

XVII Konferencja Naukowo-Techniczna

TKI2024

TECHNIKI KOMPUTEROWE W INŻYNIERII

15–18 października 2024

Badanie wpływu procesu przyspieszonego starzenia na właściwości wybranych materiałów hipersprężystych

Marcin Konarzewski¹, Jakub Kotkowski¹, Robert Panowicz¹,

¹Wydział Inżynierii Mechanicznej, Wojskowa Akademia Techniczna
email: marcin.konarzewski@wat.edu.pl, jakub.kotkowski@wat.edu.pl, robert.panowicz@wat.edu.pl,

STRESZCZENIE: Materiały hipersprężyste, do których zaliczamy m.in. różnego rodzaju gumy, są powszechnie wykorzystywane w przemyśle (branża motoryzacyjna). Główną ich wadą jest utrata pierwotnych właściwości wraz z upływem czasu na skutek działania czynników środowiskowych (starzenie). Proces starzenia jest długotrwały, dlatego w przypadku badań wpływu starzenia na właściwości materiałów wykorzystuje się tzw. przyspieszone starzenie. Przyspieszone starzenie realizuje się przy większej intensywności czynnika powodującego starzenie, np. naświetlając próbki promieniowaniem UV lub trzymając je w podwyższonej temperaturze. W literaturze brak parametrów modeli konstytutywnych uwzględniających wpływ starzenia na właściwości materiałów. Prezentowany artykuł przedstawia proces wyznaczania parametrów dla wybranego modelu konstytutywnego na przykładzie dwóch powszechnie wykorzystywanych w przemyśle kauczuków: chloroprenowego (CR) oraz etylenowo-proylenowo-dienowego (EPDM). Przed określeniem parametrów materiałowych próbki poddano przyspieszonemu starzeniu w temperaturze 100°C przez okres 7, 21 i 35 dni. Następnie wyznaczono krzywe naprężenie - odkształcenie na podstawie próby rozciągania i za pomocą nieliniowej metody najmniejszych kwadratów określono parametry modelu konstytutywnego. Na koniec przeprowadzono również proces walidacji numerycznej uzyskanych wartości.

SŁOWA KLUCZOWE: materiały hipersprężyste, przyspieszone starzenie, metoda elementów skończonych

1. Wstęp

Materiały hipersprężyste, do których zaliczamy m.in. różnego rodzaju gumy, są powszechnie wykorzystywane w różnych gałęziach przemysłu, w tym, w branży motoryzacyjnej. Część z tego typów materiałów wykazuje odporność na oddziaływanie środków smarnych oraz pędnych dlatego powszechnie wykorzystuje się je w procesie produkcji uszczelek w różnych rodzajach połączeniach. Z gum odpornych na temperaturę i promieniowanie UV wykonuje się między innymi opony.

Główną wadą materiałów polimerowych jest pogorszenie przez nie swoich właściwości wraz z upływem czasu. Spowodowane jest pękaniem łańcuchów polimerowych oraz osłabieniem wiązań van der Waalsa na skutek długotrwałego oddziaływania czynników zewnętrznych takich jak temperatura, wilgoć czy promieniowanie UV [1-4]. Proces ten nazywamy starzeniem.

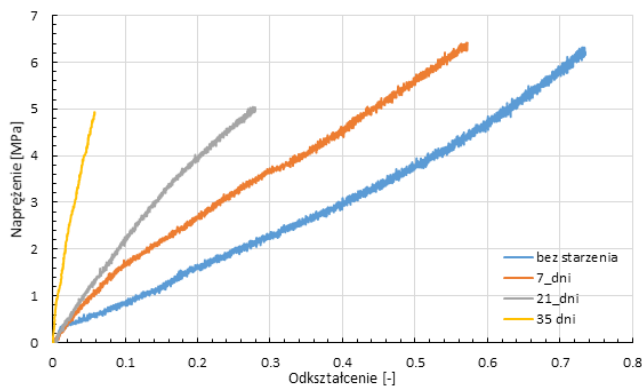
Starzenie polimeru może trwać wiele lat, dlatego wykorzystuje się różne metody, mające na celu przyspieszyć cały proces. Jedną z najpopularniejszych metod jest przeprowadzenie przyspieszonego starzenia w komorze o podwyższonej temperaturze (znacząco wyższej niż temperatura pracy elementu wykonanego z danego materiału). Pozwala to na znaczące przyspieszenie starzenia materiału. Cały proces trwa od kilku godzin do kilkunastu dni w zależności od właściwości materiału.

2. Badania eksperymentalne

Do badań nad procesem starzenia materiałów hipersprężystych wytypowano dwa powszechnie wykorzystywane w przemyśle kauczuki: chloroprenowy (CR) oraz etylenowo-proylenowo-dienowy (EPDM). Materiały te wykazują dużą odporność na działanie substancji chemicznych jak oleje oraz są szeroko wykorzystywane w przemyśle.

Z komercyjnie dostępnych arkuszy materiałów o grubości 2 mm przygotowano próbki zgodnie z normą PN-ISO 37:2007. W celu przeprowadzenia procesu przyspieszonego starzenia przygotowano próbki umieszczone w piecu konwekcyjnym, w temperaturze 100°C na okres 7, 21 i 35 dni. Następnie na klasycznej maszynie wytrzymałościowej INSTRON 8862 przeprowadzono próbę statycznego rozciągania. Wybrane wyniki badań wpływu procesu temperaturowego starzenia na przebieg krzywych naprężenie-odkształcenie zaprezentowano na rys. 1.

Analizując uzyskane wykresy zaobserwować można, że w przypadku obydwu materiałów proces przyspieszonego starzenia termicznego miał znaczący wpływ na właściwości. W czasie starzenia, od 7 dni do 35 dni, materiał wykazuje stopniowy wzrost sztywności przy równoczesnym spadku maksymalnych odkształceń niszczących.



Rys. 1. Zależność naprężenie-odkształcenie dla kauczuku CR

Uzyskane krzywe naprężenie-odkształcenie posłużyły jako baza do określenia wartości parametrów wielomianowego modelu konstytutywnego z zastosowaniem nieliniowej metody najmniejszych kwadratów. Technika ta polega na wyznaczeniu funkcji, która w optymalny sposób aproksymuje zbiór danych, w tym przypadku wartości odkształceń i naprężeń uzyskanych w trakcie testów eksperymentalnych, z uwzględnieniem uprzednio zdefiniowanych ograniczeń. Wyznaczone w ten sposób wartości przedstawiono w tab. 1 i 2.

Tabela 1. Wyznaczone parametry modelu konstytutywnego dla CR

	Bez starzenia	7 dni	21 dni	35 dni
C10	-2.6724	-9.9512	1.79e-6	0.025
C01	4.3870	13.604	3.6507	15.9529
C11	-7.9789	-9.0913	0	0.0024
C20	2.8989	2.7847	5.94e-7	0.0001
C02	6.8326	11.3484	2.64e-7	0.0137
C30	-0.0732	-0.0506	1.97e-6	0.0006

Tabela 2. Wyznaczone parametry modelu konstytutywnego dla EPDM

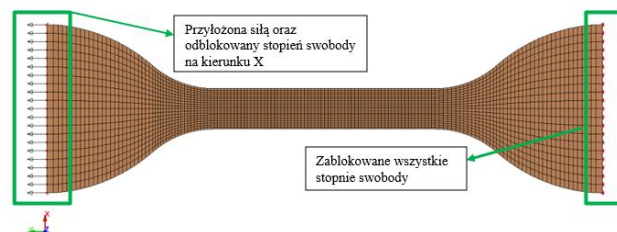
	Bez starzenia	7 dni	21 dni	35 dni
C10	2.34e-5	1.31e-7	1.25e-7	-8.4827
C01	1.3084	1.6954	2.2651	13.2081
C11	1.08e-4	3.09e-4	4.22e-7	45.7838
C20	1.08e-4	2.83e-4	2.88e-7	-82.876
C02	0	3.23e-4	2.98e-7	58.3904
C30	0.0094	0.0364	1.12e-4	35.0498

3. Walidacja numeryczna

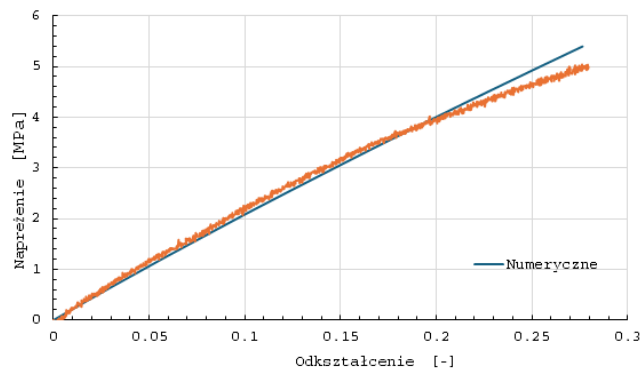
W celu przeprowadzenia walidacji uzyskanych wartości modelu wielomianowego przygotowano model numeryczny odwzorowujący warunki przeprowadzenia badań eksperymentalnych (rys. 2). Do dyskretyzacji zastosowane zostały ośmiowęzłowe elementy przestrzenne. Ze względu na quasi-statyczny charakter badań eksperymentalnych zdecydowano się na zastosowanie niejawnego schematu całkowania.

Uzyskane w wyniku analiz numerycznych krzywe zostały następnie porównane z wynikami badań eksperymentalnych (rys. 3). Z przedstawionych przebiegów

wynika, że uzyskano bardzo dobrą zgodność badań eksperymentalnych oraz analiz numerycznych.



Rys. 2. Model numeryczny



Rys. 3. Porównanie krzywej eksperymentalnej i numerycznej dla CR starzonego 21 dni

4. Podsumowanie

Proces przyspieszonego starzenia termicznego w znaczący sposób wpłynął na właściwości obydwu analizowanych materiałów hipersprężystych. Już po siedmiu dniach zaobserwowano znaczące zmniejszenie uzyskiwanych maksymalnych odkształceń. Po upływie 35 dni materiały te zachowywały się w sposób zbliżony do kruchych tworzyw sztucznych, wykazując w przypadku CR maksymalne odkształcenie na poziomie 6%. EPDM wykazała się większą odpornością na zachodzący proces, bowiem w jego przypadku wartość odkształcenia kształtowała się na poziomie około 22%.

Krzywe uzyskane w wyniku analiz numerycznych i badań eksperymentalnych wykazują się dużym poziomem dopasowania (najniższy uzyskany poziom dopasowania wyniósł $R^2 = 0.97$)

Praca została częściowo wykonana w ramach Uczelnianego Grantu Badawczego Nr 22-715, finansowanego przez Wojskową Akademię Techniczną.

Literatura

- [1] Li, X.; Dong, Y.; Li, Z.; Xia, Y. *Experimental study on the temperature dependence of hyperelastic behavior of tire rubbers under moderate finite deformation*. Rubber Chem. Technol. 2011, 84, 215–228, doi:10.5254/1.3577534.
- [2] Treloar, L.R.G. *The physics of rubber elasticity*; Oxford classic texts in the physical sciences; 3rd ed.; Clarendon Press; Oxford University Press: Oxford; New York, 2005; ISBN 978-0-19-857027-1.
- [3] Smith, T.L. *Dependence of the ultimate properties of a GR-S rubber on strain rate and temperature*. J. Polym. Sci. 1958, 32, 99–113, doi:10.1002/pol.1958.1203212409.
- [4] Sobków, D., Czaja, K. *Wpływ warunków przyspieszonego starzenia na proces degradacji poliolefin*. Polimery 2003, 48, 9