

Radosław PATYK¹
Agnieszka KUŁAKOWSKA²

ANALIZA NUMERYCZNA STANÓW NAPRĘŻEŃ W PROCESIE SKONCENTROWANEGO KULOWANIA PIÓRA RESORU

W pracy analizie poddano wpływ parametrów technologicznych procesu kulowania resoru na stany naprężeń w jego warstwie wierzchniej. Przeprowadzono analizy numeryczne procesu zmęczenia części typu resor. Opracowano aplikację w systemie Ansys/LS-Dyna w języku APDL, uwzględniającą kulowanie resoru. Obliczenia numeryczne przeprowadzono z zastosowaniem Metody Elementów Skończonych. Uzyskane wyniki mogą stanowić pomoc a opracowana aplikacja narzędzie wspomagające do poprawnego i świadomego opracowania procesu technologicznego produkcji resorów piórowych.

NUMERICAL ANALYSIS OF STRESS STATES DURING CONCENTRATED SHOT PEENING OF SPRING LEAF

In the paper the influence of spring leaf shot peening technological parameters on the state of stress in the surface layer was analyzed. The numerical analysis of fatig process of car part like spring leaf were conducted. An application in Ansys/LS-Dyna system in language APDL was elaborated and the shot peening process was taken into account. The numerical calculations were conducted using Finite Element Methods. Received results can be useful and elaborated application can be used as the helpful tool in properly and conscious description of spring leaf technological process production.

1. WPROWADZENIE

Resory piórowe zostały niemal całkowicie wyparte jako elementy sprężyste stosowane w samochodach osobowych, mają jednak zastosowanie przede wszystkim w samochodach dostawczych i ciężarowych [1]. Resory piórowe stanowią uniwersalny element sprężysty, stosowany w zawieszeniach samochodów, gdyż mogą przenosić nie tylko siły pionowe, powstające podczas jazdy po nierównościach drogi, ale i również przenoszą siły wzdłużne, poprzeczne oraz momenty skręcające [8]. Aby przeciwdziałać pewnym niekorzystnym zjawiskom wynikających z długotrwałej eksploatacji resorów wielopiórowych powstał resor paraboliczny. Resor paraboliczny posiada pióra o zmiennej grubości na całej jego długości. Najgrubsze pióra występują w środkowej części, a przy końcach są coraz cieńsze.

¹Politechnika Koszalińska, ul. Raclawicka 15-17, 75-620 Koszalin, radoslaw.patyk@tu.koszalin.pl

²Politechnika Koszalińska, ul. Raclawicka 15-17, 75-620 Koszalin, , agnieszka.kulakowska@tu.koszalin.pl

Ukształtowane w taki sposób pióra stykają się tylko w miejscu mocowania osi pojazdu i w czasie uginania resoru nie występuje między nimi tarcie.

Tradycyjny resor piórowy jest sprężyną wielopłytkową składającą się ze stalowych płaskowników wykonanych ze stali sprężynowej o zróżnicowanej długości, odkształconych do kształtu fragmentu elipsy i z tego powodu nazywany jest resorem półeliptycznym [1]. Sprężyny płaskie nazywane są piórami mają one stopniowo malejące długości począwszy od pióra najdłuższego zwanego głównym, aż do pióra najkrótszego. Resor stanowi więc wiązkę piór, z których każde w stanie swobodnym jest wygięte do innego promienia krzywizny. Gdy ułożony pakiet piór ściągnięty zostanie ze sobą opaską do poszczególne pióra ulegną odkształceniu, tworząc w ten sposób zespół przylegających do siebie piór [2]. Taka konstrukcja wynika z dążenia do jak najlepszego wykorzystania materiału. Ponieważ naprężenia w środkowej części resoru są największe, największa jest tam grubość pakietu piór. Pióra resoru w stanie swobodnym są wstępnie wygięte w taki sposób, aby pióra najdłuższe miały większe promienie krzywizny. Resor po skręceniu uzyskuje jednakowy promień krzywizny, przez co powstają w piórach naprężenia wstępne, dzięki którym zmniejszają się naprężenia robocze w najdłuższych piórach, a to powoduje zwiększenie się trwałość zmęczeniowej resoru [4].

Resory piórowe stosowane są zwykle, jako resory podłużne zawieszenia przedniej lub tylnej osi pojazdu. Czasami też stosuje się je jako resory poprzeczne w zawieszeniach niezależnych przednich i tylnych kół. Upraszcza w prawdzie konstrukcję zawieszenia, lecz wymaga większej precyzji przy wykonywaniu resoru. Jest to szczególnie ważne w zawieszeniu przednim, gdyż parametry resoru wpływają na kierowność pojazdu.

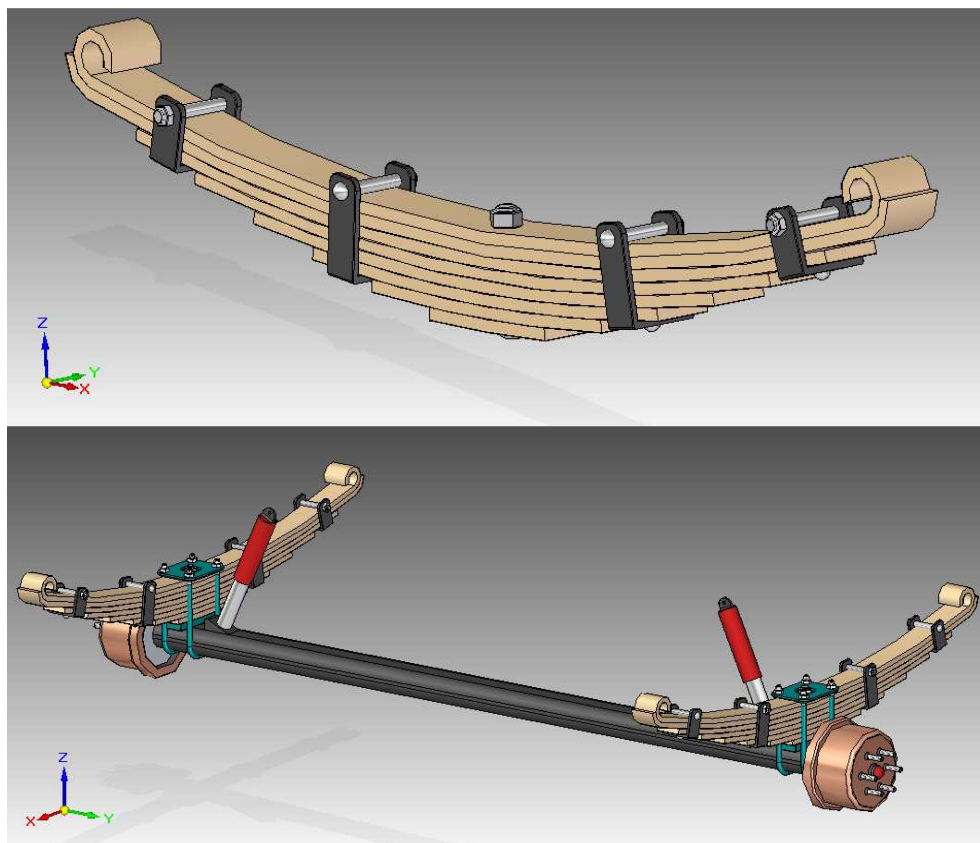
Główne pióro resoru jest najczęściej zakończone uchami, które służą do mocowania resoru z nadwoziem pojazdu. W ucha resorów wciśnięte są tulejki, które zapewniają lepszą jakość połączenia. W resorach ciężkich stosowane są tulejki wykonane z brązu, który obniża współczynnik tarcia pomiędzy sworzniem, a tulejką. W resorach lżejszych stosuje się tulejki gumowo-metalowe, dające połączenie elastyczne [8].

Aby częstotliwość drgań samochodu była, korzystna z punktu widzenia fizjologii człowieka, sztywność resoru powinna wzrastać wraz ze wzrostem obciążenia, efekt taki umożliwia zastosowanie resorów o charakterystyce progresywnej. Przy liniowej charakterystyce resoru głównego, charakterystykę progresywną uzyskuje się przez zastosowanie dodatkowego resoru, stopniowo włączającego się do pracy przy wzroście obciążenia.

Wysoko niekorzystny wpływ na pracę resorów piórowych ma tarcie ślizgowe występujące pomiędzy piórami. Tarcie powoduje zwiększenie sztywność resoru, co prowadzi do wzrostu częstości drgań nadwozia. Wywołuje też powierzchniowe zatarcie piór i ubytki na ich powierzchni, a to zmniejsza ich trwałość. W celu zmniejszenia sił tarcia powierzchnia piór pokrywana jest farbami cynkowymi lub smarami grafitowymi. W resorach lekkich stosowane są różnorodne przekładki z tworzyw sztucznych o niskim współczynniku tarcia [8].

Proste zakończenia końcówek piór, w szczególności grubszych, powodują wzrost nacisku pomiędzy piórami, a to skutkuje wzrostem tarcia i ścierania się powierzchni piór. Dlatego też w niektórych resorach walcuje się końce piór. Z powodu większej elastyczności walcowanych końców piór rozkład naprężeń stycznych pomiędzy piórami jest korzystniejszy. Walcowanie powoduje też, że jego konstrukcja zbliża się do teoretycznej belki o stałej wytrzymałości

Niekiedy pióra główne resorów ciężkich zakończone są jednym lub dwoma ślizgaczami zamiast uchami. Pozwala to na zmniejszanie czynnej długości resoru przy narastaniu obciążenia. Dzięki temu taki resor posiada charakterystykę progresywną, a więc sztywność resoru wzrasta wraz ze wzrostem obciążenia [8]. Typowy układ zawieszenia z zastosowaniem resorów piórowych przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Układ zawieszenia z zastosowaniem resorów piórowych

Podczas montażu resoru poszczególne pióra są ściągane do siebie centralną śrubą ściskającą, montowaną na samym środku piór. Odpowiednio dobrana krzywizna piór, pozwala na ich prawidłowe przyleganie, na pióra zakłada się również opaski, które utrzymują pakiet piór w całości nie pozwalając na ich przemieszczanie. Liczba piór w resorach jest różna. Tradycyjnie resory piórowe w samochodach ciężarowych średniej ładowności mają 10÷18 piór z płaskowników grubości 8-14 mm. W czasie pracy resoru pióra uginają się i przemieszczają względem siebie, a powstające przy tym tarcie daje korzystne tłumienie drgań zawieszenia. Jednak podczas użytkowania samochodu między pióra resoru dostaje się coraz więcej zanieczyszczeń, które wraz z postępującym procesem

korozji stali powodują nadmierne zwiększenie tarcia między piórami. Tarcie to z czasem staje się na tyle duże, że niekorzystnie wpływa na pracę zawieszenia i usztywnia resor. Z tego też względu dąży się do zmniejszenia liczby piór występujących w resorach. W latach siedemdziesiątych zaczęto stosować pióra coraz grubsze (14÷24 mm). Stosując większą grubość piór, wymaganą nośność resoru można osiągnąć już przy niewielkiej ich liczbie. W latach osiemdziesiątych rozpowszechniły się resory paraboliczne, w których poszczególne pióra na całej długości mają zmienną grubość: grube w środkowej części, cieńsze na końcach. Coraz doskonalsze ukształtowanie piór oraz zastosowanie materiałów o większej wytrzymałości sprawia, iż liczba piór w resorach parabolicznych może być mała (2÷4 piór), co daje dwie fundamentalne korzyści:

- zmieszenie masy zawieszenia,
- zmniejszenie wysokości zawieszenia, a tym samym obniżenie położenia ramy i podłogi ładunkowej [3].

2. ŚRODKI I SPOSOBY ZWIĘKSZANIA TRWAŁOŚCI RESORÓW PIÓROWYCH

W praktyce zdarza się nieraz, że resory obliczone właściwie pod względem wytrzymałościowym nie zawsze wytrzymują w określonych warunkach pracy i ulegają szybkiemu uszkodzeniu. Zakładając oczywiście jednakowe warunki pracy, wiadomym bowiem jest, iż resor pojazdu poruszającego się na dostatecznie gładkich i dobrze utwardzonych nawierzchniach dróg wytrzymuje przebieg rzędu 100 000 km bez pęknięć, podczas gdy na złych i źle utrzymanych nawierzchniach przebieg pojazdu do pęknięć resoru może ulec skróceniu do 15 000, a nawet 10 000 km. Należy zaznaczyć, iż warunki pracy resoru są wyjątkowo uciążliwe. Resor pracuje w środowisku sprzyjającemu rozwojowi korozji, warunki te pogarszają dodatkowo naprężenia zmienne pojawiające się w resorze podczas pracy. Należy również podkreślić, że równoczesne oddziaływanie na metal tych dwóch czynników przyspiesza niszczenie zmęczeniowe metalu [5].

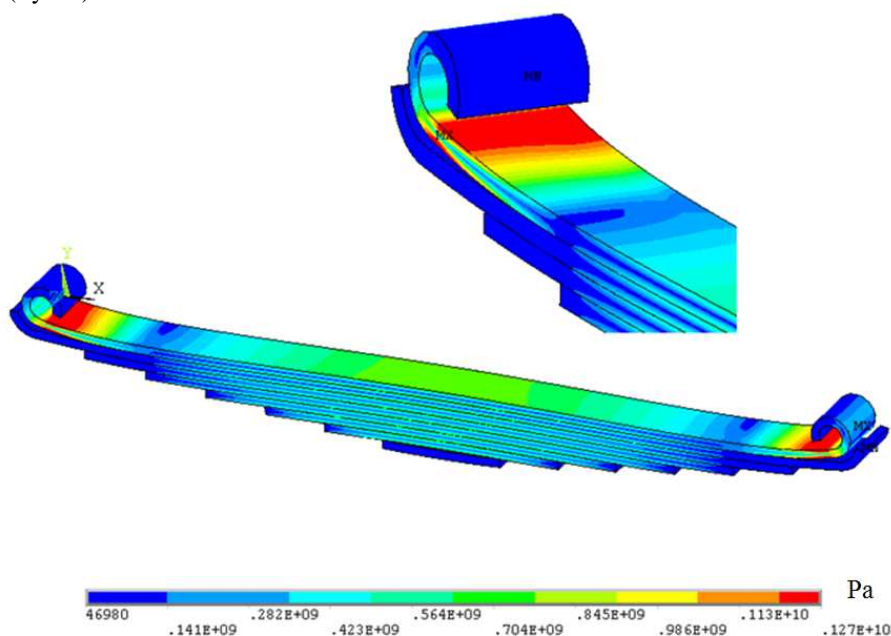
Mówiąc o wytrzymałości resorów, a w szczególności o wytrzymałości zmęczeniowej, nie sposób pominąć powierzchniowej obróbki metalu za pomocą tzw. kulowania. Ten sposób obróbki powoduje umocnienie powierzchni części maszyn prowadząc do zwiększenia wytrzymałości zmęczeniowej. Kulowanie polega na uderzaniu w powierzchnię metalu strumieniem stalowych kulek o dużej prędkości. Jest ono sposobem obróbki plastycznej na zimno, stosowanym do wykończonych powierzchni i poddanych ostatecznie obróbce cieplnej. Metoda ta ma istotne znaczenie w zakresie ostatecznej obróbki sprężyn i resorów [5]. Śrut wyrzucany przy pomocy sprężonego powietrza lub wirnika, uderzając z prędkością od 40 do 90 m/s, (w zależności od parametrów kulowania), w powierzchnię obrabianych części maszyn powoduje powstawanie odkształceń plastycznych i wytworzenie ścisających naprężeń własnych w wierzchniej warstwie obrabianych części. Proces kulowania charakteryzują następujące czynniki: rodzaj i granulacja śrutu, intensywność (natężenie) kulowania, oraz pokrycie powierzchni. Dobór śrutu do umocnienia powierzchniowego uzależniony jest zwłaszcza od wymaganej głębokości zalegania i rozkładu zgniotu, oraz wymaganej chropowatości otrzymanej powierzchni. Pióra resorów kuluje się śrutem stalowym kulistym o średnicy 0,3 ÷ 0,75 mm, śrutem stalowym ciętym z drutu 0,4 ÷ 0,6, lub kulkami szklanymi o średnicy 175 ÷ 300 μm [7]. Urządzenia stosowane do kulowania można podzielić na mechaniczne, pneumatyczne i mechaniczno-pneumatyczne. Wyróżnia się następujące metody kulowania: kulowanie

strumieniowe, kulowanie odśrodkowe, kulowanie wibracyjne (wibrokulowanie), pneumokulowanie, młotkowanie, oraz kulowanie laserowe [6].

Niestosowanie obróbki wykańczającej (np. kulowania sprężyn i resorów), zaprzecza całkowicie korzyści płynące z zastosowania do wyrobu tych elementów wysokowartościowych stali. Dokładne wykończenie powierzchni podnosi własności zmęczeniowe materiałów wysokogatunkowych, a stosunkowo mało zmienia właściwości materiałów o słabej jakości [5].

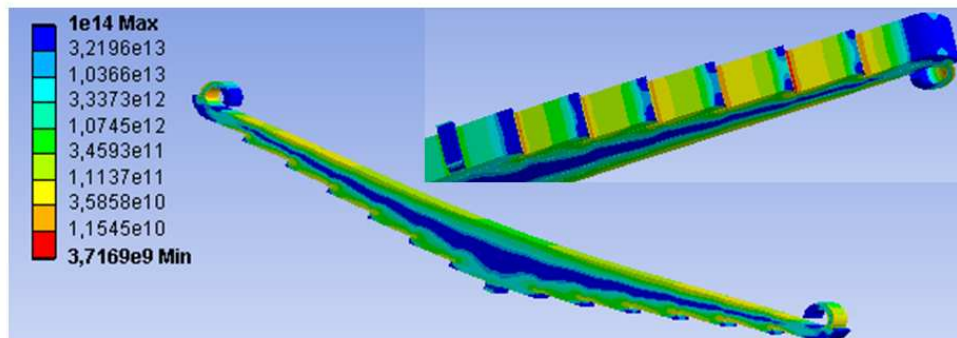
3. ANALIZY NUMERYCZNE

W celu określenia miejsc najmniej wytrzymałych w resorach piórowych przeprowadzono analizy numeryczne. Stwierdzono, że w analizowanym resorze najmniej wytrzymałe są miejsca tuż za uchem (mocowaniem resora) oraz końcówki poszczególnych piór (rys. 2).



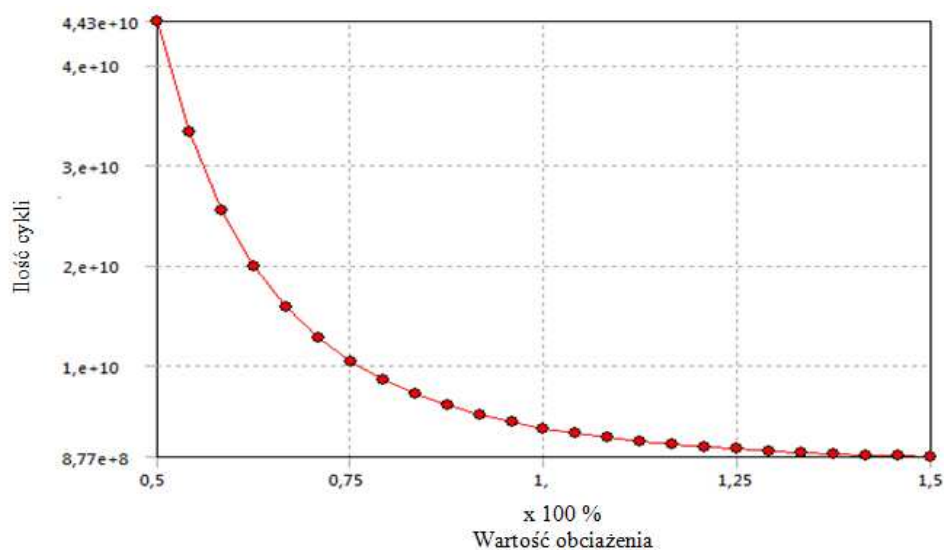
Rys. 2. Rozkład naprężeń zredukowanych w resorze piórowym

W związku z tym, że typowe uszkodzenia resoru wynikają ze zużycia zmęczeniowego przeprowadzono dodatkowo analizy numeryczne trwałości resoru. Wyniki symulacji przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Trwałość resoru piórowego (ilość cykli)

Na podstawie przeprowadzonych analiz opracowano również funkcję trwałości części w zależności od jej obciążania w procesie eksploatacji (rys. 4)

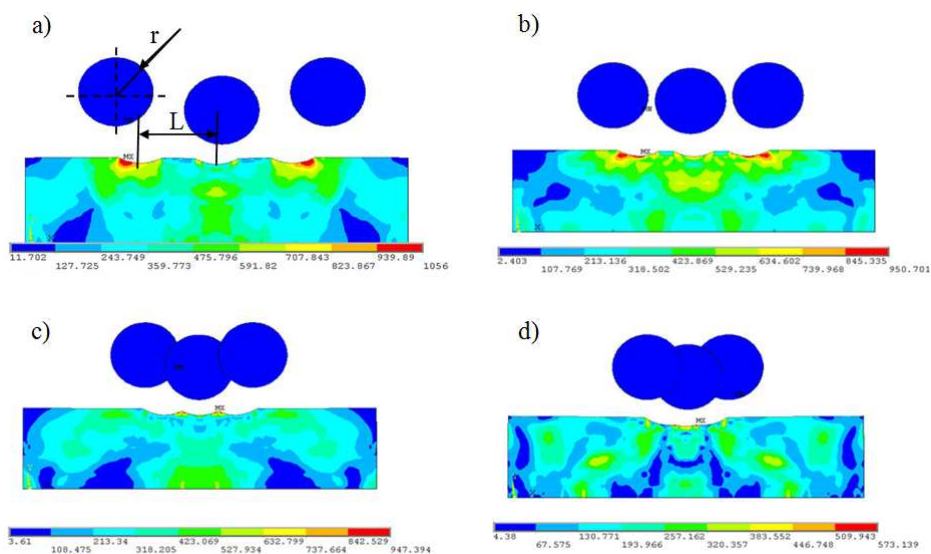


Rys. 4. Krzywa zmian trwałości resoru w zależności od procentowego obciążania eksploatacyjnego

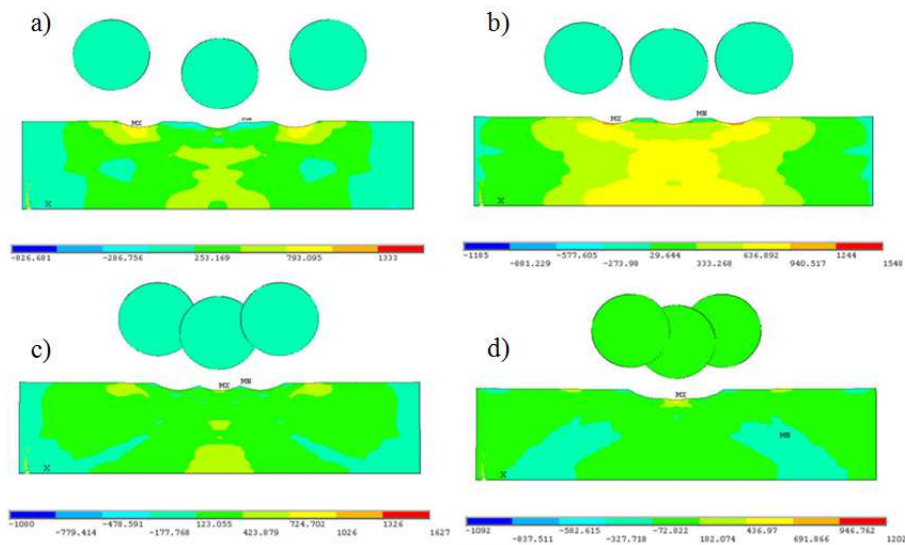
W celu poprawy odporności resoru na zużycie zmęczeniowe można przeprowadzać jako obróbkę wykończeniową proces kulowania. Jednakże dobór parametrów technologicznych procesu kulowania jest niezwykle istotny oraz jednocześnie bardzo trudny. W celu poprawnego doboru parametrów technologicznych procesu można przeprowadzić symulacje komputerowe, które pomogą poprawnie zaprojektować proces technologiczny. W pracy przeprowadzono symulacje wpływu odległości środków uderzeń kulek od siebie na stan naprężeń i odkształceń w warstwie wierzchniej resoru. W tym celu opracowano

aplikację w programie Ansys/LS-Dyna umożliwiającą zmianę średnic kulek, zmianę modelu materiałowego części obrabianej, zmianę prędkości początkowej kulek i inne.

W przeprowadzonej analizie jako materiał obrabiany zastosowano model sprężysto/plastyczny z umocnieniem liniowym o parametrach odpowiadających stali sprężynowej 50SF. Kulki wykonane były ze szkła, w symulacji przyjęto, że są idealnie sztywne i nieodkształcalne ($E \rightarrow \infty$). Wyniki rozkładu naprężeń przy wybranych odległościach uderzeń kulek od siebie przedstawiono na rysunku 5 oraz 6.



Rys. 5. Rozkład naprężeń zredukowanych po kulowaniu przy stałej średnicy i prędkości początkowej dla wybranych odległości uderzeń kul od siebie a) $L=3r$, b) $L=2R$, c) $L=r$, d) $L=0,5 r$



Rys. 6. Rozkład składowej σ_y naprężeń po kulowaniu przy stałej średnicy i prędkości początkowej dla wybranych odległości uderzeń kul od siebie a) $L=3r$, b) $L=2R$, c) $L=r$, d) $L=0,5 r$

8. WNIOSKI

Maksymalne naprężenia ściskające wytworzone wskutek kulowania osiągają maksymalną wartość tuż pod powierzchnią części. Stwierdzono, że wartość naprężeń ściskających ukonstytuowanych pod wpływem kulowania wzrasta wraz ze wzrostem liczby uderzeń kulek (stopniem pokrycia powierzchni). Niezbędne są badania eksperymentalne wpływu stopnia pokrycia powierzchni w procesie kulowania na trwałość obrabianych resorów. Symulacje komputerowe stanowią początkowy etap w poprawnym projektowaniu procesu technologicznego części maszyn.

9. BIBLIOGRAFIA

- [1] Hebda M.: *Eksploatacja Samochodów*, Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji, PIB, Radom 2005.
- [2] Orzełowski S.: *Budowa podwozi i nadwozi samochodowych*, Wydawnictwo Szkolne i Pedagogiczne, Warszawa 1992.
- [3] Prochowski Leon, Żuchowski Andrzej – *Samochody Ciężarowe i Autobusy*, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 2006.
- [4] Sułkowski M., Kułakowska A.: *Analiza numeryczna pótleptycznego resoru piórowego*, Słupskie Forum Motoryzacyjno-Drogowe, Słupsk 2010
- [5] Żukowski S. *Resor*, Państwowe Wydawnictwo Techniczne, Warszawa 1958
- [6] Nakonieczny A.: *Dynamiczna powierzchniowa obróbka plastyczna – kulowanie*, Instytut Mechaniki Precyzyjnej, Warszawa 2002.
- [7] Nakonieczny A.: *Powierzchniowe obróbki wyrobów metalowych*, Instytut Mechaniki Precyzyjnej, Warszawa 2000.
- [8] <http://www.resory.pl/>