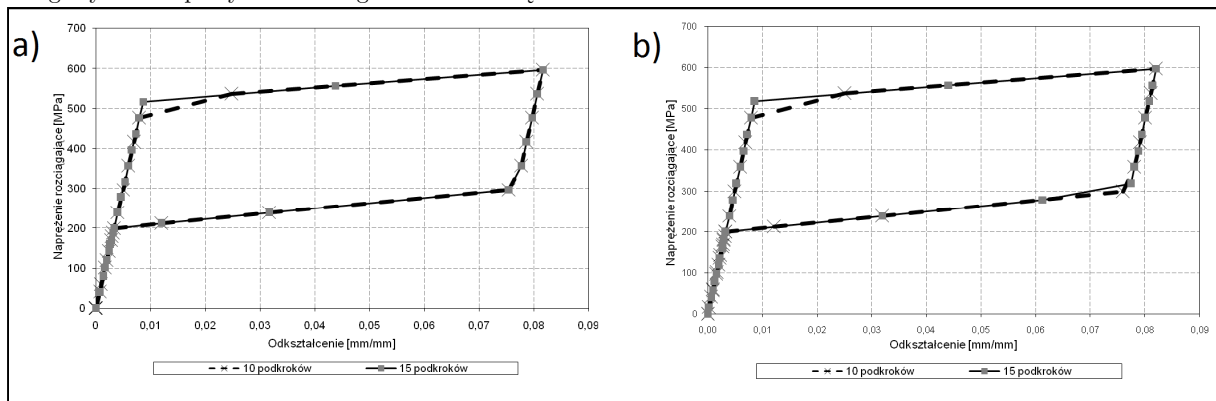
Rys. 4. Wyidealizowany schemat naprężenie-odkształcenie zachowania superelastycznego [9]

Obliczenia testowe prowadzono w celu doboru wartości przyłożonej siły i określenia warunków brzegowych. Rozpatrywano szereg wartości obciążenia

(65N - 1000N, 1030N, 1040N, 1060N). Najlepsze odwzorowanie krzywej przedstawionej przez autorów pracy [1] uzyskano, stosując siłę o wartości 1040 N dla modelu całej belki, natomiast dla modelu części belki zastosowano siłę czterokrotnie mniejszą o wartości 260 N. Na rys. 5. przedstawiono krzywe naprężenie-odkształcenie dla obciążonej modelowej belki (a) oraz jej 1/4 części (b). Zaprezentowane krzywe numeryczne naprężenie-odkształcenie obliczono z zastosowaniem wyżej opisanych parametrów. Występujące różnice wynikają z liczby podkroków, w których przeprowadzono analizę.

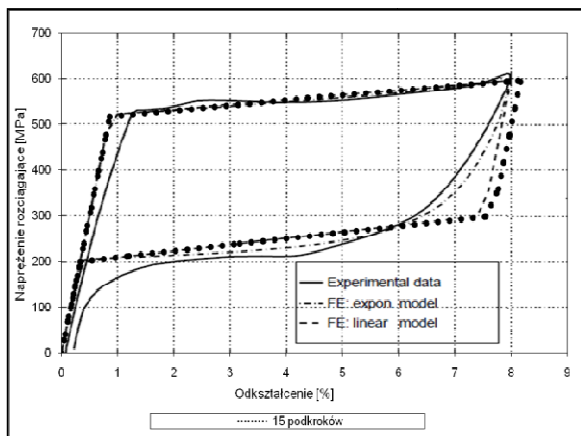
Wyniki wskazują, że na poziomie naprężenia początku przemiany martenzytycznej ( $\sigma_s^{AS}$ ) ścięcie krzywej pętli histerezy wynika z użycia zbyt małej liczby podkroków podczas analizy. Zauważono, iż dokładniejsze odwzorowanie krzywej pętli histerezy wymaga zwiększenia liczby podkroków.

Dla modelu ćwiartki belki zauważono, że kształt pętli histerezy w pobliżu wartości naprężenia dla początku przemiany austenitycznej ( $\sigma_s^{SA}$ ) charakteryzuje nieznaczne ścięcie. Subtelna różnica w charakterystyce naprężenie-odkształcenie dla modelu całej belki w porównaniu do jej ćwiartki może wynikać z mniejszych rozmiarów zastosowanych elementów skończonych.



Rys. 5. Krzywe naprężenie-odkształcenie dla a) całej belki i b) ćwiartki belki w zależności od ustawień analizy

Na rys. 6 przedstawiono porównanie wyników obliczeń numerycznych uzyskanych w niniejszej pracy (zaciemnione punkty) z rezultatami opublikowanymi w [1] dla modelowej belki. Linią ciągłą opisano wartości uzyskane eksperymentalnie natomiast przerywane linie opisują numeryczne wartości naprężenia i odkształcenia zaczerpnięte z pracy [1].



Rys. 6. Zestawienie charakterystyki naprężenie-odkształcenie modelu numerycznego i krzywych przedstawionych w [1]

Na podstawie zestawienia stwierdzono najlepszą zgodność wartości parametrów naprężenie-odkształcenie wyznaczonych w niniejszej pracy z numerycznie wyznaczonymi parametrami uzyskanymi przy użyciu modelu liniowego, przedstawionymi w pracy [1]. Wartości parametrów wyznaczone za pomocą modelu wykładniczego w pracy [1] nieznacznie odbiegają od wartości obliczonych z zastosowaniem modelu liniowego. Mimo to model wykładniczy dokładniej opisuje rezultaty uzyskane eksperymentalnie. Dobrą jakościowo zgodność wartości eksperymentalnych i numerycznych uzyskano przy użyciu obu modeli numerycznych w pracy [1] oraz w wyniku przeprowadzonej analizy w niniejszej pracy. Rezultat ten pozwala wnioskować, że poprawnie prowadzona symulacja numeryczna opisująca właściwości mechaniczne w znaczny sposób usprawni proces technologii otrzymywania materiałów funkcjonalnych o zadanych właściwościach.

### 3.2 TRÓJPUNKTOWE ZGINANIE BELKI NITI

Badanie zginania najczęściej prowadzi się na podstawie normy PN-EN ISO 7438:2006P [14], która formułuje metodę określania podatności materiałów na odkształcenia plastyczne podczas procesu zginania. Badana próbka zostaje poddana odkształceniu plastycznemu przez zginanie, bez zmian kierunku obciążenia, aż do momentu złamania. Na podstawie uzyskanych wyników wyznacza się: wytrzymałość na zginanie, moduł sprężystości podłużnej oraz odkształcenia przy zginaniu.

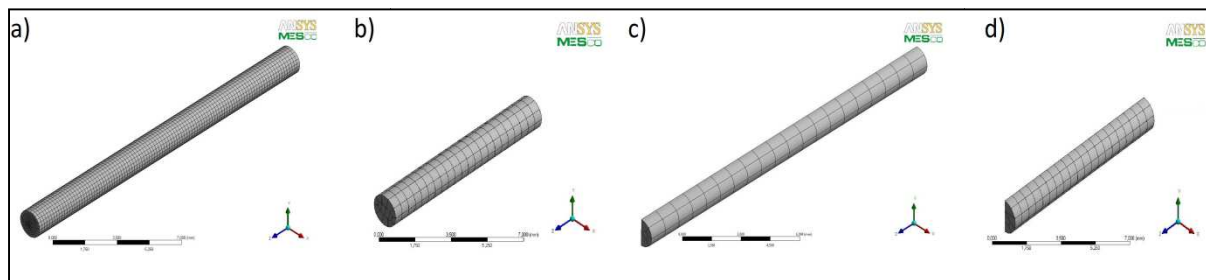
W niniejszej pracy analizę numeryczną trójpunktowego testu zginania wykonano, wykorzystując wcześniej opracowany i opisany kształt modelowej belki. Test numeryczny wykonano w temperaturze 22 °C z maksymalnym odkształceniem 7,5%. W programie ANSYS zdefiniowano materiał, z którego wykonano próbkę, przyjmując parametry materiałowe zgodnie z danymi użytymi przez Auricchio i innych [1].

Wygenerowano siatki MES o różnym stopniu zagęszczenia (rys. 7) dla następujących materiałów modelowych:

- całej belki,
- 1/2 belki, uwzględniając symetrię w poprzek całej belki,
- 1/2 belki, uwzględniając symetrię wzdłuż całej belki,
- 1/4 belki

Dla modelu całej belki stworzono bardzo gęstą siatkę MES (7a), natomiast dla połówki belki z uwzględnieniem symetrii wzdłuż modelu skonstruowano siatkę MES o niskiej gęstości (rys.7c). Dla pozostałych dwóch modeli wygenerowano siatki MES o podobnej wielkości elementów skończonych (rys.7b, d).

Warunki brzegowe badanego materiału dla modelu całej belki oraz jej części z uwzględnieniem warunków symetrii przedstawiono na rys. 8. Analogicznie, jak w przypadku jednoosiowego rozciągania, przyjęto warunek statycznej wyznaczalności i określono warunki brzegowe.

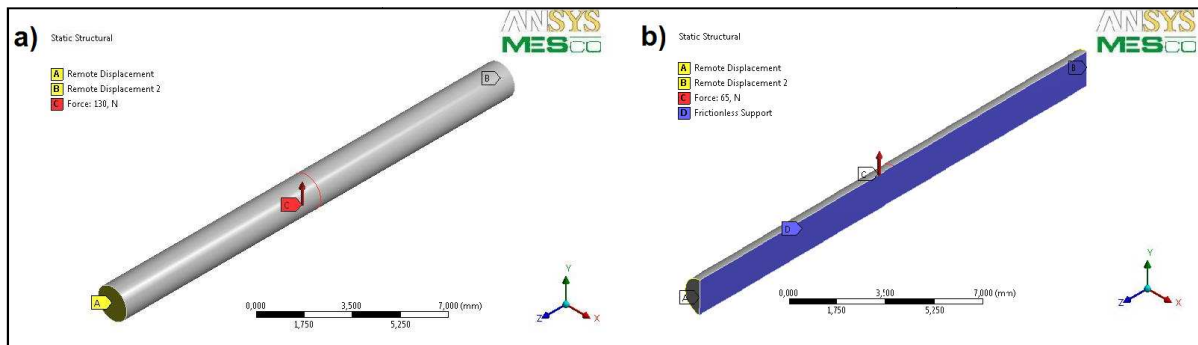


Rys. 7. Wygenerowane siatki MES dla modelu a) całej belki, b) 1/2 część belki uwzględniającej symetrię w poprzek całej belki, c) 1/2 część uwzględniającej symetrię wzdłuż całej belki i d) 1/4 część belki

W przypadku modelu całej belki (rys. 8a) 6 stopni swobody odebrano poprzez zastosowanie dwóch podpór na obu końcach belki. Z jednej strony umieszczono podporę przegubową odbierającą możliwość przemieszczeń liniowych wzdłuż osi X i Y oraz odebrano możliwość przemieszczeń kątowych względem osi Z, odbierając w ten sposób 3 stopnie swobody. Z drugiej strony belki zastosowano podporę stałą uniemożliwiającą ruch wzdłuż osi X, Y i Z odbierającą 3 kolejne stopnie swobody.

1/4 belki siłę o wartości 32,5 N. Wyniki obliczeń numerycznych czterech modeli trójpunktowego zginania w formie charakterystyk siła-przemieszczenie zestawiono na rys. 9

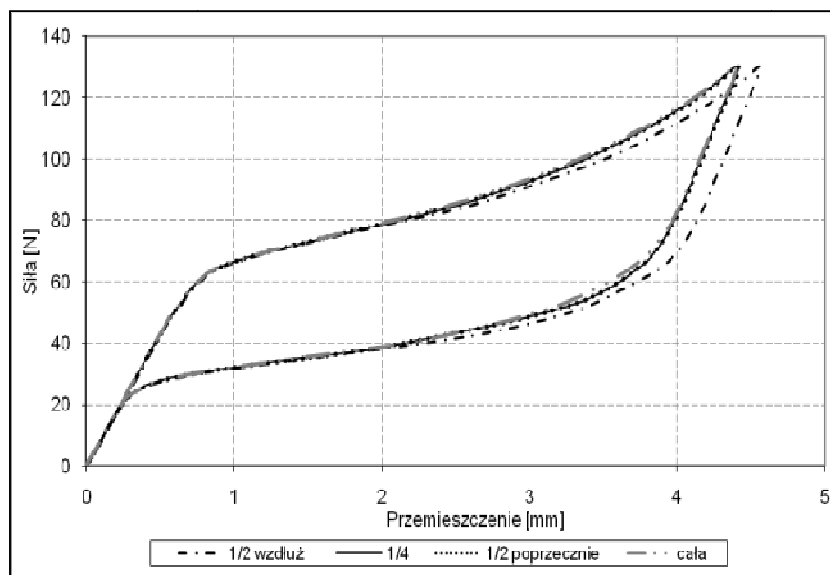
Na podstawie porównania krzywych dla różnych geometrycznie modeli o podobnych rozmiarach elementów skończonych stwierdzono, że uzyskane wartości siły reakcji są bardzo zbliżone. Subtelne różnice są wynikiem zastosowania różnego stopnia



Rys. 8. Warunki brzegowe trójpunktowego zginania dla a) całej belki i b) 1/2 belki

W przypadku modeli części belki uwzględniających symetrię dodatkowo zastosowano ograniczenie poprzez wprowadzenie podpory przesuwnej na płaszczyźnie symetrii. Przykład modelu 1/2 belki przedstawia rys. 8b, gdzie wprowadzona podpora odbiera możliwość przemieszczeń liniowych wzdłuż osi X i kątowych wokół osi Y i Z, natomiast możliwe są przemieszczenia liniowe na płaszczyźnie symetrii wzdłuż osi Y i Z oraz kątowe wokół osi X. W środku belki przyłożono siłę zginającą, której wartość dobierano w zależności od rodzaju badanego modelu. W procesie obliczeń numerycznych użyto następujących wartości siły zginającej: dla całej belki - 130 N, dla połowy belki - 65 N oraz

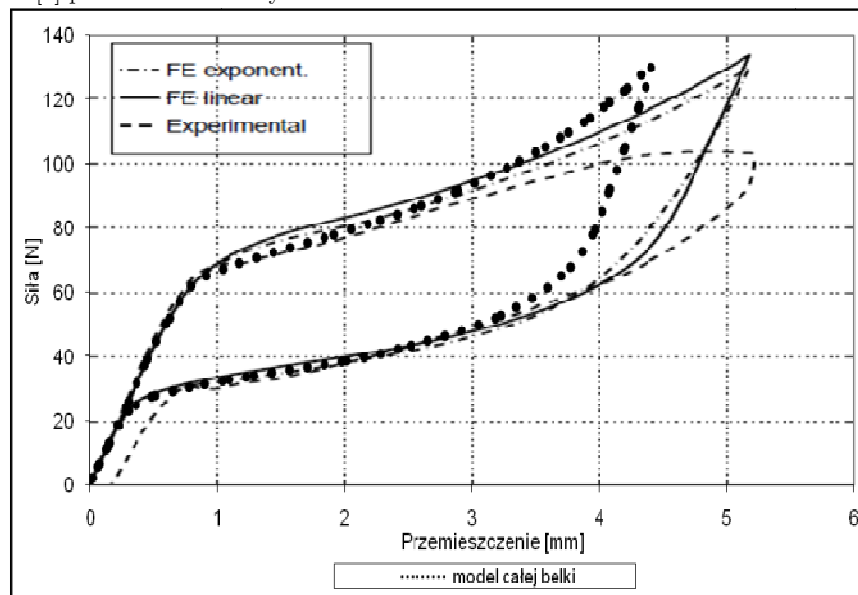
dla zagęszczenia siatek MES dla poszczególnych modeli. Charakterystyka siła-przemieszczenie wyznaczona dla modelu z wygenerowaną gęstą siatką MES jest w niewielkim stopniu przesunięta w relacji do dwóch pozostałych. Wartości siła-przemieszczenie wyznaczone na podstawie analizy numerycznej dla modelu z niską gęstością siatki MES odbiegają od pozostałych. Uzyskane rezultaty wskazują, że zastosowanie siatki MES o większej gęstości prowadzi do uzyskania dokładniejszych wyników, przy czym czas obliczeń w tym przypadku jest znacznie dłuższy. Optymalizacja wielkości elementów skończonych polega na doborze gęstości siatki. Przy



Rys. 9. Zestawienie krzywych siła - przemieszczenie dla różnych modeli numerycznych

jej stosowaniu zyskuje się podobne rezultaty, a czas obliczeń jest relatywnie krótki.

Ze względu na zbliżone wyniki uzyskane dla czterech różnych geometrycznie modeli przy porównaniu z danymi literaturowymi posłużono się modelem całej belki. Wykres przedstawiający porównanie wartości siła-przemieszczenie obliczonych numerycznie z krzywymi zaczerpniętymi z pracy Auricchio i innych [1] przedstawiono na rys. 10.



Rys. 10. Zestawienie charakterystyki siła-przemieszczenie modelu numerycznego i krzywych przedstawionych w [1]

Na podstawie zestawionych krzywych stwierdzono znaczną różnicę wyników uzyskanych z analizy numerycznej przeprowadzonej w niniejszej pracy w odniesieniu do eksperymentalnej krzywej siła-przemieszczenie. Różnica ta wynika prawdopodobnie z zastosowania w procesie analizy metody elementów skończonych, która ma charakter aproksymujący. Przypuszcza się, że występujące rozbieżności w przebiegu krzywej numerycznej uzyskanej w niniejszej pracy w relacji do danych eksperymentalnych mogą wynikać z warunków, w których prowadzono eksperyment i których nie uwzględniają obliczenia numeryczne.

Natomiast autorzy pracy [1] obserwowali nieznaczne odstępstwo wyników teoretycznych w relacji do danych eksperymentalnych, dlatego autorka niniejszej pracy nie podjęła próby wyjaśnienia przyczyn występującej różnicy.

Porównanie pętli histerezy uzyskanej w niniejszej pracy oraz charakterystyk przedstawionych w pracy [1] wskazuje na poprawne odwzorowanie kształtu pętli histerezy z niewielką różnicą w długości.

Różnice w kształcie i długości krzywych obliczonych numerycznie wynikać mogą z innych warunków brzegowych przyjętych w niniejszej pracy

w odniesieniu do parametrów uwzględnionych w obliczeniach autorów pracy [1]. Należy zauważyć, że w obliczeniach MES w niniejszej pracy nie uwzględniono takich czynników jak np. kontakt badanej próbki z podporami, który w znaczący sposób warunkuje przemieszczenie, a czynnik ten mógł być uwzględniony w obliczeniach zaprezentowanych w pracy [1].

#### 4. PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono założenia teoretyczne oraz metodykę tworzenia modeli numerycznych materiałów wykazujących efekt supersprężystości z zastosowaniem metody elementów skończonych. Modelowanie właściwości mechanicznych zaprezentowano na przykładzie stopu wykazującego efekt pamięci kształtu. Obliczenia i symulacje prowadzono wykorzystując oprogramowanie ANSYS 14.5, z zaimplementowanymi modelami supersprężystości oraz zjawiska pamięci kształtu. W obliczeniach numerycznych przeprowadzonych w niniejszej pracy wykorzystano konstytutywny model supersprężystości. Wyznaczono charakterystyki naprężenie-odkształcenie oraz siła-przemieszczenie dla zaprojektowanego modelu belki i jej części, przyjmując przy konstruowaniu parametry charakterystyczne dla stopu NiTi wykazującego efekt pamięci kształtu. Proces modelowania efektu supersprężystości metodą elementów skończonych prowadzono na podstawie obliczeń mechanicznych parametrów jednoosiowego rozciągania i trój-punktowego zginania. Otrzymane wyniki zestawiono z danymi eksperymentalnymi i numerycznymi przedstawionymi w pracy [1] w celu weryfikacji rezultatów.

W wyniku analizy numerycznej odwzorowano w zadowalającym stopniu liniowe modele jednoosiowego rozciągania i trójpunktowego zginania przedstawione w pracy [1], co wskazuje na możliwość symulacji efektu supersprężystości z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Przedstawiono dyskusję wpływu parametrów stosowanych w procesie obliczeń na końcowe rezultaty i ich zgodność z wartościami uzyskiwanymi eksperymentalnie. W symulacjach wykorzystano różną gęstość siatek MES i stwierdzono, że rozmiar siatki MES ma istotny wpływ na dokładność otrzymanych wyników.

Dodatkowo wykazano, że liczba podkroków użytych w analizie również wpływa na dokładność otrzymywanych wyników. W związku z tym czynniki te należy dobrać w taki sposób, aby niepotrzebnie nie wydłużać czasu analizy.

Przedstawione w pracy wyniki opisujące proces modelowania zjawiska supersprężystości metodą elementów skończonych wskazują na konieczność prowadzenia obliczeń w celu poprawnego odwzorowania zachowania materiałów aplikacyjnych. Umożliwi to modyfikację technologii ich wytwarzania.

*Publikacja powstała dzięki uprzejmości firmy MESco, w której miałam przyjemność odbyć staż w ramach projektu UPGOW: "Zadanie 47: Staże 3-miesięczne i praktyki studentów". Była to niebywała okazja do zdobycia wiedzy i doświadczenia, która pozytywnie wpłynie na mój dalszy rozwój.*

## Literatura

---

1. Auricchio F., Taylor R. L., Lubliner J.: Shape-memory alloys: macromodeling and numerical simulations of the superelastic behavior. "Computational Methods in Applied Mechanical Engineering" 1997, 146, 1, p. 281-312.
2. <http://materialyinzynierskie.pl/niti-nitinol-material-z-pamiecia-kszaltu/> z dn. z dn. 15.01.14
3. <http://www.framesdirect.com/framesfc/flexon-lambfl-pr-1.html?framematerial=flexible%20metal,&catalogsubtype=0> z dn. 15.01.14
4. <http://system-instalacje.pl/wirsbo.php> z dn. 15.01.14
5. <http://www.arapneumatik.pl/blog/2013/02/pneumatyczny-zawor-odcinajacy-sterowany-cieplem-fireчек> z dn. 15.01.14
6. [http://www.dentalpress.com.br/journal/pdf/a17v14n6\\_EN.pdf](http://www.dentalpress.com.br/journal/pdf/a17v14n6_EN.pdf) z dn. 15.01.14
7. Duerig T., Pelton A., Stockel D.: An overview of nitinol medical applications. "Materials Science and Engineering" A273-275 1999, p. 149-160.
8. Stoeckel D.: Nitinol medical devices and implants. "Min Invas Ther & Allied Technol", 2000, 9(2), p. 81-88.
9. ANSYS user's manual Version 14.5. ANSYS Inc. 2013
10. PN-EN 10002-1:2004P - Metale. Próba rozciągania. Część 1: Metoda badania w temperaturze otoczenia.
11. PN-EN ISO 6892-1:2010P - Metale - Próba rozciągania - Część 1: Metoda badania w temperaturze pokojowej.
12. PN-EN ISO 6892-2:2011E - Metale - Próba rozciągania - Część 2: Metoda badania w podwyższonej temperaturze.
13. <http://www.instron.pl/wa/solutions/details.aspx?PageID=229> z dn. 15.01.14
14. PN-EN ISO 7438:2006P - Metale - Próba zginania.