

Agnieszka KUŁAKOWSKA, Radosław PATYK

OBLICZENIA NUMERYCZNE TRWAŁOŚCI RESORU PIÓROWEGO

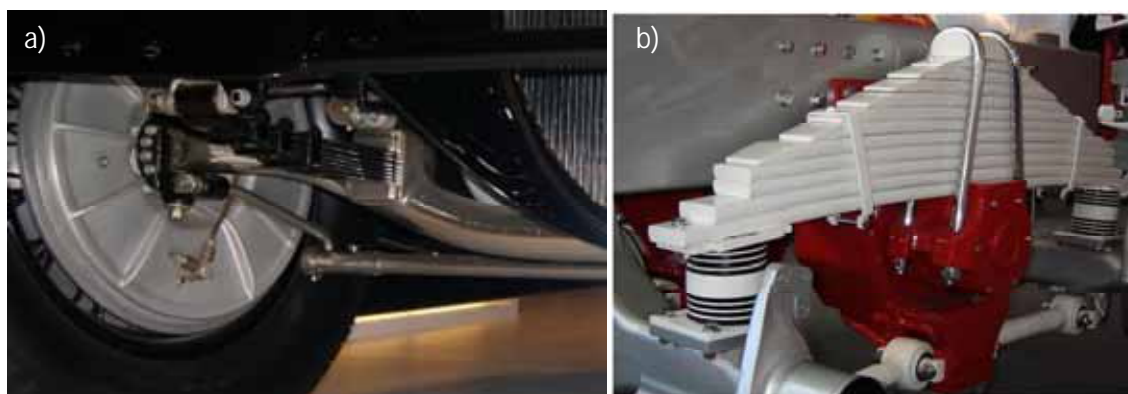
Streszczenie

W artykule przedstawiono obliczenia komputerowe trwałości resoru piórowego. Opracowano aplikację w języku APDL. Wykonano obliczenia numeryczne wytrzymałości statycznej oraz zmęczeniowej w programie Ansys/LS-DYNA. Obliczenia numeryczne przeprowadzono z zastosowaniem Metody Elementów Skończonych. Uzyskane wyniki mogą stanowić pomoc, a opracowana aplikacja narzędzie wspomagające do poprawnego projektowania konstrukcji resorów piórowych.

WSTĘP

W samochodach ciężarowych i autobusach coraz częściej stosowane są zawieszenia pneumatyczne. Obok nich, jako elementy sprężyste stosowane są również resory piórowe, które mogą jednocześnie pełnić rolę elementów prowadzących [1]. Resor piórowy to element resorujący, który najczęściej ma postać sprężyny wielopłytkowej utworzonej z płaskowników stalowych, zwanych piórami [2].

Pióra resoru wykonuje się ze stali sprężynowej oraz poddaje się obróbce cieplnej i niekiedy dodatkowemu wzmocnieniu mechanicznemu (kulowaniu) [3]. Pióra resorów mogą być również wykonane z tworzyw sztucznych (Mercedes Sprinter). Pióra resoru są wygięte, przy czym promień krzywizny zależy od długości pióra. Pióra skręca się ze sobą śrubą przechodzącą przez ich środki i zabezpiecza przed posuwaniem się w bok specjalnymi opaskami stalowymi. Ten typ resoru jest stosowany w zawieszeniach zależnych i jest umieszczony poprzecznie lub wzdłużnie do kierunku jazdy. Resory piórowe występują również w postaci pojedynczych piór [7].



Rys. 1. Resor piórowy: a) widok ogólny, b) zbliżenie
Źródło: a) [7], b) [8].

Resory w zawieszeniu samochodów ciężarowych wykorzystywane są nie tylko jako elementy sprężyste, lecz też częściowo jako elementy wiodące. W tym przypadku właściwości sprężyste resorów w trzech płaszczyznach układu współrzędnych określają formę wzajemnego przemieszczania się resorowanej części samochodu i nieresorowanego mostu.

1. TRWAŁOŚĆ RESORÓW

Biorąc pod uwagę wszystkie zewnętrzne siły działające na pojazd w ruchu, resory znajdują się w złożonym stanie naprężeń. Robocze naprężenia w piórach resorów pochodzą od pionowych sił, związanych z drganiami resorowanych i nieresorowanych mas w płaszczyźnie wzdłużnej. Naprężenia wynikające ze skręcania resorów, związane z poprzecznymi drganiami mostu względem resorowanej masy, naprężenia spowodowane działaniem momentów odrzutowych powstających przy przenoszeniu przez resory sił uciążu lub hamowania, oraz naprężenia pochodzące od sił bocznych, powstających przy skrętach. Wszystkie te oddziaływania wpływają negatywnie na wytrzymałość zmęczeniową resorów a przez to i na trwałość. Największe, co do wartości i najczęściej zmieniające się naprężenia pochodzą od sił pionowych. Naprężenia wywodzące się ze skręcania resorów są mniejsze od naprężeń pochodzących od sił pionowych. Stają się mierzalne tylko podczas ruchu samochodu po rozjeżdżonych i nierównych drogach, kiedy to poprzeczne drgania resorowanych i nieresorowanych mas uzyskują takie wartości, że przechył mostów względem ramy przewyższa wartości $\alpha \geq 6-8^\circ$.

Duży udział w uszkodzeniach resorów mają naprężenia pochodzące od pionowych przeciążeń resorów na zboczach, przy skrętach, nieumiejętnym lub niedbałym kierowaniu samochodem. Naprężenia takie wraz z naprężeniami pochodzącymi od momentów lub od sił bocznych mogą przekraczać granicę wytrzymałości (szczególnie w piórach głównych resorów obok zamocowania). W zwykłych warunkach eksploatacji trwałość resorów wiąże się z obciążeniem wynikającym z sił pionowych.

Ocena trwałości resoru na podstawie ilości cykli obciążeń aż do jego złamania jest najbardziej miarodajną próbą. Fakt ten jest powodem, dla którego badania wytrzymałościowo-zmęczeniowe resorów są tak szeroko i powszechnie stosowane. Na ogół badania trwałości resorów mają na celu porównanie ich z resorami już stosowanymi w konstrukcjach. Amplituda drgań resorów badanych na trwałość, w zależności od typu resoru i pojazdu, do którego jest przeznaczony, zmienia się w dość szerokich granicach: od ± 15 do ± 50 mm. Przy czym do oceny trwałości resoru jako wystarczającą liczbę cykli przyjmuje się od 300 tys. do 1,5 mln w zależności od warunków próby. Do badań używane są specjalne urządzenia, które pozwalają na zmianę wielkości amplitudy i są zaopatrzone w liczniki cykli od chwili pęknięcia pióra. Osiągana liczba drgań resoru waha się w granicach od 80 do 300 na minutę. Wpływ większej częstości drgań na wyniki próby w tych granicach jest praktycznie nieodczuwalny, o ile nie powoduje to pogorszenia warunków smarowania piór resorów [6].

2. SYMULACJE KOMPUTEROWE

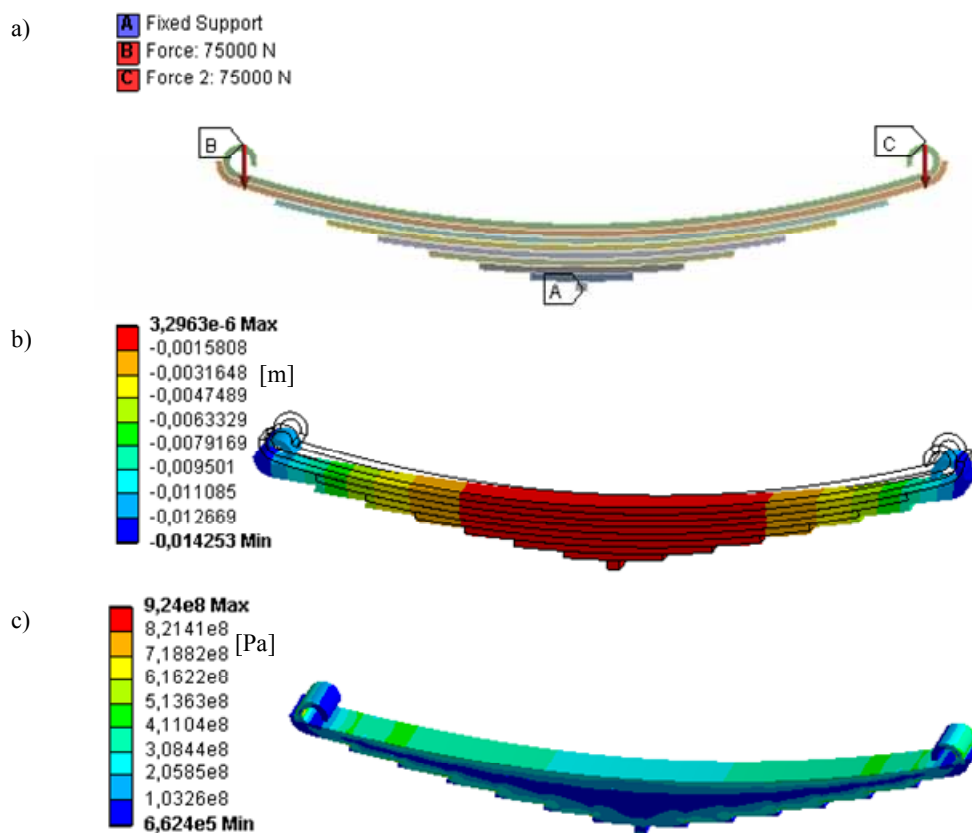
W celu poprawnego zaprojektowania resoru piórowego należy przeprowadzić kilka rodzajów obliczeń. Podstawą do projektu są obliczenia statyczne po nich zaś wykonuje się obliczenia odporności na zużycie zmęczeniowe resoru. W celu określenia miejsc najmniej wytrzymałych w resorach piórowych przeprowadzono analizy numeryczne, wykorzystując w tym celu Metodę Elementów Skończonych. W pracy [2] przedstawiono wyniki analiz dynamicznych resoru skupiając się na rozkładzie naprężeń i odkształceń resoru piórowego, natomiast w pracy [3] podjęto próbę zwiększenia trwałości resoru poprzez obróbkę kulowaniem. Obliczenia numeryczne przeprowadzono dla przedni parabolicznego, ośmiopiórowego resoru zastosowanego w samochodzie ciężarowym Renault Kerax. Przed przystąpieniem do analiz numerycznych zbudowano model bryłowy resoru w programie Solid Works.

Analiza statyczna

W symulacjach komputerowych założono, że resor piórowy jest wykonany z materiału izotropowego, idealnie sprężystego. Przyjęto, że moduł Younga wynosi $E = 2,1 \cdot 10^{11}$ [Pa] oraz współczynnik Poissona $\nu = 0,3$. Pominięto wpływ zjawisk cieplnych wynikających z tarcia występującego pomiędzy poszczególnymi piórami. Model geometryczny dyskretyzowano na 82 620 elementów skończonych (431 924 węzłów). Na model dyskretny nałożono warunki brzegowe i początkowe. Spód resoru zamocowano (odebrano wszystkie stopnie swobody), natomiast na uszy resoru zadano siły równe 75 000 N odpowiadające obciążeniu pojazdu (rys. 2a).

W wyniku przeprowadzonych symulacji uzyskano wyniki przemieszczeń pionowych poszczególnych węzłów resoru (rys. 2b) oraz stanu naprężeń zredukowanych (rys. 2c).

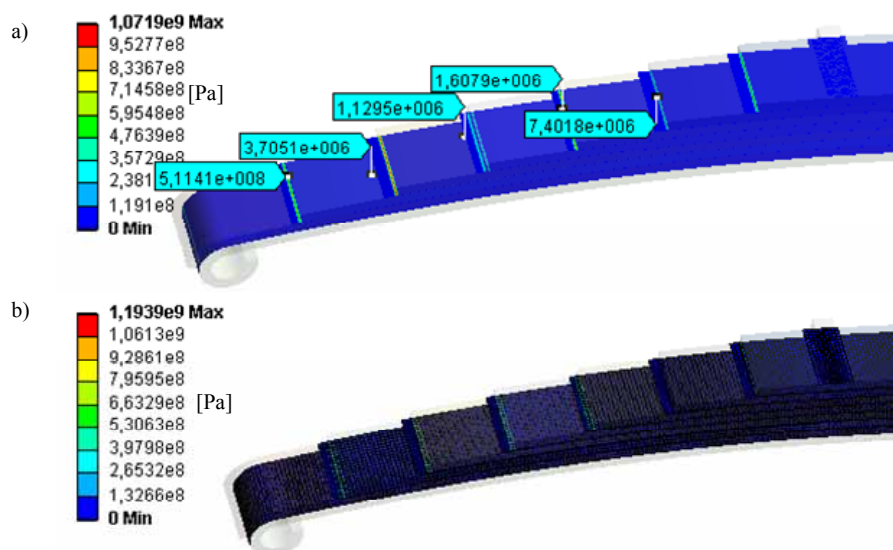
W analizowanym resorze najmniej wytrzymałe miejsca znajdują się za uchem resoru i w końcówkach poszczególnych piór.



Rys. 2. Resor piórowy: a) warunki brzegowe i początkowe, b) rozkład przemieszczeń pionowych, c) stan naprężeń zredukowanych

Źródło: Opracowanie własne.

Pomiędzy piórami założono możliwość występowania kontaktowego tarcia. Przyjęto, że wartość statycznego współczynnika tarcia wynosi $\mu_s = 0,15$. Wyniki nacisków w strefie kontaktu poszczególnych piór resoru ze sobą przedstawiono na rys. 3a, natomiast wartości i rozkład lokalnych naprężeń wynikających z występującego tarcia pomiędzy piórami na rys. 3b.



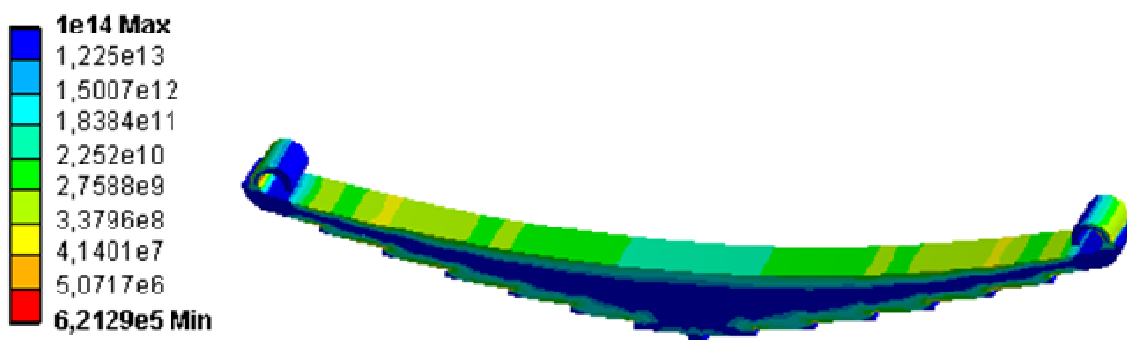
Rys. 3. Resor piórowy: a) rozkład nacisków w strefie kontaktu, b) stan naprężeń wywołany oddziaływaniami tarciovymi

Źródło: Opracowanie własne.

Po przeanalizowaniu wyników analiz statycznych stwierdzono, że badany resor przenosi obciążenia statyczne. Potwierdzono, że najbardziej obciążone jest pierwsze pióro oraz, że największe zużycie piór będzie występowało na ich końcach. Uzupełnieniem analiz statycznych są obliczenia odporności na zużycie zmęczeniowe.

Analiza zmęczeniowa

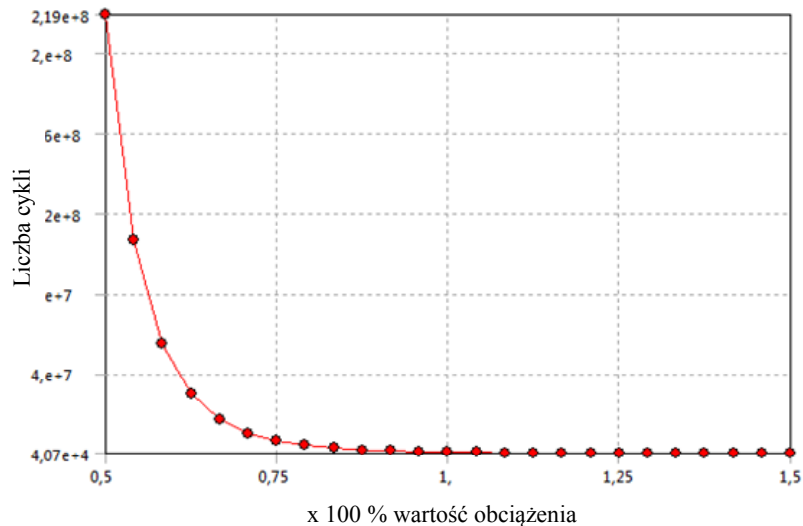
W związku z tym, że typowe uszkodzenia resoru wynikają ze zużycia zmęczeniowego przeprowadzono dodatkowo analizy numeryczne trwałości resoru. Założono, że na resor oddziałują obciążenia obustronnie zmienne symetryczne. W analizie przyjęto, że obciążenie zmienia się sinusoidalnie w czasie. Wyniki trwałości (ilości cykli) resoru piórowego uzyskane na podstawie symulacji komputerowych przedstawiono na rysunku 4. Najmniejszą liczbę cykli zmian obciążenia jaką wytrzyma resor wynosi $n_{\min} = 6,2129 \cdot 10^5$.



Rys. 4. Rozkład trwałości resoru piórowego

Źródło: Opracowanie własne.

Na podstawie przeprowadzonych analiz opracowano również funkcję trwałości części samochodowych typu resor piórowy w zależności od jego obciążania w procesie eksploatacji. Wykres przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Krzywa zużycia zmęczeniowego resoru piórowego

Źródło: Opracowanie własne.

PODSUMOWANIE

Symulacje komputerowe stanowią początkowy etap w poprawnym projektowaniu procesu technologicznego części maszyn. Z przeprowadzonych analiz numerycznych procesu wynika, że badany numerycznie resor piórowy wytrzymuje obciążenia statyczne, gdyż maksymalne naprężenia zredukowane wywołane oddziaływaniami zewnętrznymi wynoszą $\sigma_{z_{max}} \approx 924$ [MPa] < $\sigma_{zdop} = 1000$ [MPa]. Przeprowadzono również obliczenia odporności na zużycie zmęczeniowe. Opracowano krzywą zużycia zmęczeniowego, na podstawie której można prognozować trwałość części w zależności od wartości jej obciążenia. Analiza komputerowa Metodą Elementów Skończonych umożliwia określenie miejsc spiętrzenia naprężeń. Dla analizowanego przypadku wykazano, że największe naprężenia zredukowane występują tuż za uchem (mocowaniem resora) oraz końcówki poszczególnych piór, co pokrywa się z występującymi w rzeczywistości uszkodzeniami tego typu części. W celu poprawy odporności resoru na zużycie zmęczeniowe można przeprowadzać jako obróbkę wykończeniową proces kulowania.

BIBLIOGRAFIA

1. Reński A.: *Budowa Samochodów. Układy hamulcowe i kierownicze oraz zawieszenia*, Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2004.
2. Sułkowski M., Kulakowska A.: *Analiza numeryczna półeliptycznego resoru piórowego*, XII Słupskie Forum Motoryzacji, Słupsk 2010.
3. Patyk R., Kulakowska A.: *Analiza numeryczna stanów naprężeń w procesie skoncentrowanego kulowania pióra resoru*, Logistyka 2011 (w druku).
4. Janecko N.: *Drgania, wytrzymałość i przyspieszone badania samochodów ciężarowych*, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 1975.
5. Hebda M.: *Eksploatacja samochodów*, Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji, PIB, Radom 2005.
6. Żukowski S.: *Resor*, Państwowe Wydawnictwo Techniczne, Warszawa 1958.
7. www.sdic.pl
8. www.sklep.resor-rex.com.pl

NUMERICAL CALCULATIONS OF LEAF SPRING DURABILITY

Abstract

In the paper computer calculations of leaf spring durability is presented. An application in APDL language was elaborated. The static strength numerical calculations as well as fatigue analysis in Ansys program were conducted. The numerical calculation with using Finite Element Method were made. Received results can be useful and elaborated application can be used as a helpful tool to properly and conscious preparation of technological process during production of leaf springs.

Autorzy:

dr inż. **Agnieszka Kulakowska** – Politechnika Koszalińska

dr inż. **Radosław Patyk** – Politechnika Koszalińska