

# ANALIZA NUMERYCZNA I BADANIA ELASTOMEROWEGO TŁUMIKA DRGAŃ

dr inż. **Jan AMBORSKI**  
dr inż. **Zbigniew WOLEJSZA**  
Instytut Lotnictwa  
prof. dr hab. inż. **Jerzy OSIŃSKI**  
Politechnika Warszawska

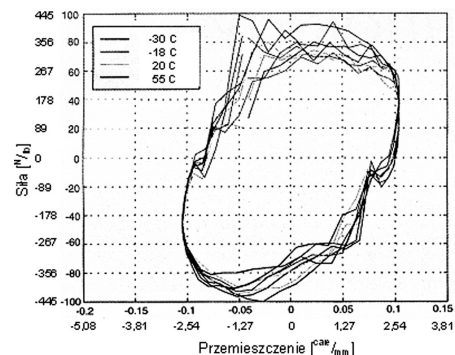
*W pracy przedstawiono koncepcje numerycznej analizy pracy elastomerowego tłumika drgań. Omówiono modele materiałowe materiałów hiperelastycznych, metody doboru modeli materiałowych materiałów hiperelastycznych do danego materiału i obliczenia konkretnego tłumika elastomerowego. Pokazano również przykładowe wyniki badań tłumika drgań zbudowanego na bazie istniejącego lotniczego tłumika drgań.*

## 1. WSTĘP

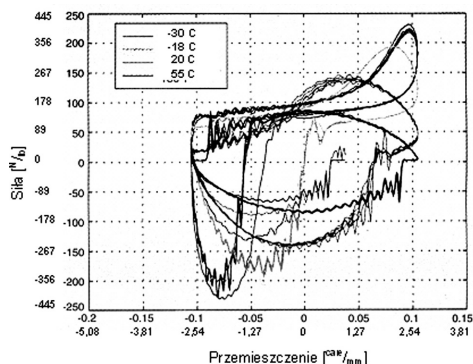
Problematyka tłumienia drgań występuje w wielu zagadnieniach mechaniki, w eksploatacji różnych urządzeń, w przemyśle motoryzacyjnym, maszynowym, lotniczym. W przypadku, kiedy tłumienie poprzez dobór mas i wymiarów nie jest z różnych przyczyn możliwe, lub z innych względów go zaniechano stosuje się tłumiki drgań. Zależnie od rodzaju drgań tłumić się je za pomocą różnego rodzaju tłumików hydraulicznych, bądź to za pomocą tłumików z elementami podatnymi, przeważnie elastomerowymi. Stosunkowo rzadko stosuje się tłumiki cierne. Tłumiki hydrauliczne są bardzo popularne i bardzo dobrze opanowane jeśli chodzi o sterowanie charakterystykami, jednak stale występuje problem wrażliwości pracującej cieczy, a co za tym idzie charakterystyk tłumika, na temperaturę. Wraz z jej spadkiem olej w nich zawarty zarówno gęstnieje, jak i rośnie jego lepkość. Zjawisko to nie występuje już tak bardzo przy obecnie stosowanych w tłumikach z elementem podatnym. Tutaj jednak mamy do czynienia z ograniczonym skokiem tłumika, a co ważniejsze z brakiem możliwości uzależnienia charakterystyki od kierunku ruchu. Tłumiki cierne są rzadko stosowane ze względu na ograniczone możliwości sterowania charakterystyką. Te wszystkie cechy powodują, że tłumiki z elementem podatnym jak i tłumiki cierne, są stosowane w stosunkowo niewielu miejscach, a większość odpowiedzialnych tłumików drgań to tłumiki olejowe. Ostatnie lata i postęp, jaki się dokonał jeśli chodzi o technologie elastomerów rzuciły nowe światło na możliwości tłumienia drgań, możliwości tworzenia, na bazie starych, zupełnie nowych rozwiązań konstrukcyjnych tłumików drgań.

Ciekawe przykłady badań wrażliwości temperaturowej tłumików stosowanych w samolocie CESNA 152 przedstawiono w artykule [4]. Porównano tam prace prostego tłumika elastomerowego i odpowiadającego tłumika hydraulicznego. Wykresy na rysunkach 1.1 i 1.2 ilustrują różnice zachowań obu zbadanych tłumików drgań. Z wykresów tych wynika, że istnieje możliwość skonstruowania tłumika drgań, którego wrażliwość temperaturowa była by zdecydowanie mniejsza niż klasycznego tłumika olejowego.

Jako cel pracy obrano silnie nieliniową analizę MES elastomerowego tłumika drgań shimmy, stworzenie elastomerowego tłumika drgań podobnego do przedstawionego w artykule A. Meyersa, rozwinięcie tej koncepcji i opracowanie metodologii badań zarówno gotowego tłumika, jak i niezbędnych do jego budowy materiałów. Zaproponowano elastomerowy tłumik cierny, w którym zanim nastąpi ruch względny elementu elastomerowego, energia będzie rozpraszana tłumieniem wewnętrznym w elastomerze.



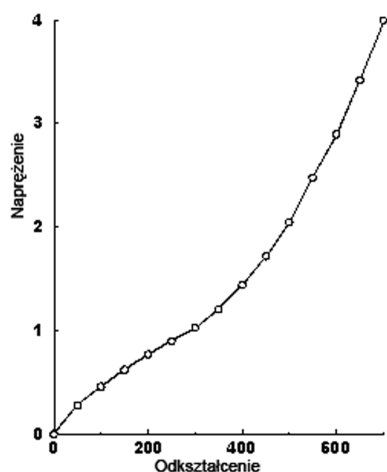
**Rys. 1.1. Odpowiedź ciernego tłumika elastomerowego na wymuszenie drganiami typu shimmy**



Rys. 1.2. Odpowiedź tłumika hydraulicznego na wymuszenie drganiami typu shimmy

Podstawowym wyzwaniem, jak i punktem wyjścia do dalszych prac przy tak sformułowanym celu pracy, jest analiza zachowania materiałów hiperelastycznych typu zastosowanego w tłumiku. Mimo, że zagadnieniami tymi zajmowano się już dosyć dawno obliczenia takie wciąż należą do jednych z trudniejszych w analizie MES.

W1839 roku C. N. Goodyear po raz pierwszy otrzymał gumę, materiał, którego silnie nieliniowa charakterystyka była zupełnie różna od dotychczas znanych (rys. 1.3).



Rys. 1.3. Przykładowa charakterystyka materiału hiperelastycznego

Do tego pierwszego materiału hiperelastycznego zastosowanie modelu Hooke'a daje rezultaty, które należy traktować jako szacunki zgrubne nawet przy niewielkich odkształceniach. Przy większych odkształceniach opierano się raczej na doświadczeniu niż na obliczeniach. Od tego czasu guma znajdowała coraz szersze zastosowanie w technice, powstawały coraz to nowe mieszanki oparte na kauczuku. Rozwój materiałów hiperelastycznych trwa od tamtego czasu nieprzerwanie, ich zastosowanie również jest coraz szersze. Równolegle powstają nowe modele obliczeniowe. W dzisiejszym rozumieniu najczęściej mówi się, że materiał jest hiperelastyczny jeżeli jego odkształcenia sprężyste  $\epsilon > 20\%$ . Jest to oczywiście wartość umowna. Można jednak również spotkać definicję, która mówi, że materiał jest hiperelastyczny jeżeli jest nieliniowo sprężysty w sensie Grena [7].

Modele oparte są o funkcjonal gęstości energii odkształcenia [7], jego składowa objętościowa jest znikoma, natomiast składowa odkształcenia postaciowego odgrywa główną rolę. Stosuje się dwie formy tego funkcjonału, gdzie parametrami odkształcenia są bądź to niezmienniki  $I_1, I_2, I_3$ ,

bądź wartości własne tensora odkształcenia  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ . Aby materiał był nieściśliwy, niezależnie od przyjętego modelu obliczeniowego, musi być spełniony warunek:

$$I_3 = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 = 1 \quad (1.2)$$

gdzie:

$$\lambda_i = \frac{L_i + \Delta L_i}{L_i} = 1 + \epsilon_i \quad (1.3)$$

Współcześnie materiały elastomerowe coraz częściej są również wytwarzane w formie ściśliwych pianek i oprócz modeli traktujących elastomer jako materiał nieściśliwy istnieją też takie modele, które są stosowane do obliczeń ww. pianek.

Pozostałe związki między niezmiennikami a wartościami własnymi tensora odkształcenia są wyrażone w sposób następujący:

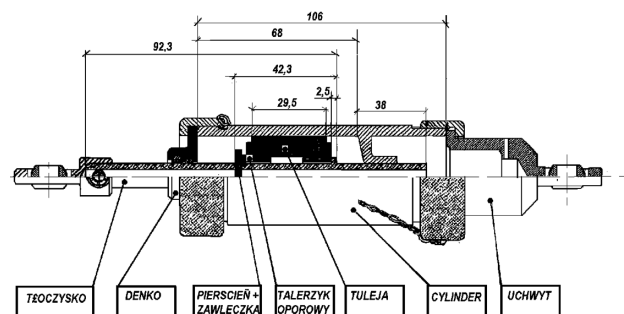
$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \quad (1.4)$$

$$I_2 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_1^2 \lambda_3^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 \quad (1.5)$$

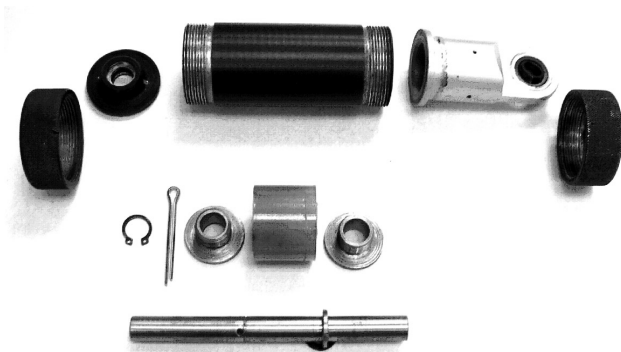
## 2. KONCEPCJA TŁUMIKA ELASTOMEROWO-CIERNEGO

Jako cel pracy obrano stworzenie tłumika drgań, którego wrażliwość temperaturowa będzie mniejsza niż odpowiadającego tłumika olejowego, będzie urządzeniem lżejszym. Zaproponowano elastomerowy tłumik cierny, w którym zanim nastąpi ruch względny elementu elastomerowego, energia będzie rozpraszana tłumieniem wewnętrznym w elastomerze. Jako punkt wyjściowy przyjęto informacje z publikacji [4], gdzie opisano możliwości podobnego tłumika. Charakterystyka takiego tłumika składała by się z dwu części, jednej będącej charakterystyką klasycznego tłumika hiperelastycznego, druga charakterystyką tłumika ciernego. Zaletą takiego rozwiązania byłoby uzyskanie urządzenia tłumika posiadającego zalety tłumika elastomerowego z jednoczesnym zabezpieczeniem przed przekroczeniem określonej tarcie siły granicznej. Jako obiekt badań użyto tłumik laboratoryjny zbudowany na bazie tłumika drgań shimmy samolotu Wilga. Projekt uwzględnił możliwość wymiany tłoczków elastomerowych jak również szeroką gamę sposobów zamontowania takich tłoczków. Rozwiązanie to dało szerokie możliwości badawcze.

Na załączonych poniżej rysunkach pokazano zarówno szkic budowy takiego tłumika badawczego, jak również zdjęcia testowanego tłumika. Wymienny tłoczek ma stałą długość 30 mm.



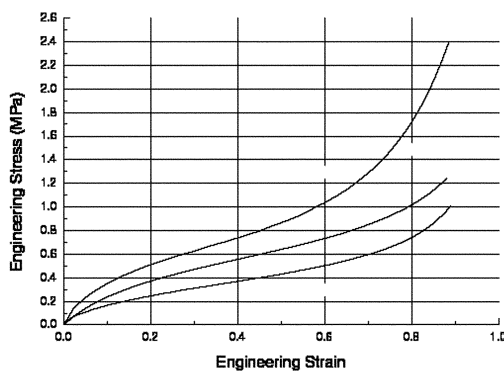
Rys. 2.1. Szkic budowy tłumika badawczego



Rys. 2.2. Zdjęcie elementów składowych badanego tłumika

### 3. PROBLEMY BADAŃ MATERIAŁÓW ELASTOMEROWYCH

Dane materiałowe materiałów hiperelastycznych pozyskiwane są w inny sposób niż materiałów klasycznych. Wszelkie testy opisane w normach ISO czy ASA są to badania dające wiele istotnych informacji. Niestety nie są to informacje, jakie są oczekiwane jako dane wejściowe do modeli matematycznych stosowanych w oprogramowaniu MES. Tylko nieliczne laboratoria dostarczają więcej danych niż twardość Shore'a, twardość IRH, ścieralność, odporność termiczną, chemiczną, podatność na starzenie i wszelkie inne zdefiniowane przez normy. Nieliniowe modele matematyczne wymagają większej liczby danych niż danych w postaci jednej liczby. Oczekiwane są szeregi danych, będących wynikiem dyskretyzacji funkcji naprężenia od odkształcenia przy różnych obciążeniach [5] (Rys. 3.1). Takie testy są przeprowadzane jednak w inny niż oczekiwany sposób. Najbardziej popularne badania w tej grupie to proste rozciąganie.



Rys. 3.1. Przykładowy zestaw krzywych dla ścinania, rozciągania i ściskania, który po dyskretyzacji jest opisem materiału do zastosowań w MES

### 4. BADANIA ELASTOMERÓW DO ZASTOSOWAŃ W MES

Każda z wymienionych we wstępie prób ma swój odpowiednik w formie wymaganej przez MES. Test na ścinanie, polecany przez wielu autorów, zupełnie nie przypomina testu na ścinanie przedstawionego powyżej (rys. 4.1). Na pierwszy rzut oka eksperyment przypomina próbę rozciągania bardzo szerokiej, płaskiej próbki. Ponieważ jednak materiał jest w zasadzie nieściśliwy, stan czystego ścinania występuje w próbce pod kątem 45 stopni do kierunku rozciągania. Fakt, że próbka jest znacznie szersza niż wyższa, wynika z dążenia do uzyskania stanu, w którym materiał będzie pracował jak idealnie utwierdzony po

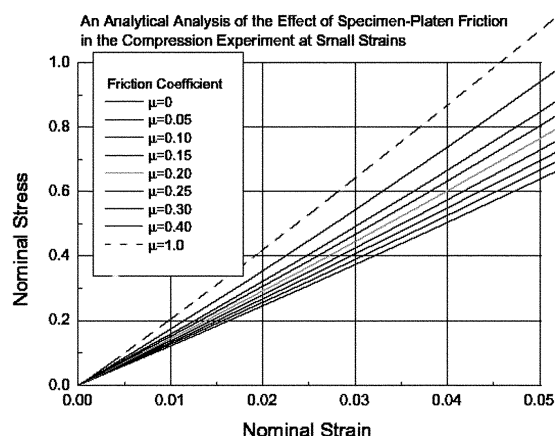
obwodzie, a zwężenie podczas rozciągania będzie tylko w kierunku grubości [5].



Rys. 4.1. Próba ścinania

Analiza MES próbki rozciąganej w pokazany sposób wykazała, że próbka musi być przynajmniej 10 razy szersza niż wyższa, aby uzyskać efekt zamurowania obwodowego. Test jest bardzo czuły na stosunek tych wymiarów. Pomiar wydłużenia należy przeprowadzać za pomocą urządzeń bezstykowych z dala od utwierdzeń [5].

Próba ściskania przeprowadzana w sposób opisany jako klasyczny jest również przydatna, ale tylko w wypadku, jeśli dysponuje się już krzywymi dla czystego rozciągania, ścinania i ściskania. W takim wypadku można jej użyć do wyznaczenia współczynnika tarcia pomiędzy próbką a płytami ściskającymi. Nawet niewielkie współczynniki tarcia prowadzą do znaczącego wzrostu naprężeń przy ściskaniu (rys. 4.2) Zdarza się nawet, że naprężenia od ścinania przy tej próbie przewyższają naprężenia od ściskania.



Rys. 4.2. Wpływ tarcia na krzywe naprężeń przy ściskaniu

Innym sposobem na wyznaczenie charakterystyki ściskania jest próba dwukierunkowego rozciągania. Rozciągania można nie kojarzyć ze ściskaniem, ale jeżeli się rozważy obciążoną kostkę materiału to łatwo zauważyć, że jeżeli kostka w dwu kierunkach się rozszerza, to w trzecim, jeśli nie przybywa materiału, się zwęża. Eksperyment pokazany

na rysunku 5.3 zapewnia takie właśnie obciążenie. Przy założeniu, że elastomery są w zasadzie nieściśliwe próba ta jest równoważna próbie ściskania, w której nie występuje tarcie. W próbie tej mierzy się parametry promieniowe, naprężenie i odkształcenie.

W prosty sposób można zamienić te pomierzone parametry na wielkości kartezjańskie takie jak naprężenia i odkształcenia przy ściskaniu:

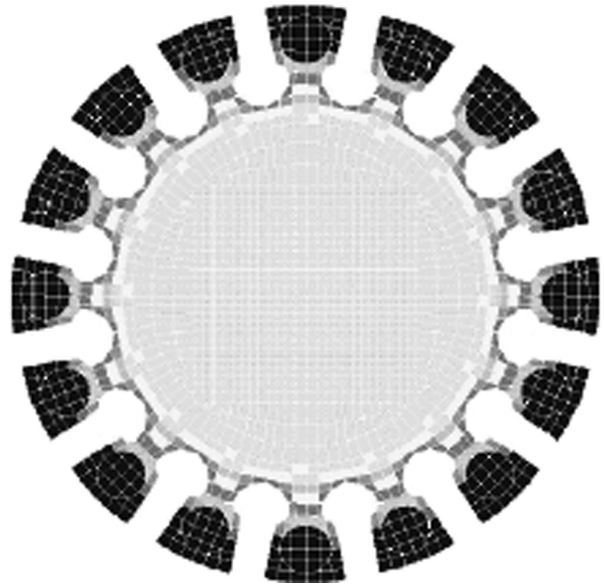
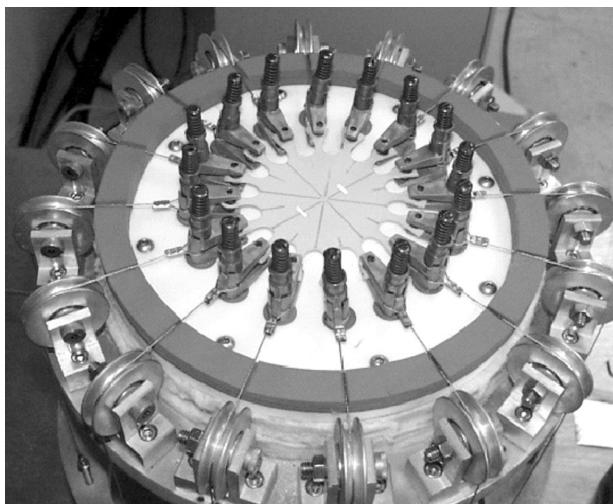
$$\begin{aligned} \sigma_c &= \sigma_b (1 + \varepsilon_b)^3 \\ \varepsilon_c &= 1/(\varepsilon_b + 1)^2 - 1 \end{aligned} \quad (4.1)$$

gdzie:

- $\sigma_c$  – naprężenie ściskające,
- $\sigma_b$  – naprężenie od dwukierunkowego rozciągania,
- $\varepsilon_c$  – odkształcenie od ściśnięcia,
- $\varepsilon_b$  – odkształcenie dwukierunkowego rozciągnięcia.

Wszystkie te wielkości są podawane w rozumieniu inżynierskim (naprężenie jest stosunkiem siły do przekroju przed obciążeniem), co ułatwia pomiar. Pokazana konwersja bardzo często jest czysto akademickim ćwiczeniem, gdyż większość programów MES akceptuje dane wejściowe w postaci dwukierunkowego rozciągania. Jako że jednokierunkowe charakterystyki materiału są różne w kierunku dodatnim jak i ujemnym tego typu próba jest jedna z koniecznych do przeprowadzenia, jeżeli nie dysponujemy wiarygodnymi danymi ze zwykłego ściskania.

Dodatkową zaletą dwukierunkowego rozciągania w miejsce ściskania jest fakt, że próbka może być wycięta z tego samego kawałka materiału co próbka do próby rozciągania i próbka do próby ścinania. Większość testów na ściskanie wymaga osobno przygotowywanego kawałka materiału. W ten sposób wszystkie krzywe są spójne, wyznaczone dokładnie z tego samej mieszanki wytworzonej w tych samych warunkach.



Rys. 4.3. Próba rozciągania dwukierunkowego przy użyciu videoekstensometru

## 5. MODELE MATERIAŁOWE MATERIAŁÓW HIPERELASTYCZNYCH

Wszystkie modele materiałowe materiałów hiperelastycznych oparte są funkcjonal gęstości energii odkształcenia. Energia sprężysta ciała odkształconego może być zapisana jako suma odkształceń w postaci podanej po raz pierwszy przez Helmholtza, a w Polsce przez M.T. Hubera:

$$\phi = \frac{1}{2} K (\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z)^2 + \frac{1}{3} G \left[ (\varepsilon_y - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_x)^2 + (\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + \frac{2}{3} (\gamma_{xy}^2 + \gamma_{yz}^2 + \gamma_{zx}^2) \right] \quad (5.1)$$

$$\phi = \frac{1}{2} K (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3)^2 + \frac{1}{3} G \left[ (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2 + (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 \right] \quad (5.2)$$

Wzór (5.2) dotyczy przypadku, kiedy stan odkształceń jest opisany odkształceniami głównymi. Zgodnie ze stosowanym w Wytrzymałości Materiałów przybliżeniem kwadrat sumy odkształceń jest równy przyrostowi objętości – pierwsze wyrazy wzorów (5.1) i (5.2) przedstawiają więc odkształcenie objętościowe, pozostałe odkształcenie postaciowe. W teorii materiałów hiperelastycznych wprowadza się opisujące bezwymiarowo odkształcenia odpowiadające zależności:

$$\lambda_i = \varepsilon_i + 1 \quad (5.3)$$

Objętość jest określona iloczynem:

$$J = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \quad (5.4)$$

Przyrost objętości jest wyrażony zależnością:

$$J - 1 \quad (5.5)$$

Nieściśliwość materiału przeważnie jest określana przez  $d$ :

$$d = \frac{2}{K} \quad (5.6)$$

Gdzie  $K$  to moduł objętościowej ściśliwości sprężystej (Helmholtza) wg zależności:

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)}. \quad (5.7)$$

Niekiedy używa się zamiast  $d$   $D$ , odwrotność parametru nieściśliwości:

$$D = \frac{1}{d}. \quad (5.8)$$

Tak więc występujące w modelach człony ze stałymi  $d$  bądź  $D$  są członami określającymi wpływ odkształcenia objętościowego, pozostałe zaś to człony określające wpływ odkształcenia postaciowego. Przeanalizowano następujące modele materiałów: Nowy model Hooke'a, Modele Mooney'a i Mooney'a–Rivlina, Wielomianowy model materiału hiperelastycznego, Model Blatza i Ko, Model Ogdena, Model Arrudy i Boyce, Model Yeoha, Model Genta. W ten sposób zamodelowano dwa materiały, które poddano próbom: pierwszy elastomer oparty na bazie kauczukowej, natomiast drugi to lany elastomer poliuretanowy.

## 6. OBLICZENIA TŁUMIKA Z ZASTOSOWANIEM MES

Pierwszym przybliżeniem wymiaru wcisku jaki był wymagany do otrzymania sił na tłoczysku rzędu 400 daN było rozwiązanie zagadnienia Lamé, gdzie wartością zadaną było przemieszczenie (wcisk) a wynikową naprężenie. Z naprężenia promieniowego na zewnętrznej powierzchni, będącego naciskiem na ścianki cylindra, przy danym tarciu otrzymano przybliżoną siłę na tłoczysku.

Tab. 1.

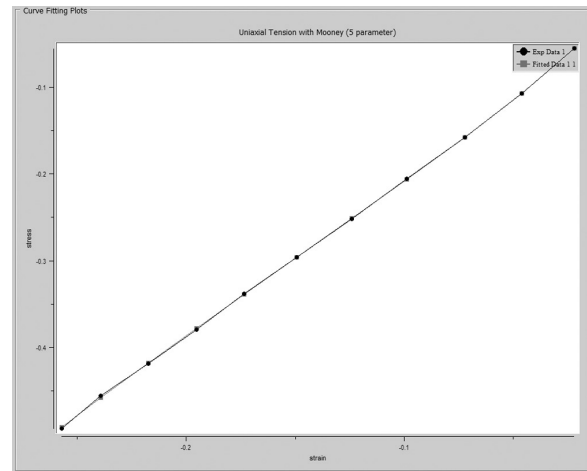
Średnica tłoka	Wcisk	Siła [kN] na tłoczysku przy wsp. tarcia = 0,2	Siła [kN] na tłoczysku przy wsp. tarcia = 0,4	Siła [kN] na tłoczysku przy wsp. tarcia = 0,6	Siła [kN] na tłoczysku przy wsp. tarcia = 0,8
40,5	5,5	13	26	39	52
38,4	3,4	8	16	24	32
36	1	2,3	4,6	6,9	9,2
35,5	0,5	1,7	3,4	5,1	6,8

W obliczeniach MES możliwe jest wykorzystanie materiału o właściwościach hiperelastycznych, w celu wybrania modelu najlepiej przybliżającego rzeczywiste własności materiału wykonano porównanie eksperymentalnej i rzeczywistej próby ściskania tulei z materiału elastomerowego. W wynikach przedstawiono przebiegi naprężenia normalnego w funkcji odkształcenia: linia czarna obrazuje wyniki eksperymentu, zaś linia czerwona otrzymana została poprzez obliczenia numeryczne.

Pięcioparametrowy model Mooney'a-Rivlina o współczynnikach:

$$\begin{aligned} C10 &= 2,4658757 \\ C01 &= -2,0198166 \\ C20 &= 10,6620616 \\ C02 &= -13,937463 \\ C11 &= 4,99921418 \\ d &= 0 \end{aligned} \quad (6.1)$$

Zgodność zachowania tak zamodelowanego materiału z wynikami prób przedstawiono na rysunku 6.1.



Rys. 6.1. Zgodność zachowania materiału zamodelowanego pięcioparametrowym modelem Mooney'a-Rivlina z zachowaniem rzeczywistego materiału zarejestrowanym podczas prób

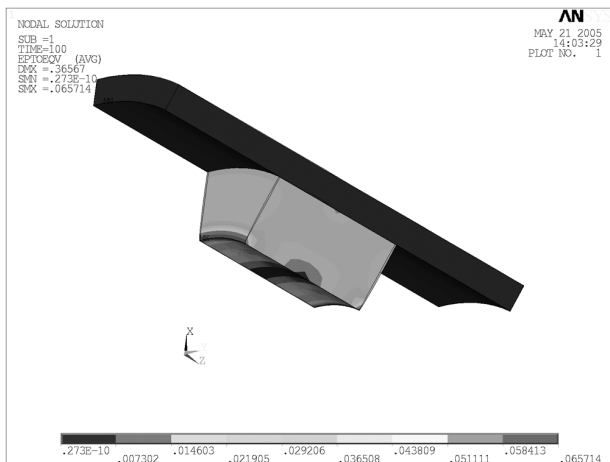
### 6.1. Obliczenia z wykorzystaniem nieliniowych modeli MES

Kolejnym krokiem jest analiza MES. Podobnie jak w przypadku rozwiązania przytoczonego powyżej zagadnienia Lamé obciążenie zadawano poprzez przemieszczenie. Skończony walec (liczono wycinek 90 lub 30) przy zamurowanej powierzchni cylindrycznej wewnętrznej został obciążony poprzez przemieszczenie zewnętrznej cylindrycznej powierzchni z wymiaru swobodnego do wymiaru cylindra w jakim odbywała się współpraca, a następnie powierzchnię tę przesuwano o odpowiednie wartości. Osiowe warunki brzegowe były zadawane zależnie od zastosowanych w badaniach poprzez pary kontaktowe. Pary kontaktowe stworzono między powierzchniami bocznymi tłoczka elastomerowego a powierzchniami bocznymi pierścieni modelującymi wkręcane tuleje. Powierzchnia cylindryczna wewnętrzna ma odebrane wszystkie stopnie swobody, co odzwierciedla wulkanizację bądź klejenie, zależnie od materiału. Powierzchnia cylindryczna zewnętrzna, obciążona przemieszczeniem w cylindrycznym układzie współrzędnych ma zerowy kąt obrotu, Przesunięcie promieniowe odpowiadające wartości wcisku, natomiast przemieszczenie poosiowe było zadawane jako równe temu, przy którym została przekroczona granica tarcia rozwiniętego – rozpoczął się ruch elementu elastomerowego względem cylindra.

Opracowano metodę umożliwiającą obliczeniowe odtworzenie sposobu obciążenia tłumika, złożoną z dwóch etapów: montażu tłumika, podczas którego powstają naprężenia kontaktowe pomiędzy elementem elastomerowym, a obudową i obciążenia wzdłużnego występującego podczas działania tłumika. Analiza pierwszego etapu wymaga rozwiązania zagadnienia kontaktowego występującego m.in. w połączeniach wciskowych lub zaciskowych. Dla porównania wykonano również traktując problem jako płaskie osiowo symetryczne zadanie teorii sprężystości – zagadnienie Lamé. W drugim etapie wyróżniono dwie fazy: odkształcenie tulei do momentu przekroczenia granicy tarcia rozwiniętego i ruch względem korpusu. Pierwsza faza jest przykładem zagadnienia tarcia konstrukcyjnego. Realizacja obliczeń wymagała zastosowania systemu z możliwością modelowania problemów nieliniowych geometrycznie (zmienna pod wpływem obciążenia powierzchnia kontaktowa) i fizycznie (właściwości materiału elastomerowego) – wybrano system ANSYS.

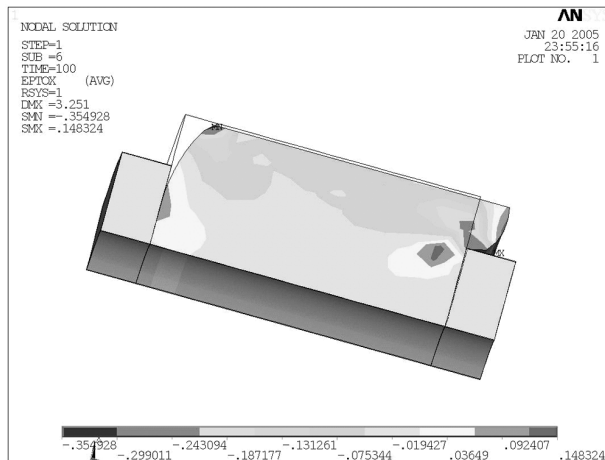
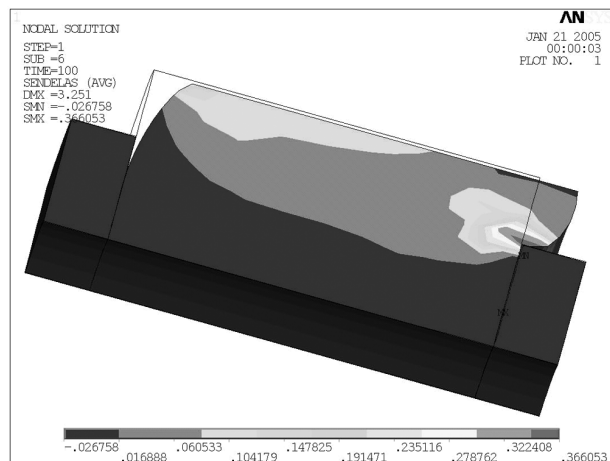
Przykładowe rozwiązanie przy zastosowaniu wybranego modelu dla tłoczka o pierwotnej średnicy zewnętrznej równej 35,3 mm pokazano poniżej. Przesunięcie tłoczyska o 3 mm względem cylindra, rysunek pokazuje rozkład naprężeń Hubera-Misesa:

Każde z obliczeń przeprowadzano w głównych etapach. Pierwszym z nich był wcisk w cylinder a drugim przesunięcie tak obciążonego tłoka. Przykład obrazu naprężeń po pierwszym etapie obciążenia ilustruje rysunek 6.2. Widać na nim nierównomierne rozłożenie naprężeń wzdłuż powierzchni kontaktu w zależności od współczynnika tarcia (utwierdzenie wewnętrznej powierzchni cylindrycznej elastomerowego tłoka i tarcie o współczynniku 0,6 na jego zewnętrznej powierzchni).



**Rys. 6.2. Rozkład naprężeń Hubera-Misesa w tłoczku z utwierdzoną tylko średnicą wewnętrzną bez przesunięcia tłoczyska względem cylindra. Przypadek bez tulei usztywniających**

Wśród obliczeń przeprowadzonych dla każdego zbadanego przypadku jedno z ciekawszych rezultatów otrzymano przy tłoczku o podobnej średnicy 35,2 mm, ale ograniczonego podczas pracy talerzykami zamocowanymi po obu jego stronach (rys. 6.3).



**Rys. 6.3. Przykładowe wyniki obliczeń dla tłoczka o średnicy 35,2 mm z tulejami ograniczającymi prace w zakresie elastycznym o średnicy 30 mm. Symbolicznie zaznaczone warunki brzegowe**

## 7. WNIOSKI

Podstawowym wnioskiem z pracy jest fakt, że zbadany tłumik spełnia przyjęte założenia. Uzyskane na drodze badań charakterystyki odpowiadają analizie numerycznej, a co więcej konstrukcja tłumika pozwala, poprzez dobór wymiarów na podstawie analiz, dobierać charakterystyki zależnie od potrzeb. Opisane i zbadane tłumiki drgań mogą być wykorzystane w większości miejsc, gdzie aktualnie stosowane są tłumiki hydrauliczne będąc konkurencyjnymi cenowo, jakościowo i obsługowo. Ponadto istnieje możliwość skonstruowania tłumika elastomerowego o niesymetrycznej charakterystyce.

W pracy wykazano również, że metodologia uzyskiwania danych materiałowych do obliczeń stale się rozwija i przedstawione w pracy nowe koncepcje pozwalają znacznie zbliżyć wyniki późniejszych obliczeń do rezultatów uzyskiwanych w badaniach gotowych wyrobów.

W przypadku modelowania elementów hiperelastycznych z zastosowaniem MES opisane modele są stosowane przez większość oprogramowania. Modele te można podzielić na dwie grupy: grupę modeli wykorzystującą niezmiennikową postać funkcjonu gęstości energii odkształcenia i grupę wykorzystującą wartości własne tensora odkształcenia. W wypadku modeli z pierwszej grupy można zauważyć, że tylko modele Mooney'a, Mooney'a-Rivlina i wielomianowy korzystają ze wszystkich trzech niezmienników tensora odkształcenia.

Badania wykazały, że zaproponowane rozwiązanie dobrze realizuje postawione cele. Można zaobserwować oczekiwane przebiegi charakterystyk jak również znaczne możliwości ich zmian. Zaobserwowano też, zgodnie z [4], wpływ smarowania między tłokiem elastomerowym a cylindrem, obniżający wzrost temperatury, jak i zwiększający łagodność przejścia między poszczególnymi fazami pracy. Występujące zbyt duże zależności od temperatury, jak również nazbyt duże zużycie można również zniwelować odpowiednim doбором materiału, jak i modyfikacjami kształtu współpracującej powierzchni elastomeru.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] **Amborski J., Osiński J., Żach P.:** *Ocena możliwości wykorzystania materiałów elastomerowych w tłumikach drgań.* XVIII Konferencja Naukowa PROBLEMY ROZWOJU MASZYN ROBOCZYCH, Zakopane 2005.
- [2] **Amborski J., Osiński J.:** *Elastomer Tests for finite element analysis Application.* Proceedings of the XVI Polish-German Seminar, Warszawa, June 2004.
- [3] **Dacko A.:** *Analiza MES elastomerowych elementów strukturalnych.* Referat V Międzynarodowej Konferencji Naukowej „Komputerowe Wspomaganie Prac Inżynierskich”, Polanica Zdrój 2000.
- [4] **Meyers A.:** *Nose Gear Shimmy Damping.* Aerospace Engineering, October 2000.
- [5] **Miller K.:** *Testing Elastomers for Hyperelastic Material Models in Finite Element Analysis.* Testing For Hyperelastic, July 2000.
- [6] **Niezgoda T., Małachowski J., Budzyński A.:** *Analiza numeryczna dynamiki podwozia wojskowego samolotu transportowego.* Biuletyn WAT 2004, vol. LIII, nr 1.
- [7] **Ogden Ray W.:** *Nonlinear Elasticity with Application to Material Modeling.* Institute of Fundamental Technological Research, Polish Academy of Sciences, Lecture Notes 6, Warsaw 2003.
- [8] **Osiński J.:** *Zastosowanie metody elementów skończonych do analizy statycznych połączeń z tarciem konstrukcyjnym.* Prace Instytutu Podstaw Budowy Maszyn Politechniki Warszawskiej, zeszyt 21, Warszawa 2001.

J. Amborski, J. Osiński, Z. Wolejsza

## NUMERICAL ANALYSIS AND TESTING OF AN ELASTOMERIC VIBRATION DAMPER

### Summary

The paper introduces concepts of a numerical analysis concerning the functioning of an elastomeric vibration damper. Material models of hyperelastic materials, methods of selecting material models of hyperelastic materials for the give material as well as calculations of a definitive vibration damper are discussed. Example results of tests concerning a vibration damper built on the basis of an existing vibration damper used in aviation are also shown.

Я. Амборски, З. Волейша, Е. Осиньски

## ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ И ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛАСТОМЕРНОГО ДЕМПФЕРА КОЛЕБАНИЙ

### Резюме

В работе представлена концепция численного анализа работы эластомерного демпфера колебаний. Обсуждены материальные модели гиперэластичных материалов, методы подбора материальных моделей гиперэластичных материалов для данного материала и расчеты конкретного эластомерного демпфера. Показаны также в качестве примера результаты исследований демпфера выполненного на базе существующего авиационного демпфера колибаний.