Maciej Major, Judyta Różycka

GUMOPOCHODNE MATERIAŁY HIPERSPRĘŻYSTE - OMÓWIENIE I KRYTERIA PRAKTYCZNEGO ZASTOSOWANIA

1. Rys historyczny

Poszukiwania związków fizycznych, które opisywałyby zachowanie materiałów, w których mogą powstawać duże deformacje sprężyste pod wpływem różnych czynników zewnętrznych miały swój początek w XX w. W latach 40. i 50. pierwsze próby określenia związków konstytutywnych dla opisu zachowania gumy i materiałów gumopochodnych podjęli Mooney (1940) [1], Rivlin (1948), a w 1951 roku wyprowadzona została ogólna postać funkcji energii sprężystej przez Rivlina i Saundersa [2]. Zgodnie z wnioskami wynikającymi z powyższych prób materiały gumopochodne określane są jako materiały nieściśliwe, a ich funkcja energii odkształcenia jest zależna od dwóch pierwszych niezmienników tensora deformacji oraz dwóch stałych. Kolejnym etapem rozwoju wiedzy na temat materiałów hipersprężystych było wprowadzenie w 1959 r. przez Zahorskiego [3] funkcji energii odkształcenia, która określała materiał nieściśliwy z zależnością nieliniową od niezmienników tensora deformacji. Umożliwiło to opisanie sprężystego zachowania materiału gumopochodnego przy dużych deformacjach.

Materiały ściśliwe zostały określone równaniami konstytutywnymi w 1962 roku przez Blatza i Ko [4] oraz w 1971 roku przez Levinsona i Burgessa. Materiały te przy przejściach granicznych są zredukowane do znanych już nieściśliwych materiałów gumopochodnych. W 1982 roku powstał nieściśliwy i ściśliwy model Ogdena [5], opisujący zachowanie materiałów przy dużej skali deformacji. Do dnia dzisiejszego trwają prace nad znalezieniem prostych związków konstytutywnych o małej ilości stałych dobrze opisujących zachowanie materiałów gumopochodnych w każdej skali deformacji.

2. Nieliniowe materiały sprężyste - ogólne informacje

Materiały hipersprężyste cechuje zdolność do ulegania dużym odkształceniom sprężystym pod wpływem sił, a zarazem zachowanie pierwotnych własności.

Ośrodki takie wykazują zachowanie nieliniowe oznaczające, że ich deformacja nie jest wprost proporcjonalna do przyłożonego obciążenia.
Równania konstytutywne opisujące zależności między odkształceniami a naprężeniami lub odkształceniem a energią dla ciał hipersprężystych uzyskuje się na podstawie równań bilansu energii mechanicznej.
W zakresie teorii sprężystości oraz w ogólnych zagadnieniach mechaniki mamy do czynienia z materiałami sprężystymi bez więzów oraz materiałami sprężystymi z więzami wewnętrznymi. W przypadku ciał sprężystych bez więzów własności takiego ośrodka są określone, jeżeli istnieje możliwość zdefiniowania funkcji W, która dla każdej deformacji d tego ośrodka określa odpowiadającą jej energię sprężystą W(d) powstałą w jednostce objętości w odniesieniu do „konfiguracji odniesienia". Funkcja W jest tutaj tzw. funkcją energii odkształcenia.
Dla izotropowych jednorodnych ośrodków sprężystych równanie konstytutywne może przyjąć postać:

$$W = W(I_1, I_2, I_3) \tag{1}$$

gdzie:
I_1, I_2, I_3 - niezmienniki tensora deformacji.

Ciało sprężyste nieposiadające więzów można poddawać dowolnym deformacjom. Odmienną sytuację mamy, rozpatrując ośrodki, na które nałożone są więzy wewnętrzne. Podstawową postacią posiadanych więzów jest nieściśliwość. Takie materiały mogą być poddane wyłącznie deformacjom izochorycznym, czyli niewpływającym na zmianę ich objętości. Równanie konstytutywne dla ciał sprężystych nieściśliwych z uwzględnieniem koniecznego warunku określającego dopuszczalną deformację takiego ciała:

$$I_3 = 1 \tag{2}$$

będzie analogiczne do równania (1) i przyjmie postać:

$$W = W(I_1, I_2) \tag{3}$$

Z powyższego równania wynika więc, że energia odkształcenia materiału sprężystego nieściśliwego jest funkcją dwóch niezmienników tensora deformacji (I_1 i I_2), określających związki energii z deformacją.

3. Wybrane gumopochodne materiały hipersprężyste

Materiały hipersprężyste znalazły zastosowanie w różnych dziedzinach badań i dzięki możliwości analizy modelowania numerycznego stały się ważnym elementem w rozwoju poszczególnych szczebli wiedzy.
Aby zamodelować i zaprojektować przewidywany do wykorzystania materiał hipersprężysty, należy dobrać na początku odpowiednią funkcję energii odkształcenia

oraz prawidłowo wyznaczyć stałą materiałową dla wybranej funkcji. W obrębie teorii sprężystości dysponujemy wieloma modelami, które opisują zachowanie się ośrodków hipersprężystych. Możemy je podzielić na modele określające zachowanie materiałów ściśliwych i nieściśliwych.

3.1. Materiał Mooneya-Rivlina

Materiał ten jest powszechnie stosowanym modelem dla nieściśliwych materiałów gumowych i gumopochodnych. Jest szczególnym przypadkiem będącym wyni-
kiem ogólnej postaci funkcji energii sprężystej określonej przez Rivlina i Saundersa [2] i zaproponowanej przez Mooneya [1] empirycznej postaci funkcji energii odkształceń.
Model ten został zdefiniowany poniższym równaniem:

$$W = W(I_1, I_2) = \frac{\mu}{2}(f(I_1 - 3) + (1 - f)(I_2 - 3)) \tag{4}$$

gdzie zgodnie z warunkiem (2): $I_3 = 1$.

Model ten jest najogólniejszym teoretycznym modelem zachowania się materiałów sprężystych gumowych, charakteryzujących się stałymi wartościami pochodnych $\vartheta W/\vartheta I_1$ i $\vartheta W/\vartheta I_2$. W licznych pracach [6] przedstawiona jest szczegółowa analiza teorii sprężystości gumy Mooneya-Rivlina.
Nieliniowa teoria sprężystości niesie za sobą konieczność każdorazowego definiowania związku konstytutywnego, które odpowiadałyby rozpatrywanemu zagadnieniu. Każdy z materiałów gumopochodnych (naturalnych czy syntetycznych) pod wpływem dużych deformacji zachowuje się w inny sposób. Nie można więc przyjąć uogólnionego związku konstytutywnego i konieczne jest za każdym razem określenie na drodze doświadczalnej rozpatrywanego modelu równania konstytutywnego.
Szczególnym przypadkiem materiału Mooneya-Rivlina jest materiał neo-Hookeana, gdy parametr $f = 1$.

Model materiału neo-Hookeana określają następujące równania:

$$W = W(I_1) = \frac{\mu}{2}(f(I_1 - 3), \quad I_3 = 1 \tag{5}$$

Powyższe równanie konstytutywne opisuje gumę jednorodną.
Według badań eksperymentalnych opisanych w literaturze m.in. w [3, 4, 7] model neo-Hookeana dobrze definiuje sprężyste zachowanie się gum jednorodnych przy małych i umiarkowanych deformacjach. Model neo-Hookeana został zdefiniowany po raz pierwszy do zbadania molekularnej sieci łańcuchów dla materiałów gumopochodnych o budowie amorficznej.

3.2. Materiał Zahorskiego

Analiza badań przedstawiona w pracy [8] pokazała, że równanie konstytutywne, jakie zaproponował autor do zdefiniowania modelu tego materiału, dokładniej określa zachowanie gumy przy znacznie większych deformacjach niż materiał neo-Hookeana i materiał Mooneya-Rivlina.
Związek konstytutywny, o którym mowa, ma postać:

$$W = W(I_1, I_2,) = C_1(I_1 - 3) + C_2(I_2 - 3) + C_3(I_1^2 - 9) \tag{6}$$

Energia sprężysta dla omawianego nieściśliwego materiału sprężystego izotropowego jest zależna nieliniowo od niezmienników tensora deformacji. Zaproponowane równanie konstytutywne pozwala na dokładniejszą analizę zjawisk falowych propagujących się w sprężystych materiałach nieściśliwych.
Występujący w równaniu nieliniowy element:

$$C_3(I_1^2 - 9)$$

umożliwia przeprowadzenie precyzyjnej analizy oraz uzyskanie kolejnych elementów jakościowych do opisu procesów falowych.

3.3. Materiał Hadamarda

Model tego materiału określony jest następującym równaniem:

$$W = W(I_1, I_2, I_3) = \frac{\mu}{2}(f(I_1 - 3) + (1 - f)(I_2 - 3) + H_3(I_3)) \tag{7}$$

W powyższym związku spełniona jest nierówność wynikająca z klasycznej teorii sprężystości, a współczynnik μ jest modułem ścinania dla infinitezymalnej deformacji.
Ostatni człon równania $H_3(I_3)$ jest funkcją trzeciego niezmiennika tensora deformacji. Spełnia warunki konieczne:

$$H_3(1) = 0$$

$$2 - f + H_3'(1) = 0 \tag{8}$$

Uogólniony związek konstytutywny opisujący funkcję energii sprężystej dla materiału Hadamarda jest następujący:

$$W(I_1, I_2, I_3) = (H_1(I_3)(I_1 - 3) + H_2(I_3)(I_2 - 3) + H_3(I_3)) \tag{9}$$

w którym: $H_i(I_3)$ (gdzie i = 1, 2, 3) - funkcje trzeciego niezmiennika tensora deformacji.
Zgodnie z klasyczną teorią spełniają one warunek zgodności:

$$H_1(1) + H_2(1) = 1 \tag{10}$$

oraz warunki konieczne:

$$H_3(1) = 0;\ H_1(1) + 2H_2(1) + H_3'(1) = 0 \tag{11}$$

3.4. Materiał Genta

Model tego materiału został określony przez Genta prostym związkiem empirycznym, w którym występują dwie stałe. Związek ten opisujący materiał w każdym stopniu deformacji ma postać:

$$W = W(I_1) = -\frac{\mu}{2} J_m \ln\left(1 - \frac{J_1}{J_m}\right);\ J_m = (I_1 - 3) \tag{12}$$

gdzie μ oznacza moduł ścinania, $J_1 = (I_3 - 3)$, a J_m jest maksymalną wartością J_1, czyli wartością osiągnięcia przez materiał stanu granicznego, przy którym nastąpi całkowite rozciągnięcie łańcuchów sieci molekularnej. Człon zawierający niezmiennik tensora deformacji umożliwia zastosowanie powyższego związku do złożonych stanów deformacji.

Jeżeli mamy do czynienia z małymi deformacjami, gdzie $J_1/J_m \to 0$, dostaniemy $\ln(1 - J_1/J_m) \approx -J_1/J_m$. Tym sposobem równanie (12) zredukuje się do równania określającego neo-Hookeana.

Rozpatrując dowolne deformacje w nieściesliwych materiałach, bierze się pod uwagę również zależność od I_2. Aby uogólnić model Genta, wprowadzono do równania (12) drugi element liniowo niezależny od drugiego niezmiennika tensora deformacji $C_2(I_2 - 3)$.

Uogólniony model Genta przybrał postać:

$$W(I_1) = -\frac{\mu}{2} J_m \ln\left(1 - \frac{J_1}{J_m}\right) + C_2(I_2 - 3) \tag{13}$$

gdzie C_2 - stała.

3.5. Materiał Ogdena

Funkcja energii sprężystej określona jest następującym równaniem:

$$W(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = \sum_1^{\infty} \mu_m (\lambda_1^{\alpha_m} + \lambda_2^{\alpha_m} + \lambda_3^{\alpha_m} - 3)/\alpha_m \tag{14}$$

μ_m, α_m - stałe materiałowe, które zgodnie z teorią klasyczną spełniają warunek:

$$\sum_{i=1}^{N} \mu_m \lambda_m = 2\mu \tag{15}$$

N - liczba całkowita,
μ - moduł ścinania dla infinitezymalnych deformacji.

Wiele uogólnień funkcji energii sprężystości dla materiału Ogdena opisanych zostało w literaturze, m.in. [1, 2, 5].

3.6. Materiał Blatza-Ko

Związek konstytutywny zaproponowany w pracy Blatza, Ko w 1962 roku ma postać:

$$W = W(I_1, I_2, I_3) = \frac{\mu f}{2}\left\{I_1 - 3 + \frac{1-2\nu}{\nu}\left[I_3^{\frac{-\nu}{1-2\nu}} - 1\right]\right\} + \frac{\mu(1-f)}{2}\left\{\frac{I_2}{I_3} - 3 + \frac{1-2\nu}{\nu}\left[I_3^{\frac{-\nu}{1-2\nu}} - 1\right]\right\} \tag{16}$$

μ - moduł ścinania,
ν - współczynnik Poissona spełniający nierówność $0 \le \nu \le 0{,}5$.

Zaproponowane równanie konstytutywne może określać zachowanie gumy jednorodnej oraz gumy piankowej. Występujący w równaniu parametr f, oznaczający udział porów w danym materiale, jest określony nierównością: $0 \le f \le 1$.
Gdy f osiąga wartości skrajne 0 lub 1, mamy do czynienia z przypadkiem szczególnym i tak:
gdy $f = 0$ - równanie opisuje gumę piankową,
gdy $f = 1$ - równanie opisuję gumę jednorodną.

3.7. Materiał Arruda-Boyce'a

Funkcja energii sprężystej określona jest następującym równaniem:

$$W = \mu\left[\frac{1}{2}(I_1 - 3) + \frac{1}{20\lambda_m^2}(I_1^2 - 9) + \frac{11}{1050\lambda_m^4}(I_1^3 - 27) + \frac{19}{7000\lambda_m^6}(I_1^4 - 81) + \frac{519}{673750\lambda_m^8}(I_1^5 - 243)\right] + \frac{1}{D}\left(\frac{J_e^2 - 1}{2} - \ln J_e\right) \tag{17}$$

gdzie:
μ - moduł ścinania,
λ_m, D - parametry materiałowe,
J_e - współczynnik objętości sprężystej,
I_1 - pierwszy niezmiennik tensora deformacji wyrażony wzorem:

$$I_1 = \bar{\lambda}_1^2 + \bar{\lambda}_2^2 + \bar{\lambda}_3^2 \tag{18}$$

gdzie:
$\bar{\lambda}_i$ - wartość dewiatorowa rozciągnięcia określona zależnością:

$$\bar{\lambda}_i = J^{-\frac{1}{3}} \lambda_i \tag{19}$$

J - współczynnik objętości całkowitej,
λ_i - wartości główne rozciągnięcia.

Powyższy związek konstytutywny opisujący zachowanie się sprężystych materiałów gumowych przy dużych wydłużeniach został wyprowadzony przez Arrudę i Boyce'a w 1993 r. Nazywany jest często modelem ośmiołańcuchowym.

3.8. Materiał Yeoh

Związek konstytutywny opisujący funkcję energii sprężystej dla tego materiału ma postać:

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{20}(I_1 - 3)^2 + C_{30}(I_1 - 3)^3 + \frac{1}{D_1}(J_e - 1)^2 + \\ + \frac{1}{D_2}(J_e - 1)^4 + \frac{1}{D_3}(J_e - 1)^6 \tag{20}$$

C_{i0}, D_1 - stałe materiałowe.

Skracając postać powyższego wzoru, można zapisać:

$$\sum_{i=1}^{n} C_{i0}(I_1 - 3)^i + \sum_{k=1}^{n} \frac{1}{D_k}(J - 1)^{2k} \tag{21}$$

Stała C_{10} określana jest jako połowa początkowego modułu ścinania.
Jeżeli n = 1, wzór Yeoh zostaje zredukowany do materiału neo-Hookeana.

4. Kryterium zastosowania materiałów hipersprężystych

Po dobraniu odpowiedniej funkcji energii odkształcenia oraz prawidłowym wyznaczeniu stałych materiałowych można modelować nieliniowe materiały sprężyste. Badania tego typu mają zastosowanie w wielu istotnych gałęziach nauki i wykorzystuje się je w różnych gałęziach przemysłu.

4.1. Medycyna

Dzięki możliwości przeprowadzenia analizy zachowania danego materiału w przygotowanym do tego programie numerycznym po wprowadzeniu odpowiednich stałych materiałowych można stworzyć bardzo ważne elementy wpływające na rozwój medycyny.

Przykładem jest tu możliwość zaprojektowania zastawki mechanicznej, pełniącej rolę sztucznej zastawki serca. Pierwszym etapem takiego projektu jest numeryczne zamodelowanie jednowarstwowego płatka zastawki aortalnej. Model ten stanowi początek projektu zaawansowanego, trójwarstwowego modelu sztucznej protezy, która kształtem i właściwościami odzwierciedli prawdziwą zastawkę. Materiały hipersprężyste stanowią tu bardzo istotne rozwiązanie problemu, jaki stanowi brak trwałości zastępczych zastawek wykonanych z materiałów biologicznych. Aby wyeliminować błędy już w początkowej fazie projektowania na podstawie analizy doświadczalnej i szeregu przeprowadzonych badań, należy odpowiednio zamodelować model płatka projektowanej zastawki. Następnie należy przeprowadzić potrzebne symulacje komputerowe. Jak podają dane literaturowe [5], jednym z najczęściej podawanych modeli płatka zastawki są modele: Mooneya-Rivlina i Ogdena. W tym zakresie można również wykorzystać materiał Zahorskiego.
Hipersprężyste związki konstytutywne stosowane są również w medycynie do modelowania tkanek miękkich. Znajduje to zastosowanie m.in. w biomechanice.

4.2. Biomechanika

Biomechanika jako nauka zajmująca się mechanicznym przedstawieniem funkcji żywego organizmu obejmuje m.in. rehabilitację, robotykę, ergonomię, a także protetykę, co wymaga szerokiej wiedzy z zakresu mechaniki i medycyny. W obrębie tej dziedziny prowadzi się badania biomechanicznych układów, do których należy np. segment ruchomy kręgosłupa. Jest to jednak w normalnych warunkach pracy trudne, a czasami niemożliwe do zrealizowania. Wykorzystuje się wówczas metody numeryczne, dające możliwość obserwacji zachowania mechanicznego różnych struktur biologicznych. Największą trudnością staje się zamodelowanie takiego układu biomechanicznego, czyli próba opisania równaniem konstytutywnym różnorodnych i zmiennych tkanek.
W tym przypadku należy opracować adekwatny, matematyczny model zachowania materiału. Hipersprężyte równania konstytutywne muszą opisywać tutaj m.in. model tkanek miękkich krążka międzykręgowego (włókien kolagenowych), model więzadeł (mających charakter sprężysty i poddawanych dużym odkształceniom). Szersze spektrum tego zagadnienia znajduje się w pracy [9].

4.3. Przemysł

Istotnymi elementami, wykorzystywanymi w przemyśle, są materiały gumowe i gumopochodne, cechujące się nieliniową sprężystością. Można wyróżnić tutaj wiele gałęzi przemysłu, w których wspomniane materiały pełnią istotną rolę, m.in. w przemyśle maszynowym, elektrotechnicznym, w medycynie oraz lotnictwie, motoryzacji i budownictwie. Guma wykorzystywana jest m.in. do produkcji opon, czyli jest nieodłącznym elementem przemysłu motoryzacyjnego. Jak wspomniano

w punkcie 3.1, najbardziej powszechnym modelem opisującym gumę jest model Mooneya-Rivlina. Stosuje się również materiał Blatza-Ko. Stałe materiałowe wyznacza się doświadczalnie oraz sprawdza się ich poprawność na stanowisku badawczym.
Ze względu na swoją zdolność do bardzo dużych odkształceń materiały hipersprężyste mogą być wykorzystywane w postaci nieściśliwych elastomerów lub ściśliwych pianek poliuretanowych.

Przykładem zastosowania elastomeru poliuretanowego może być wykorzystanie go do budowy tłumika drgań samowzbudnych, które powstają na skutek sprężenia ściennego między oponą a podłożem podwozia niewielkiego samolotu. Drgania te nazywane są drganiami „shimmi”. Szczegółowe badania zachowania się takiego materiału we wspomnianym zagadnieniu opisane są w pracy [10]. Innym przykładem zastosowania elastomerów jest wykorzystywanie ich w protetyce, m.in. jako materiały wyciskowe.
Ściśliwe pianki poliuretanowe stosowane są natomiast m.in. w konstrukcjach foteli samochodowych, co również ukazane jest w pracy [10].
W zagadnieniach dotyczących modelowania ośrodków nieliniowych w zagadnieniach przemysłowych mają również zastosowanie nieliniowe materiały nieściśliwe, m.in. materiał Hadamarda i Genta.

4.4. Budownictwo

Materiały hipersprężyste znalazły szereg zastosowań również w budownictwie. Wykorzystuje się je m.in. w konstrukcjach budowlanych jako elastyczne sprężyste skleiny łączące metalowe elementy konstrukcyjne z kruchym szkłem. Dzięki zastosowaniu takich materiałów można wyeliminować punktowe dociski metalu do szkła, kruche pękanie szkła, jak również uzyskać wrażenie gładkiej struktury zewnętrznej projektowanego budynku. Określając nośność graniczną takiego połączenia z uwzględnieniem wszystkich czynników wpływających na zniszczenie, wykorzystuje się metodę elementów skończonych, korzystając przy tym z kilku modeli materiałowych. Dobór odpowiedniego materiału do zamodelowania uzależniony jest od określenia modelu reologicznego materiału. Według literatury [6], do analizy stanu naprężenia takiego połączenia można posłużyć się modelem hipersprężystym, np. Arruda-Boyce'a. Porównywalnym modelem materiałowym może być model Blatz-Ko [11]. Po przeprowadzeniu analizy numerycznej podejmuje się próbę ukształtowania skleiny, która będzie niwelować miejsca koncentracji naprężeń, równomiernie rozkładając ich wartości, co powoduje zwiększenie nośności całego połączenia.

Budownictwo jest bardzo ważną gałęzią gospodarki. Istotne jest więc, aby wszystkie dziedziny z nią związane mogły się efektywnie i ekonomicznie rozwijać, przyspieszając i poprawiając ogół prac budowlanych. Ważną i pomocną rolę w poszukiwaniu nowych i optymalnych konstrukcji oraz rozwiązań pełnią omawiane modele materiałów hipersprężystych. Przykładem może być projektowanie takich urządzeń, jak przenośniki taśmowe, stosowane do transportu materiałów w magazynach, zakładach, jak również na placach budowy. Szczególną rolę pełnią tutaj połączenia taśm przenośnikowych, które w czasie eksploatacji narażone są na duże obciążenia dynamiczne. Optymalne połączenie odcinków taśmy przenośnikowej można uzyskać, wykorzystując do analizy MES. Niesie to za sobą potrzebę odpowiedniego opisania modelu analizowanego materiału. Aby zdefiniować połączenie klejowe taśmy przenośnikowej, powstałej z gumy oraz kleju kauczukowego, również na bazie gumy, najczęściej wykorzystuje się model materiału hipersprężystego. Na drodze eksperymentalnej, posiadając dane z badań wytrzymałości, można sprawdzić, który ze znanych modeli ukazuje najbardziej rzeczywiste zachowanie się rozpatrywanego materiału. Badania nad takimi połączeniami przeprowadzono w pracy [12]. W badaniach tych przetestowano osobno dla każdego składowego materiału o pochodzeniu kauczukowym analizowanego połączenia znane modele materiałów hipersprężystych. Porównywano ich zgodność z wynikami eksperymentalnymi poprzez analizę zachowania się materiału hipersprężystego w określonym przypadku.

5. Przegląd wybranych programów numerycznych wykorzystujących modele materiałów hipersprężystych

Do analizy zachowania nieliniowych materiałów hipersprężystych można stosować te programy numeryczne, które wykorzystują metodę elementów skończonych. MES jest metodą przybliżoną rozwiązywania cząstkowych równań różniczkowych. Większość programów numerycznych, wykorzystujących MES, zawiera w swojej bibliotece zbiory wybranych modeli materiałów, w tym również modele materiałów hipersprężystych.
Dokonując doboru jednego z nich, można przeprowadzić dokładną analizę numeryczną nieliniowego zachowania projektowanego elementu. Najczęściej stosowanymi programami do obliczeń tego typu są programy: ANSYS, ABAQUS, MARC, NASTRAN, ALGOR.

ANSYS to program umożliwiający inżynierską symulację bazującą na MES. Oferuje duży zakres analizy, m.in. statyki, pola magnetycznego, zjawisk zmiennych w czasie, oraz daje możliwość symulacji zarówno zjawisk liniowych, jak i nieliniowych. Najczęściej wykorzystywanym programem z pakietu ANSYS jest ANSYS/ /Mechanical, w którym możliwa jest analiza liniowych i nieliniowych zachowań materiałów z uwzględnieniem dużych odkształceń, plastyczności i hipersprężystości. ANSYS posiada ponad 70 modeli materiałów nieliniowych i anizotropowych, m.in. Ogdena, Mooneya, Blatza-Ko, Arruda-Boyce'a, Yeoh, Genta i innych.

ABAQUS to program służący do analizy nieliniowych układów, gdzie wykorzystuje się MES w obszarze trudnych zagadnień inżynierskich. Jest stosowany m.in. do oceny wytrzymałości elementów konstrukcji oraz maszyn, uwzględniając obciążenia, temperaturę, ewentualne zderzenia, jak również miejsca połączeń. ABAQUS znajduje zastosowanie w przemyśle, m.in. maszynowym, lotniczym, samochodowym oraz w budownictwie. Dzięki wielu narzędziom ułatwia wybranie wymaganych opcji zgodnie z bieżącym zapotrzebowaniem. Program umożliwia zaprojektowanie ekonomicznej, energooszczędnej oraz bezpiecznej konstrukcji, a także znacznie skraca czas wdrożenia danego elementu.

MARC to program służący do symulacji różnych zjawisk mechanicznych na bazie MES. Stosuje się go przede wszystkim do analizy zjawisk nieliniowych. Wykorzystywany jest m.in do analizowania elementów wykonanych z gumy, polimerów i innych, tam gdzie zachodzi potrzeba uwzględnienia dużych przemieszczeń lub skomplikowanych warunków styku.

NASTRAN to program służący do analizy skomplikowanych problemów inżynierskich z zastosowaniem MES. Wykorzystuje się go przede wszystkim w przemyśle maszynowym, lotniczym, hutniczym, samochodowym oraz w budownictwie.

ALGOR to kolejny program oferujący wiele możliwości do wykonania symulacji obliczeniowych dla projektowanych elementów mechanicznych, dzięki czemu już na etapie projektowania można wyeliminować błędy oraz ograniczyć przyszłe koszty eksploatacyjne. ALGOR dzięki obsłudze wielu środowisk CAD oraz rozbudowanym narzędziom modelowania MES pozwala przeprowadzić wstępne badania dla przyjętych założeń projektowych i przewidzieć wydajność końcowego produktu. AutodeskAlgorSimulation pozwala na optymalizację oraz weryfikację błędów jeszcze na etapie projektowym, zwiększając wydajność, co znacznie wpływa na obniżenie kosztów. W swojej bibliotece materiałów ALGOR posiada modele materiałów hipersprężystych, m.in. Arruda-Boyce'a, Blatza-Ko, Mooneya-Rivlina, Ogdena.

Literatura

[1] Mooney M., A theory of large deformations, J. Appl. Phys. 1940, 11, 582-592.

[2] Rivlin R.S., Saunders D.W., Large elastic deformations of isotropic materials. VII. Experiments of the deformation of rubber, Phil. Trans. Roy. Soc. Lond. A 1951, 243, 251-288.

[3] Zahorski S., Doświadczalne badania niektórych własności mechanicznych gumy, Engineering Transations 1962, 10, 193-207.

[4] Blatz P.J., Ko W.L., Application of finite elastic theory to the deformation of rubbery materials, Trans. Soc. Rheol. 1962, 6, 223-251.

[5] Ogden R.W., Elasticity and inelasticity of rubber, Mechanics and thermomechanics of rubberlike solids, CISM Couses and Lect. -No. 452, (Eds. G. Saccomandi, R.W. Ogden), Springer, 2004, 134-185.

[6] Truesdell C., Noll W., The Non-Linear Field Theories of Mechanics, III ed., ed. S.S. Antmana, Springer, 2004.

[7] Aleksander H., A constitutive relation for rubberlike materials, Int. J. Eng. Sci., 6, 549-563.

[8] Wang L.R., Lu Z.H., Modelling method of constitutive law of rubber hyperelasiticity based on finite element simulations, Rubber Chem. & Technol. 2003, 76, 271-285.

[9] Wierszycki M., Numeryczna analiza wytrzymałościowa wszczepów uzębienia oraz segmentu kręgosłupa ludzkiego, rozprawa doktorska, Politechnika Poznańska, Poznań 2007.

[10] Major M., Major I., Przegląd wybranych materiałów hipersprężystych, [w:] Tendencje rozwoju budownictwa miejskiego i przemysłowego, praca zbiorowa pod red. T. Bobki, J. Rajczyka, M. Rajczyk, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2008, 258-263.

[11] Cwyl M., Specyfikacja połączeń fasad metalowo-szklanych i metody analizy, Politechnika Warszawska, Warszawa 2008.

[12] Mazurkiewicz D., Problems of numerical simulation of stress and strain, Wydział Mechaniczny, Politechnika Lubelska.

[13] Arruda E.M., Boyce M.C., A three-dimensional model for the large stretch behavior of rubber elastic materials, J. Mech. Phys. Solids 1993, 41(2), 389-412.

[14] Boczkowska A., Babski K., Osiński J., Żach P., Modelowanie charakterystyki przy ściskaniu oraz właściwości użytkowe hiperelastycznych materiałów poliuretanowych stosowanych w budowie maszyn, Wydział Inżynierii Materiałowej i Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych, Politechnika Warszawska, Warszawa 2005.

[15] Boyce M.C., Arruda E.M., Constitutive models of rubber elasticity: a review, Rubber Chem. Technol. 2000, 73, 504-523.

[16] Flugge W., Handbook of Engineering Mechanics, McGraw-Hill, New York 1962.

[17] Saccomandi G., Phenomenology of rubberlike materials, Mechanics and thermomechanics of rubberlike solids, CISM Couses and Lect - No. 452. (Eds. G. Saccomandi, R.W. Ogden), Springer, 2004, 91-133.

[18] Yeoh O., Some forms of the strain energy function for rubber, Rubber Chem. and Technol. 1993, 66, Issue 5, November, 754-771.

Streszczenie

W niniejszej pracy dokonano przeglądu gumopochodnych materiałów hipersprężystych. Podano związki konstytutywne opisujące ich zachowanie oraz kryterium praktycznego zastosowania. Przedstawiono również wybrane programy numeryczne wykorzystujące modele materiałów hipersprężystych.

Rubber-derivative hyperelastic materials discussion and criteria of practical application

Abstract

This paper presents the review of rubberlike hyperelastic materials, their constitutive relations describing their behaviour and the criterion of practical application. It also contains some numerical programs which use hyperelastic materials models.