

ANNA BOCZKOWSKA¹⁾, KAMIL BABSKI¹⁾, JERZY OSIŃSKI²⁾, PIOTR ŻACH²⁾

Modelowanie charakterystyki przy ściskaniu oraz właściwości użytkowe hiperelastycznych materiałów poliuretanowych stosowanych w budowie maszyn

Streszczenie — Przedmiotem badań były materiały o zdolności do bardzo dużych odwracalnych odkształceń (hiperelastyczne) w postaci nieściśliwych elastomerów i ściśliwych pianek poliuretanowych. Modelowano zachowanie tych materiałów przy ściskaniu: do opisu elastomerów zastosowano przy tym modele wielomianowe, w odniesieniu zaś do pianek — modele Ogdena różnych rzędów. Wyniki obliczeń weryfikowano doświadczalnie. Ponadto określano też szereg wybranych właściwości użytkowych badanych materiałów z punktu widzenia ich zastosowań: elastomerów o różnych stosunkach segmentów sztywnych do giętkich ($S/G = 0,25, 0,5$ lub $0,75$) jako tłumików drgań typu *shimmy* oraz pianek miękkich jako materiałów konstrukcyjnych siedzeń samochodowych. Charakterystyka ta obejmowała temperaturę zeszklenia elastomerów (ważną ze względu na użytkowanie w niskiej temperaturze), ich odbojność, twardość oraz ścieralność a także — w przypadku pianek miękkich — moduł sprężystości przy ściskaniu i zdolność do tłumienia drgań.

Słowa kluczowe: materiały hiperelastyczne, poliuretany, elastomery, pianki, ściśliwość, modele wielomianowe, właściwości użytkowe.

MODELING OF CHARACTERISTICS AT COMPRESSION AND FUNCTIONAL PROPERTIES OF HYPERELASTIC POLYURETHANE MATERIALS APPLIED IN MECHANICAL ENGINEERING

Summary — The materials showing great reversible deformations (hyperelastic ones) namely non-compressible elastomers and compressible polyurethane foams were subjects of investigations. The behavior of these materials at compression has been modeled. Polynomial models were used for the description of elastomers while Ogden's models of various orders were applied to describe the foams. Calculations results were verified experimentally (Fig. 1—4). Additionally, several functional properties of the materials were evaluated from the point of view of their applications: elastomers differing in ratios of rigid (S) and elastic (G) segments ($S/G = 0.25, 0.5$ or 0.75) as *shimmy* dumpers (Fig. 5—7, Table 1 and 2) and soft foams applied for car seats' construction (Fig. 8 and 9). The characteristics of materials consisted of glass transition temperature of elastomers (important when applied at low temperature), their resilience, hardness and abrasive wear as well as, for soft foams, also compression modulus and damping capacity.

Key words: hyperelastic materials, polyurethanes, elastomers, foams, compressibility, polynomial models, functional properties.

Polimerowe materiały konstrukcyjne stosowane w budowie maszyn powinny wykazywać zespół określonych właściwości, spośród których istotne znaczenie ma zdolność do bardzo dużych odwracalnych odkształceń. Materiały spełniające ten warunek nazywa się hiperelastycznymi. Wiedza dotycząca charakteru wspomnianych odkształceń opiera się na znajomości wybranych aspektów fizykochemii polimerów [1—7].

W celu określenia właściwości danego rodzaju hiperelastycznego materiału z uwzględnieniem przewidywanych zastosowań prowadzi się postępowanie dwuetapowe.

Na pierwszym etapie — wykorzystując teorię materiałów hiperelastycznych i przyjmując odpowiedni model — dokonuje się modelowania opisującego zachowanie się takiego materiału pod wpływem odkształceń. Dobrze poznana teoria odnosząca się do cech sprężystych polimerów hiperelastycznych wykorzystuje modele wielomianowe, takie jak Mooney'a—Rivlina lub Jamesa—Greena—Simpsona oraz modele Ogdena. Mniej zbadane są właściwości tłumiące (rozpraszanie energii), a stosowanymi do opisu modelami — tłumienia proporcjonalnego lub tłumienia modalnego — nie można się w tym przypadku posłużyć, ponieważ zachowanie się materiałów hiperelastycznych jest wyraźnie nieliniowe, co stwarza konieczność przyjmowania w modelowaniu zbyt dużych odkształceń.

Na drugim etapie opisywanego postępowania przeprowadza się doświadczenia i na podstawie uzyska-

¹⁾ Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Materiałowej, ul. Wołoska 141, 02-507 Warszawa.

²⁾ Politechnika Warszawska, Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych, Instytut Podstaw Budowy Maszyn, ul. Narbutta 84, 02-524 Warszawa.

nych rezultatów dokonuje się weryfikacji danych wynikających z założonego na pierwszym etapie modelu.

Celem pracy przedstawionej w niniejszej publikacji było określenie wspomnianą metodą właściwości dwu rodzajów materiałów hiperelastycznych. Pierwszy stanowił elastomer poliuretanowy przewidziany jako materiał do budowy tłumika drgań samowzbudnych wywoływanych sprzężeniem ciernym między kołem (oponą) a podłożem w podwoziu małego samolotu i nazywanych drganiem *shimmy* (tzw. wężykowanie) [8, 9]. Drugi to miękka pianka poliuretanowa stosowana w konstrukcji fotela samochodowego [10] (badania modyfikacji foteli prowadzono we współpracy z firmą Faurecia Fotele Samochodowe).

Dla porównania, ocenie poddano również handlową piankę poliuretanową Cellasto.

Na etapie modelowania właściwości sprężystych posłużono się modelem wielomianowym a w modelowaniu cech tłumiących — funkcją wykładniczą analogiczną do funkcji wprowadzonej w opisie pełzania [11, 12].

CZĘŚĆ DOŚWIADCZALNA

Materiały

— Elastomer poliuretanowy o nazwie Epunit wytwarzany na Wydziale Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej [13] zbudowany z segmentów giętkich i sztywnych. W badaniach stosowano próbki o stosunku segmentów sztywnych (*S*) do giętkich (*G*) wynoszącym 0,25; 0,5 lub 0,75.

— Miękka pianka poliuretanowa z porami otwartymi o małej gęstości pozornej [30 (B2) lub 60 kg/m³ (B)] firmy Roho GmbH, stosowana w konstrukcji foteli samochodowych i w materacach leczniczych. Odmiana pianki o gęstości 60 kg/m³ zawierała dodatek środka zwiększającego lepkość (R).

— Porównawcza handlowa pianka poliuretanowa Cellasto firmy BASF (Elastgran GmbH) z porami zamkniętymi o gęstości pozornej ok. 600 kg/m³, stosowana w zawieszaniach samochodów.

Metody badań

— W obliczeniach modelowych wykorzystywano system MES (Metody Elementów Skończonych) ABAQUS umożliwiający tworzenie modeli zachowań zgodne z teorią materiałów hiperelastycznych.

— Właściwości cieplne elastomerów oceniano za pomocą kalorymetru Q-1000 firmy TA Instruments. Próbki ogrzewano ze stałą szybkością 10 deg/min w atmosferze azotu.

— Wytrzymałość na ściskanie próbek elastomeru różniących się zawartością segmentów sztywnych określano z zastosowaniem maszyny wytrzymałościowej Q-test 10 firmy MTS. Szybkość ściskania w temp. 23 °C wynosiła 5 mm/min. Ścisnaniu poddawano próbki

w postaci walca o wymiarach $\phi = 23,5$ mm, $h = 30,5$ mm. Obrazy próbek podczas ściskania rejestrowano co 2 s za pomocą kamery.

— Moduł Younga (*E*) przy rozciąganiu badano przy użyciu maszyny wytrzymałościowej typu Instron 1115 wg PN-EN ISO 527-1:1998.

— Odbojność (η) wyznaczano metodą Schoba wg PN-C-04255:1997.

— Twardość (*H*) oceniano metodą Shore'a wg PN-EN ISO 868:2005.

— Zużycie ściernie ΔV_s określano metodą Schoppea—Schlobacha wg PN-ISO 4649:2007.

— Mechaniczne właściwości dynamiczne badano metodą DMA za pomocą aparatu Q800 firmy TA Instruments w warunkach stałej temperatury 25 °C i zmiennej częstotliwości 1—25 Hz. Oceniano trzy rodzaje pianek miękkich (B2, B i R), mierząc moduł sprężystości oraz tangens kąta przesunięcia fazowego (odpowiadający zdolności materiału do tłumienia drgań).

WYNIKI I ICH OMÓWIENIE

Modelowanie cech materiałów hiperelastycznych

Elastomer do tłumików drgań

Przedmiot modelowania stanowiły tu właściwości elastomerycznego poliuretanu o nazwie handlowej Epunit przeznaczonego na materiał tłumika drgań *shimmy*. Zaletą takiego tłumika powinna być mniejsza niż w przypadku tłumików hydraulicznych wrażliwość na zmiany temperatury otoczenia. Łańcuch Epunitu jest zbudowany z segmentów giętkich i sztywnych, których udział decyduje o właściwościach materiału. Stwarza to już na etapie syntezy możliwości zmiany cech elastomeru w celu optymalizacji do konkretnych zastosowań. Polimeryczne elastomery odznaczają się entropowym charakterem sprężystości (analogia sprężystości elastomeru do sprężania gazu idealnego), z którego wynika zdolność do bardzo dużych odkształceń odwracalnych (1000 razy większych niż metali) oraz faktyczna nieściśliwość [1]. Do opisu takich właściwości przyjmuje się na ogół model wielomianowy w postaci równania (1):

$$W = \sum_{i,j=0}^{\infty} C_{ijk} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j (I_3 - 1)^k \quad (1)$$

gdzie: *W* — funkcjonal elastyczności, *I* — niezmiennik stanu odkształceń, *C_{ijk}* — współczynniki modelu

i równania (2) określającego niezmienniki stanu odkształceń:

$$\begin{aligned} I_1 &= \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \\ I_2 &= \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2 \\ I_3 &= \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 \end{aligned} \quad (2)$$

gdzie: λ — odkształcenie względne (rozciągnięcie).

Parametr λ to inaczej zdefiniowana miara odkształceń związana z powszechnie przyjmowaną miarą odkształceń ϵ zależnością (3):

$$\lambda_i = 1 + \varepsilon_i \quad (3)$$

Wartość λ odpowiada więc stosunkowi całkowitej długości odcinka pomiarowego po odkształceniu do jego długości początkowej, zaś indeksy $i = 1, 2, 3$ odpowiadają kierunkom odkształceń głównych według ich znaczenia. Pierwsze dwa składniki w równaniu (1) (wskaźniki „i”, „j”) przedstawiają odkształcenia postaciowe, trzeci zaś (wskaźnik „k”) odkształcenie objętościowe. Ze względu na nieściśliwość materiału w analizie można pominąć trzeci składnik wzoru (1) przyjmując dużą (zbliżoną do 0,5) liczbę Poissona. Ponieważ z punktu widzenia właściwości elastomerów zasadnicze znaczenie ma pierwszy składnik w równaniu (1) (ze wskaźnikiem „i”) opisujący elastyczność wynikającą ze stopnia usieciowania, to drugi składnik w tym równaniu (wskaźnik „j”) może być pominięty. Na podstawie zestawienia opisującego energię swobodną sieci ΔF równania (4),

$$\Delta F = \frac{1}{2} \nu k T (\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 - 3) \quad (4)$$

gdzie: ν — liczba łańcuchów sieci, k — stała Boltzmanna, T — temperatura bezwzględna,

z równaniem (1) ograniczonym do pierwszego członu można stwierdzić, że stałe C_{i0} określają moduł elastyczności. Otrzymuje się wówczas zredukowany model wielomianowy nazywany również modelem Yeoha [14]:

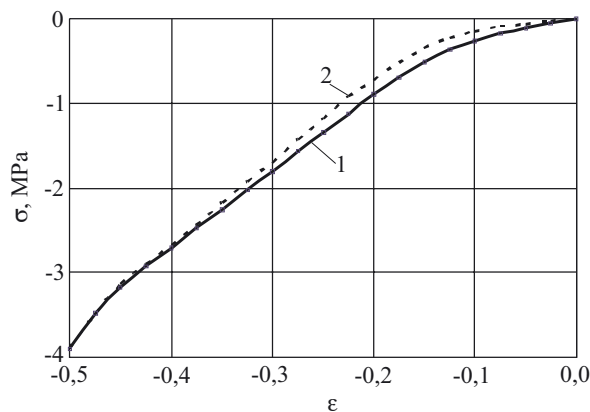
$$W = \sum_{i=0}^{\infty} C_i (I_1 - 3)^i \quad (5)$$

Zakłada on, że wszystkie współczynniki stanowią funkcje temperatury i prędkości odkształceń.

Powyższe wnioski potwierdziły doświadczenia, polegające na ścisaniu próbki elastomeru w kształcie walca. Do oceny wyników posłużono się MES, przy czym parametry modelu dobrano tak, aby dokładnie odpowiadał on rzeczywistym warunkom wykonywanego doświadczenia, tzn. uwzględniono tarcie pomiędzy próbką a płytkami maszyny wytrzymałościowej, albowiem specyficzne właściwości materiałów hiperelastycznych nie pozwalają na wyeliminowanie tarcia w badaniach. Zastosowanie zarówno w obliczeniach MES, jak i w badaniach doświadczalnych identycznego kształtu próbki umożliwia wykonanie oznaczenia właściwości polimeru niezależnie od tego kształtu.

Po rozważeniu kilkudziesięciu wygenerowanych przez system ABAQUS wariantów modeli materiałów hiperelastycznych potwierdzono, że rzeczywiście najlepszy jest zredukowany model wielomianowy; przyjęto model 6. rzędu.

Porównanie krzywych ścisania wyznaczonych doświadczalnie z krzywymi wynikającymi z obliczeń przedstawiono na rys. 1. Ścisanie elastomeru, w którym stosunek molowy segmentów sztywnych do giętkich wynosił 0,75 prowadzono przy tym z niewielką prędkością 0,025 mm/s (próba quasistatyczna) w temp. 21 °C. Wartości liczbowe współczynników modelu przedstawionego równania (5) wynoszą: $C_{10} = 326\,673$,



Rys. 1. Krzywe ścisania: 1 — wyznaczona doświadczalnie (elastomer o stosunku $S/G = 0,75$, prędkość odkształcania 0,025 mm/s, temp. 21 °C), 2 — wyznaczona na podstawie obliczeń modelowych

Fig. 1. Compression curves: 1 — determined experimentally (elastomer characterized with $S/G = 0.75$, deformation rate 0.025 mm/s, temp. 21 °C), 2 — calculated from the model

$C_{20} = 1\,122\,856$, $C_{30} = -139\,012$, $C_{40} = -1\,265\,726$, $C_{50} = 1\,089\,879$, $C_{60} = -259\,260$.

W celu uwzględnienia właściwości tłumiących materiału założyliśmy, że jego zachowanie może być opisane modelem złożonym z niezależnych członów odnoszących się do zachowania elastycznego i zachowania lepkiego. Właściwości elastyczne opisuje dowolny model materiału hiperelastycznego, w drugim członie zaś przyjęliśmy zależność nieliniową z funkcją wykładniczą [11, 12]:

$$\lambda_i = A[\lambda_i - 1]^C (\sigma_i)^m \quad (6)$$

gdzie: A oraz m — stałe o dowolnej wartości, C — wykładnik odkształceń pełzających o wartości z przedziału $(-1, 0)$.

Po przekształceniu równania (6) otrzymuje się wzór na σ_i , czyli naprężenie w członie modelu opisującym lepkie zachowanie się materiału:

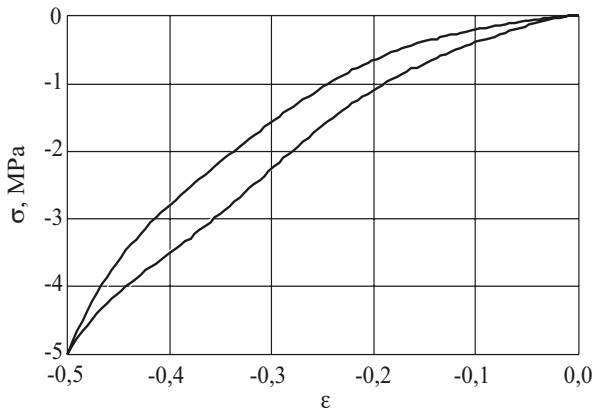
$$\sigma_i = m \sqrt[m]{\frac{\lambda_i}{A(\lambda_i - 1)^C}} \quad (7)$$

Po zróżniczkowaniu równania (2) względem λ_1 , przekształceniu wzoru (7) i zsumowaniu uzyskuje się zależność określającą naprężenie w kierunku ścisania próbki:

$$\sigma_1 = \sum_{i=1}^6 C_{i0} \cdot \frac{1}{i} (I_1 - 3)^{i-1} \cdot 2\lambda_1 + S \cdot m \sqrt[m]{\frac{\lambda_i}{A(\lambda_i)^C}} \quad (8)$$

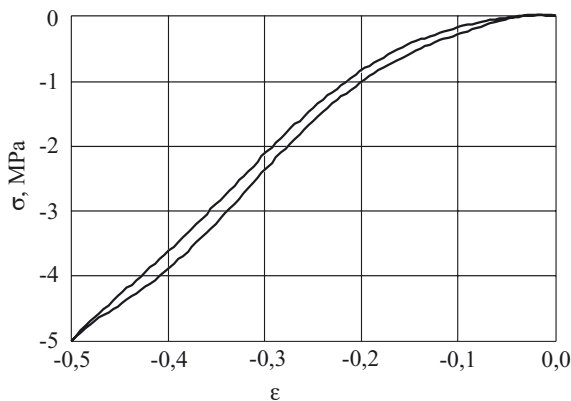
gdzie: S — współczynnik skali (z przedziału $0, 1$).

Współczynnik skali stanowi stosunek udziału członu opisującego zachowanie lepkie do udziału członu opisującego zachowanie elastyczne. Liczbowe wartości parametrów równania (8) wyznaczono na podstawie wyników doświadczeń — wykonywano próby obciążania i odciążania rejestrując pętlę histerezy.



Rys. 2. Pętla histerezy w przypadku quasistatycznego ściskania elastomeru o $S/G = 0,75$ z prędkością $0,025$ mm/s (temperatura początkowa -15 °C)

Fig. 2. Hysteresis loop for quasi-static compression of elastomer ($S/G = 0.75$) at initial temperature 15 °C (rate 0.025 mm/s)



Rys. 3. Pętla histerezy w przypadku ściskania elastomeru o $S/G = 0,75$ z prędkością 1 mm/s (temperatura początkowa 21 °C)

Fig. 3. Hysteresis loop for compression of elastomer ($S/G = 0.75$) at initial temperature 21 °C (rate $0,025$ mm/s)

Oceniając wpływ temperatury początkowej w badaniach ściskania, ważny ze względu na stosowanie elastomeru w niskiej temperaturze, próbkę polimeru poddawano quasistatycznemu obciążaniu w warunkach temperatury początkowej -15 °C. Rysunek 2 przedstawia obliczoną i potwierdzoną doświadczalnie pętlę histerezy, gdzie liczbowe współczynniki modelu (C_{i0}) są takie same jak w przypadku rys. 1, a $S = 0,8$, $A = 0,00001$, $m = 0,8$, $C = -0,1$.

Obciążając próbkę z większą prędkością, do opisu przyjmowano modele niższych rzędów i w takich warunkach określano współczynniki modelu. Rysunek 3 przedstawia pętlę histerezy uzyskaną w warunkach obciążenia z prędkością 1 mm/s z następującymi wartościami C_{i0} : $C_{10} = 283\,768$, $C_{20} = 1\,970\,020$, $C_{30} = -1\,613\,310$, $C_{40} = 463\,234$; pozostałe parametry wynoszą: $S = 0,2$, $A = 0,00001$, $m = 0,8$, $C = -0,1$.

Poliuretany piankowe wykazujące dużą ściśliwość

Do opisu zachowania materiałów charakteryzujących się znaczną ściśliwością (pianek) przyjęto inne, omówione w [15], modele. Ponieważ właściwości takich porowatych polimerów wynikają z ich budowy komórkowej, w modelu uwzględniono istotne zjawiska lokalnego wybożenia ścianek porów. Badania wykazały, że najlepiej sprawdził się w tym przypadku model Ogdena [16, 17] opisany funkcjonalem elastyczności:

$$W = \sum_{i=1}^N \frac{2\mu_i}{\alpha_i^2} (\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i}) + \sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i} (J^{el} - 1)^{2i} \quad (9)$$

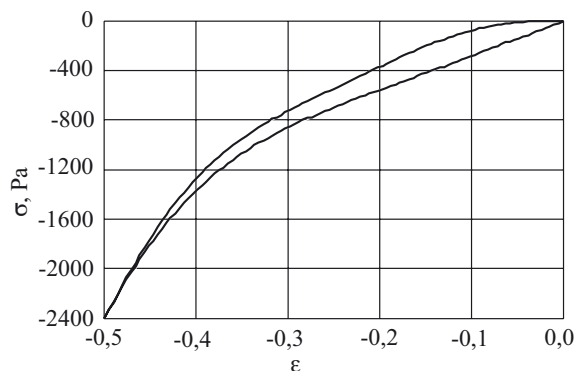
gdzie: λ_i — niezmiennik stanu odkształceń; J^{el} — parametr określający zmianę objętości próbki; μ_i , α_i , D_i — współczynniki wyznaczone doświadczalnie.

Po przekształceniu, zróżniczkowaniu względem λ_1 i zsumowaniu otrzymuje się wzór określający naprężenia w kierunku głównym ściskania:

$$\sigma_1 = \sum_{i=1}^N \frac{2\mu_i}{\alpha_i} \lambda_1^{(\alpha_i-1)} + \sum_{i=1}^N \frac{2}{D_i} (J^{el} - 1)^i \lambda_2 \lambda_3 + S \cdot m \sqrt{\frac{\lambda_i}{A(\lambda_1 - 1)^C}} \quad (10)$$

W opisie właściwości pianki miękkiej przyjęto model Ogdena czwartego rzędu z następującymi parametrami: $\mu_1 = 15\,679$, $\alpha_1 = -4,63$, $D_1 = 2,62 \cdot 10^{-3}$, $\mu_2 = 0,204$, $\alpha_2 = 25,0$, $D_2 = 1,26 \cdot 10^{-4}$, $\mu_3 = -11\,960$, $\alpha_3 = -7,1$, $D_3 = -7,37 \cdot 10^{-5}$, $\mu_4 = 1404,3$, $\alpha_4 = -10,76$, $D_4 = 1,28 \cdot 10^{-4}$, oraz z parametrami członu opisującego tłumienie $S = 0,08$, $A = 0,001$, $m = 0,8$, $C = -0,01$.

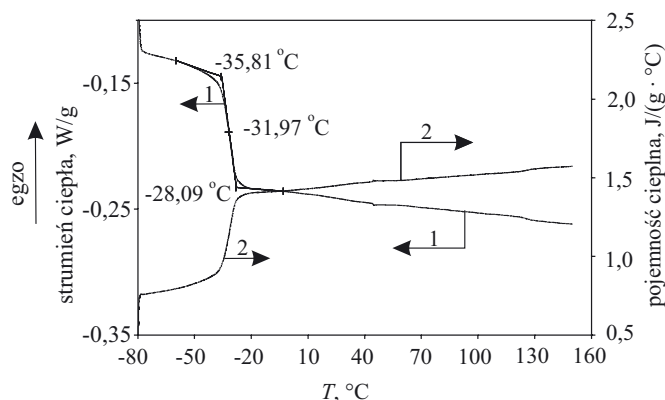
Przykład uzyskanej pętli histerezy poliuretanowej pianki miękkiej przedstawiono na rys. 4 (prędkość ściskania $0,025$ mm/s, temp. 21 °C).



Rys. 4. Pętla histerezy w przypadku ściskania pianki miękkiej z porami otwartymi (wg modelu Ogdena czwartego rzędu); prędkość ściskania $0,025$ mm/s, temp. 21 °C

Fig. 4. Hysteresis loop for soft foam of open pores, four order Ogden's model; compression rate 0.025 mm/s, temp. 21 °C

Modelowano również, w takich samych warunkach, właściwości porównawczej pianki Cellasto. W tym przypadku wystarczający okazał się model Ogdena trzeciego rzędu; przyjęto tu następujące parametry: $\mu_1 = 41\,189\,853$, $\alpha_1 = 2,27$, $D_1 = -2,15 \cdot 10^{-5}$, $\mu_2 = 9276$, $\alpha_2 =$

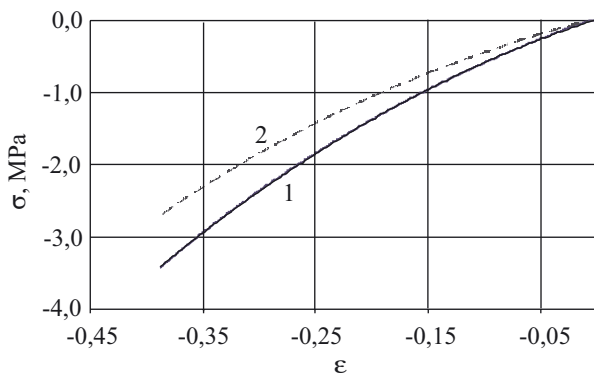


Rys. 5. Krzywa DSC (krzywa 1) i zmian pojemności cieplnej (krzywa 2) elastomeru o stosunku S/G = 0,25 mol/mol
Fig. 5. DSC curve (1) and change of heat capacity (2) of elastomer (S/G = 0.25 mol/mol)

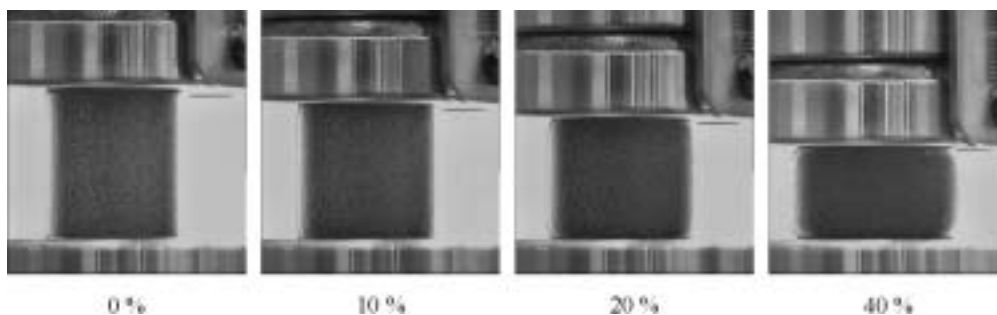
21,32, $D_2 = 1,72 \cdot 10^{-8}$, $\mu_3 = -38\ 531\ 138$, $\alpha_3 = 2,00$, $D_3 = -1,00 \cdot 10^{-7}$, oraz jako parametry członu opisującego tłumienie: $S = 0,1$, $A = 5 \cdot 10^{-5}$, $m = 0,8$, $C = -0,1$.

Właściwości użytkowe

Istotny, charakteryzujący elastomery poliuretanowe parametr określany metodą DSC stanowi temperatura



Rys. 6. Krzywe naprężenie-odkształcenie elastomerów poliuretanowych o stosunku molowym S/G wynoszącym odpowiednio: 1 — 0,5, 2 — 0,25
Fig. 6. Stress-strain curves for polyurethane elastomers of S/G: 1 — 0.5 or 2 — 0.25



Rys. 7. Obrazy ściskania próbki elastomeru o S/G = 0,50 w funkcji odkształcenia
Fig. 7. Compression of the sample of elastomer (S/G = 0.50) versus deformation

zeszklenia (T_g), gdyż ona właśnie ogranicza użyteczność tego rodzaju produktów w niskiej temperaturze.

Przykład zarejestrowanych krzywych DSC i pojemności cieplnej elastomeru o stosunku molowym S/G = 0,25 zamieszczono na rys. 5. W przedziale temp. -80—150 °C badane poliuretany charakteryzują się występowaniem jedynie temperatury zeszklenia T_g (-28,09 °C) towarzyszącej wyraźnej zmianie pojemności cieplnej.

Wyznaczone wartości T_g otrzymanych elastomerów poliuretanowych, praktycznie biorąc, nie zwiększają się wraz ze wzrostem stosunku S/G i wynoszą średnio $-31,8 \pm 0,5$ °C. Temperatura użytkowania omawianych elastomerów obejmuje przedział od T_g do 120 °C.

Wyniki badań charakterystyki elastomerów przy ściskaniu zawiera tabela 1 oraz rys. 6 i 7. Rysunek 6 dotyczy przebiegu krzywych naprężenie-odkształcenie dwóch próbek o różnym stosunku S/G (0,50 lub 0,25). Próbkę o większej zawartości segmentów sztywnych (krzywa 1) odpowiada mniejsze odkształcenie przy danym naprężeniu. Rysunek 7 ilustruje przebieg ściskania elastomeru o stosunku S/G = 0,5 na różnych etapach odkształcania. Podobny obraz uzyskano w przypadku próbki o S/G = 0,25.

Tabela 1. Wartości modułów przy ściskaniu (odkształcenia $\epsilon = 10\%$ lub 20%)

Table 1. Values of compression moduli (deformation $\epsilon = 10\%$ or 20%)

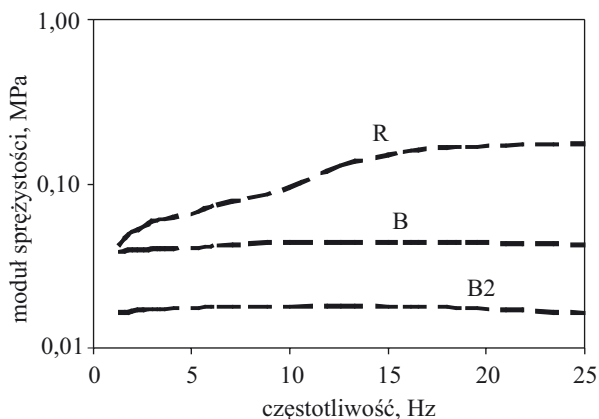
Stosunek S/G mol/mol	Moduł sprężystości przy ściskaniu, MPa	
	$\epsilon = 10\%$	$\epsilon = 20\%$
0,25	4,5	5,3
0,5	6,0	6,95

Tabela 2. Zestawienie wybranych właściwości użytkowych badanych elastomerów

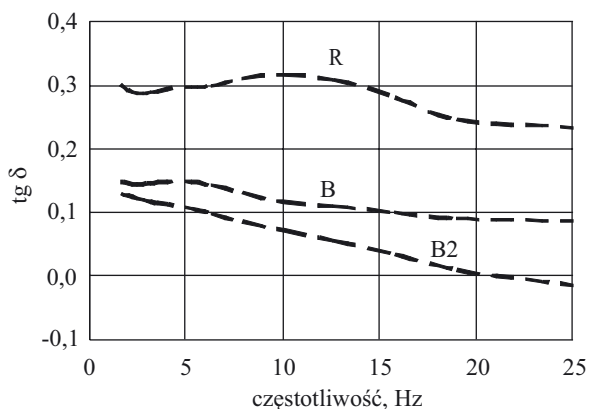
Table 2. Set of selected functional properties of elastomers investigated

S/G, mol/mol	E, MPa	H, °ShA	η , %	ΔV_{sr} , cm ³
0,25	$3,5 \pm 0,3$	$55 \pm 0,5$	42 ± 2	$0,0075 \pm 0,0017$
0,50	$4,5 \pm 0,3$	$62 \pm 0,6$	$41,5 \pm 1$	$0,0093 \pm 0,0004$
0,75	$7,7 \pm 0,6$	$69 \pm 0,6$	37 ± 1	$0,0114 \pm 0,0004$

Większy udział segmentów sztywnych powoduje wzrost modułu sprężystości przy ściskaniu (tabela 1)



Rys. 8. Moduły elastyczności pianek poliuretanowych B2, B oraz R (por. punkt „Materiały”) wyznaczone metodą DMA
Fig. 8. Elasticity moduli of B2, B and R polyurethane foams (see „Materials”) determined by DMA



Rys. 9. Tangensy kątów przesunięcia fazowego pianek poliuretanowych B2, B oraz R (por. punkt „Materiały”)
Fig. 9. Phase shifts tangents of B2, B and R polyurethane foams (see „Materials”)

oraz zmiany kilku innych właściwości użytkowych (tabela 2).

Ze wzrostem zawartości segmentów sztywnych rośnie moduł Younga przy rozciąganiu (E), twardość (H) i — niekorzystnie — zużycie ściernie (ΔV_s), maleje natomiast odbojność (η) badanych elastomerów. Z punktu widzenia zastosowania tych materiałów na tłumiki drgań typu *shimmy* jest ważne, aby charakteryzowały się one jak najmniejszym zużyciem ściernym i małą odbojnością.

W badaniach metodą DMA wykazano, że pianki różniły się modułem sprężystości oraz sposobem reakcji na zmianę częstotliwości drgań (rys. 8). Mianowicie, jedynie w piance o symbolu R następowało zwiększenie sztywności wraz ze wzrostem częstotliwości drgań. Ta pianka wykazywała również największą zdolność do tłumienia drgań (wartość tangensa kąta przesunięcia fazowego), malejącą nieznacznie w funkcji ich częstotliwości (rys. 9). Właściwości te wynikają z budowy komórkowej charakterystycznej dla omawianej pianki.

PODSUMOWANIE

Metodą modelowania określono lepkie i elastyczne właściwości materiałów poliuretanowych (elastomerów i pianek) wykazujących zdolność do bardzo dużych odwracalnych odkształceń (tzw. materiałów hiperelastycznych). Do opisu zachowania elastomerów o małej ściśliwości (praktycznie biorąc nieściśliwych) zastosowano modele wielomianowe, w odniesieniu zaś do pianek o dużej ściśliwości większą dokładność opisu zapewniły modele Ogdena (różnych rzędów). Właściwości lepkie w obu przypadkach opisano nieliniową funkcją wykładniczą. Weryfikacji modeli dokonano opierając się na wynikach badań doświadczalnych. Na podstawie oznaczonych właściwości elastomerów poliuretanowych oraz przeprowadzonego modelowania można wybrać optymalny materiał do zastosowań w konstrukcji tłumika typu *shimmy*. Stwierdzono, że miękkie pianki poliuretanowe wykorzystywane w siedzeniach samochodowych odznaczają się małą sztywnością i zdolnością do tłumienia drgań.

Praca finansowana w ramach Uczelnianego Programu Badawczego [UPB] Politechniki Warszawskiej w roku 2006 pt.: „Tworzenie nowych właściwości i rozwój zastosowań tworzyw i kompozytów”; autorzy dziękują Kierownictwu Uczelni za finansowanie badań.

LITERATURA

- Galina H.: „Fizykochemia polimerów”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 1998.
- Galina H.: *Polimery* 2003, **48**, 598.
- Galina H., Lechowicz J. B.: *Polimery* 2001, **46**, 840.
- Majszczyk J., Rosłaniec Z., Pietkiewicz D., Pakuła T.: *Polimery* 2002, **47**, 34.
- Pokropski T., Balas A.: *Polimery* 2003, **48**, 591.
- Pokropski T., Balas A.: *Polimery* 2004, **49**, 268.
- Białkowska A., Wirpsza Z.: *Polimery* 2002, **47**, 890.
- Amborski J.: „Modelowanie tłumików drgań z materiałem elastomerowym z zastosowaniem MES”, Rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska, Warszawa 2005.
- Amborski J., Osiński J.: „Koncepcja tłumika elastomerowego do zastosowania w podwoziu lotniczym”, IX Konferencja Naukowo-Techniczna „Programy MES w komputerowym wspomaganie analizy, projektowania i wytwarzania”, Giżycko 19—22 października 2005 r., mat. konf. str. 469—480.
- Dębniak M., Nesiobęcki D., Osiński J.: „Wyznaczenie położenia punktu H w siedzeniach samochodowych na przykładzie Audi A6”, VIII Konferencja Naukowo-Techniczna „Programy MES w komputerowym wspomaganie analizy, projektowania i wytwarzania”, Warszawa—Rynia 16—20 października 2003 r., materiały wydane na płycie CD.
- Bergstrom J. S., Boyce M. C.: *J. Mech. Phys. Solids* 1998, **46**, 931.

12. Bergstrom J. S., Boyce M. C.: *Mech. Mater.* 2001, **33**, 523.
13. Gruin I., Ryszkowska J., Boczkowska A., Markiewicz B.: *Polimery* 1994, **39**, 226.
14. Yeoh O. H.: „Phenomenological Theory of Rubber Elasticity”, *Comprehensive Polymer Science*, Pergamon Press, 1995.
15. Lakes R. S., Witt R.: *Int. J. Mech. Eng. Educ.* 2002, **30**, 50.
16. Ogden R. W.: *Proc. R. Soc. London, Ser. A* 1972, **326 (1567)**, 565.
17. Ogden R. W.: „Nonlinear Elasticity with Application to Material Modeling”, wyd. Institute of Fundamental Technological Research, Polish Academy of Sciences, Lecture Notes 6, Warsaw 2003.

Otrzymano 5 IV 2007 r.