

*Tarczowy układ hamulcowy, nagrzewanie się tarczy hamulcowej,  
tarcie, analiza numeryczna, Metoda Elementów Skończonych, ANSYS/LS-DYNA,  
rozkład temperatur, naprężenia cieplne*

KUŁAKOWSKA Agnieszka<sup>1</sup>  
PATYK Radosław<sup>2</sup>

### **ANALIZA NUMERYCZNA PROCESU NAGRZEWANIA SIĘ TARCZY HAMULCOWEJ PODCZAS HAMOWANIA**

*W pracy przeprowadzono analizy numeryczne procesu nagrzewania się tarczy podczas hamowania. Przeprowadzono analizę wpływu wartości nacisku  $p$  klocka hamulcowego na tarczę oraz prędkości kątowej  $\omega$  na wartość i rozkład pól temperatur oraz wpływ ciepła wyzwolonego w skutek hamowania na stan intensywności naprężeń w tarczy. Wszystkie analizy przeprowadzono z zastosowaniem Metody Elementów Skończonych. Dla analizowanych przypadków opracowano aplikacje w języku APDL w systemie ANSYS/LS-DYNA.*

### **NUMERICAL ANALYSIS OF BRAKE DISK HEATING PROCESS WHILE BRAKING**

*In the work one carried out numerical analysis of the disk heating process during braking. An analysis of the impact of the pressure  $p$  on the disc brake pad and the angular velocity  $\omega$  on the value and distribution of temperature fields and the influence of heat liberated due to inhibition on the states of stress intensity in the braking disk. All analysis using the Finite Element Method were performed. For the analyzed cases in the language APDL applications in the system ANSYS / LS-DYNA were developed.*

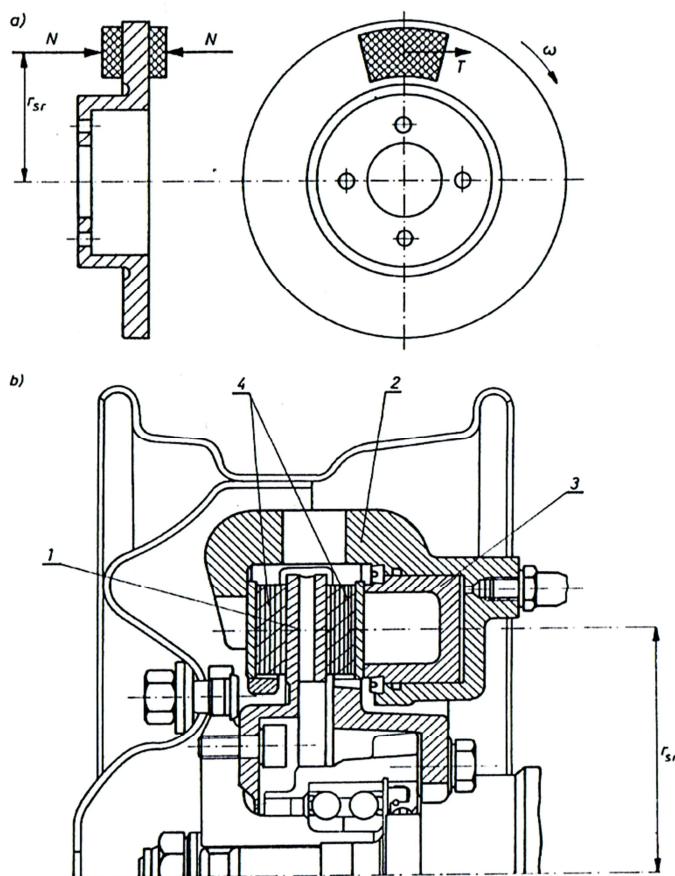
#### **1. WPROWADZENIE**

Intensywnie wzrastająca ilość pojazdów powoduje pogarszanie się warunków bezpieczeństwa w ruchu drogowym. Bezpośredni wpływ na bezpieczeństwo użytkownika pojazdów ma ich stan techniczny. Elementem odpowiadającym za bezpieczeństwo czynne w ruchu drogowym jest układ hamulcowy, którego głównym zadaniem jest zmniejszenie prędkości jazdy lub zatrzymanie pojazdu w określonym miejscu. Ponadto od układu hamulcowego oczekuje się, aby droga hamowania była jak najkrótsza, czas reakcji układu jak najmniejszy, natomiast zdolność hamowania pozostawała stała nawet przy długotrwałym hamowaniu, przy zachowaniu jak największej stateczności pojazdu. Najpopularniejsze są dwa systemy hamulcowe: bębnowe oraz tarczowe. Hamulce tarczowe lepiej wytracają ciepło a zatem i są skuteczniejsze jednakże podstawowy problem tzn. nieodpowiednie nagrzewanie się elementów układu hamulcowego jest ciągle aktualnym

<sup>1</sup>Politechnika Koszalińska, ul. Raclawicka 15-17, 75-620 Koszalin, agnieszka.kulakowska@tu.koszalin.pl

<sup>2</sup> Politechnika Koszalińska, ul. Raclawicka 15-17, 75-620 Koszalin, radoslaw.patyk@tu.koszalin.pl

problemem. Działanie hamulca tarczowego polega na dociskaniu do dwóch stron wirującej wraz z kołem jezdnym tarczy hamulcowej klocków ciernych. Obustronny docisk klocków jest korzystny, z uwagi na siły dociskające, które równoważą się nie powodując odkształceń bocznych tarczy. Klocki cierne wraz z dociskającymi je tłoczkami są umieszczone w strzemienu, którego zadaniem jest przekazanie momentu hamulca na odpowiednie elementy prowadzące koło jezdne. Typowy układ hamulcowy z zastosowaniem tarcz hamulcowych przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Tarczowy mechanizm hamulcowy: a) zasada działania, oznaczenia, b) przykład konstrukcji; 1-tarcza hamulcowa, 2- strzemię, 3- tłok, 4- klocki hamulcowe [3]

Popularność stosowania hamulców tarczowych w większości samochodów osobowych jest uzasadnione licznymi zaletami:

-korzystny rozkład nacisków na całej powierzchni elementów ciernych do tarczy, co zapewnia równomierne zużywanie się okładzin,

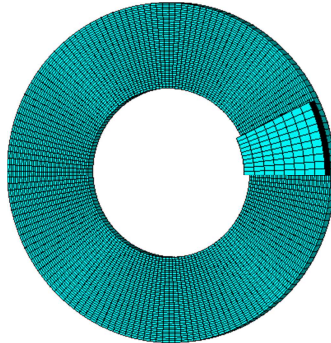
- możliwość wywołania znacznie większych nacisków jednostkowych pomiędzy elementami trącymi,
- dobre warunki chłodzenia. Tarcze odprowadzają nagromadzone ciepło ze swych dwóch płaskich powierzchni bezpośrednio do atmosfery. Znacznie bardziej oddają ciepło tarcze wentylowane z kanałami promieniowymi,
- jednakowa skuteczność hamowania niezależna od kierunku jazdy samochodu,
- duża odporność na zjawisko zaniku sił hamowania w wysokich temperaturach,
- mniejsza masa hamulca, a tym samym mniejsza masa nie resorowana,
- mniej praco- i czasochłonna wymiana elementów ciernych.

Natomiast najważniejszą wadą hamulców tarczowych jest krótki czas eksploatacji elementów ciernych oraz otwarta budowa hamulców tarczowych powodująca możliwość wniknięcia zanieczyszczeń. Z tego powodu użytkownik pojazdu musi przestrzegać bezwzględnie zaleceń producenta, dokonując systematycznie okresowego przeglądu układu hamulcowego.

Podczas procesu hamowania energia kinetyczna ruchu pojazdu zamieniana jest w krótkim czasie w energię cieplną, co prowadzi do znacznego nagrzewania się elementów roboczych hamulca. Wzrost temperatury wpływa niekorzystnie na pracę hamulca, ponieważ: a) powoduje zmniejszenie współczynnika tarcia, b) wywołuje odkształcenia elementów roboczych, c) jest przyczyną powstawania w elementach hamulca naprężeń cieplnych mogących powodować ich uszkodzenia. Ze względu na zachodzące w elementach roboczych hamulca znacznych naprężeń cieplnych przy projektowaniu tarcz hamulcowych dąży się do zapobiegania nadmiernemu wzrostowi czynnika temperatury. Wykonanie dokładnych obliczeń przebiegu zmian energii kinetycznej w ciepło jest zadaniem bardzo skomplikowanym. Obecnie stosuje się technikę komputerową i procedury metody elementów skończonych (MES). We wstępnych obliczeniach można posługiwać się ogólnymi wytycznymi wynikającymi z doświadczeń producentów. Przy określonej prędkości samochodu energia kinetyczna jest proporcjonalna do masy samochodu. Miara obciążenia hamulców tarczowych może być energia kinetyczna przypadająca na jednostkę powierzchni okładziny czarnej [1].

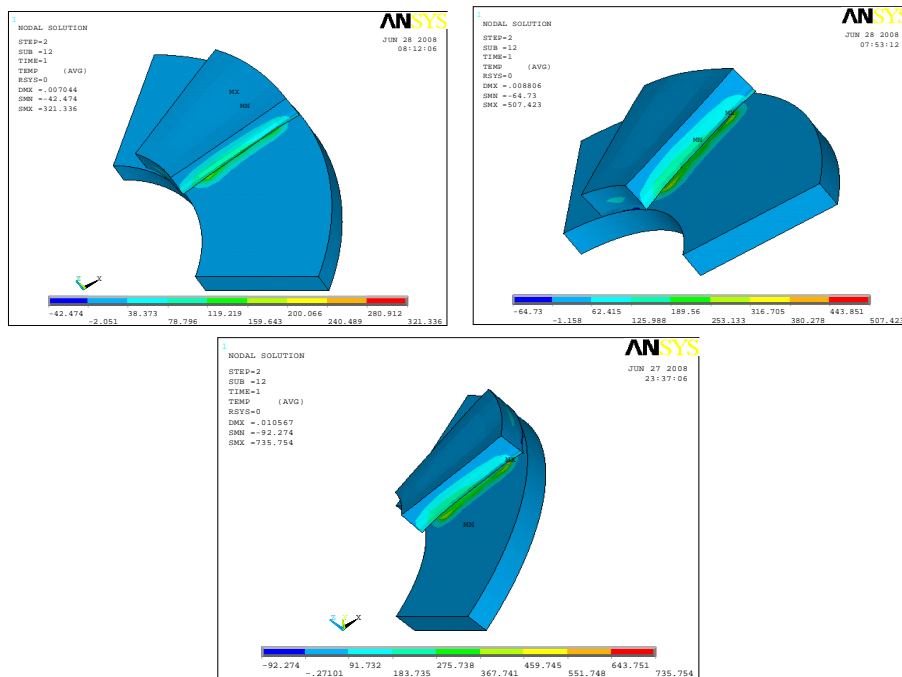
## 2. ANALIZA NUMERYCZNA

Model został zaprojektowany w środowisku ANSYS/Multiphysics. Opracowano makro w języku APDL a następnie przeprowadzono analizy numeryczne. Obiektem badań była tarcza hamulcowa razem z klockiem hamulcowym [2, 4, 5, 6]. Symulacje numeryczne miały na celu określenie wartości i rozkładu temperatury w tarczy hamulcowej oraz rozkład intensywności naprężeń pod wpływem wydzielonego w procesie tarcia ciepła. Do podziału obiektu na elementy skończone użyto typu elementu 3D SOLID5. Element składa się z ośmiu węzłów oraz sześciu stopni swobody w każdym węźle. Używany w strukturalnych i piezoelektrycznych analizach SOLID5 ma duże odchylenie i nacisk Model został podzielony na 1540 elementów skończonych, tarcza hamulcowa posiada 900 elementów, a klocek hamulcowy 640. Na rysunku 2 przedstawiono widok dyskretnego modelu tarczy hamulcowej i klocka hamulcowego. Do analizy zjawisk kontaktowych założono kontakt typu powierzchnia-powierzchnia (surface-to-surface) oraz element kontaktowy CONTA173.

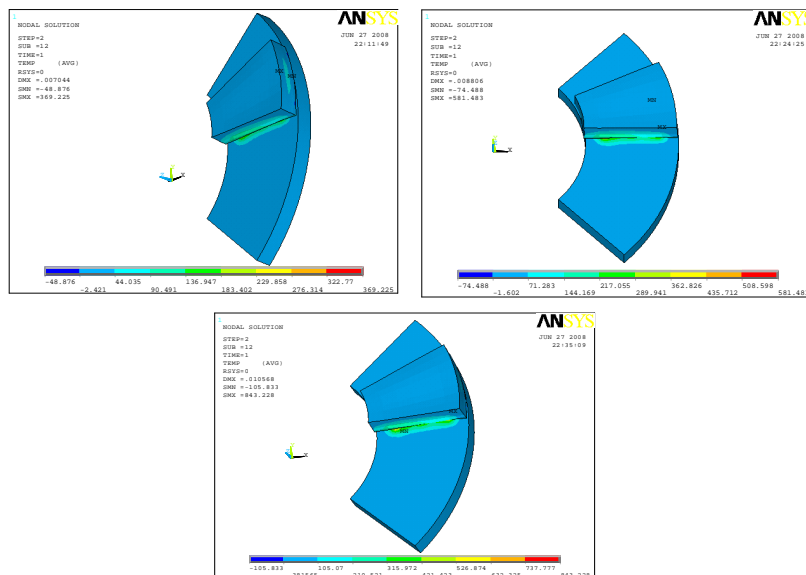


Rys. 2. Dyskretny model tarczy hamulcowej i klocka hamulcowego

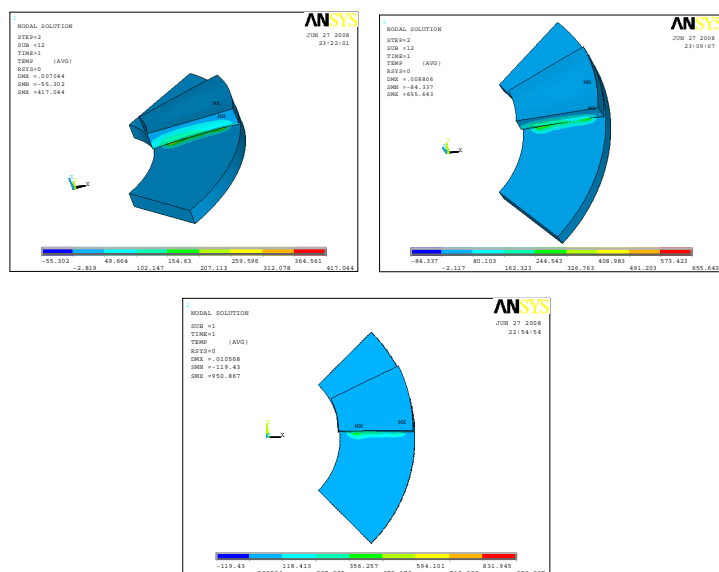
Rysunki 3 ÷ 5 przedstawiają mapy pól temperatur, zaś rysunki 6-8 mapy intensywności naprężeń wywołanych wpływem ciepła pochodzącego z procesu hamowania.



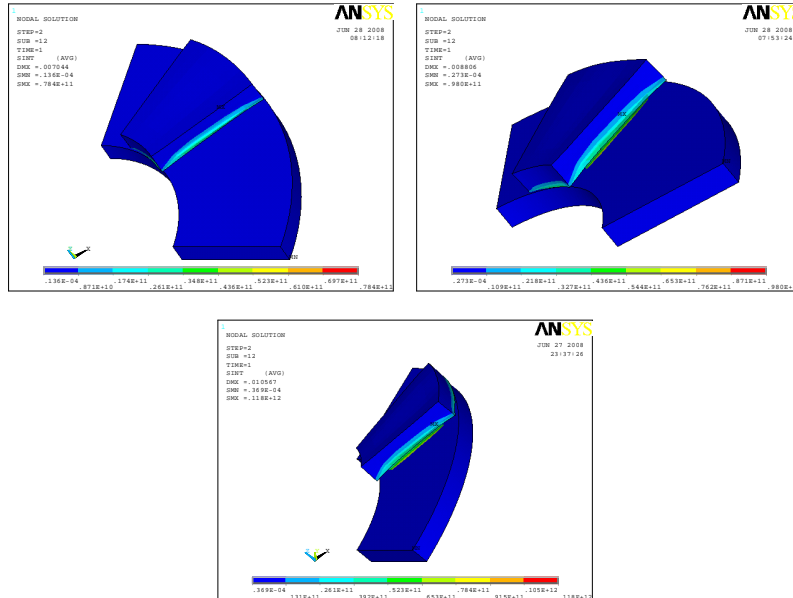
Rys. 3. Pola temperatury przy ciśnieniu dociskającym kłosek  $p = 100 \text{ MPa}$ , dla prędkości:  
a)  $\omega = 0,4 \text{ [obr/s]}$ , b)  $\omega = 0,5 \text{ [obr/s]}$ , c)  $\omega = 0,6 \text{ [obr/s]}$ ,



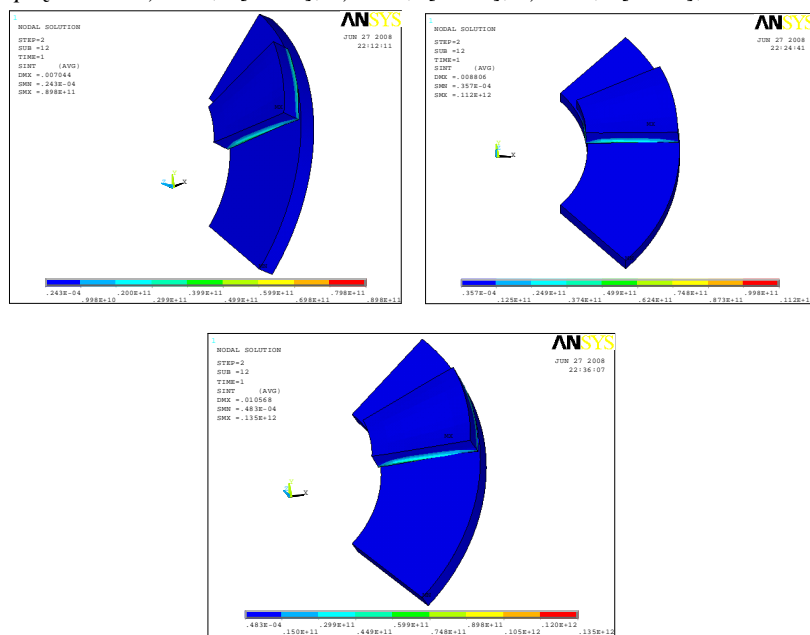
Rys. 4. Pola temperatury przy ciśnieniu dociskającym klocek  $p = 150$  MPa, dla prędkości: a)  $\omega = 0,4$  [obr/s], b)  $\omega = 0,5$  [obr/s], c)  $\omega = 0,6$  [obr/s],



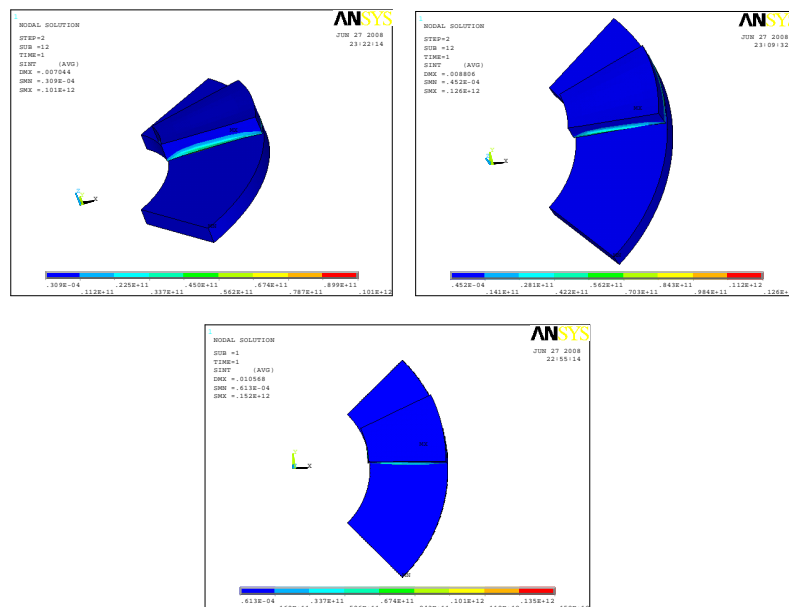
Rys. 5. Pola temperatury przy ciśnieniu dociskającym klocek  $p = 200$  MPa, dla prędkości: a)  $\omega = 0,4$  [obr/s], b)  $\omega = 0,5$  [obr/s], c)  $\omega = 0,6$  [obr/s],



Rys. 6. Intensywność naprężeń przy ciśnieniu dociskającym klocek  $p = 100$  MPa, dla prędkości: a)  $\omega = 0,4$  [obr/s], b)  $\omega = 0,5$  [obr/s], c)  $\omega = 0,6$  [obr/s],



Rys. 7. Intensywność naprężeń przy ciśnieniu dociskającym klocek  $p = 150$  MPa, dla prędkości: a)  $\omega = 0,4$  [obr/s], b)  $\omega = 0,5$  [obr/s], c)  $\omega = 0,6$  [obr/s],



Rys. 8. Intensywność naprężeń przy ciśnieniu dociskającym klocek  $p = 200$  MPa, dla prędkości: a)  $\omega=0,4$  [obr/s], b)  $\omega=0,5$  [obr/s], c)  $\omega=0,6$  [obr/s],

### 3. PODSUMOWANIE

Analizując rozkład temperatur i naprężeń w elementach układu hamulcowego stwierdzono, że wzrost prędkości wirowania tarczy hamulcowej oraz ciśnienia dociskającego klocek podczas hamowania, powoduje zwiększenie temperatur oraz naprężeń występujących w mechanizmie hamulcowym. Dla prędkości wirowania tarczy hamulcowej  $\omega=0,4$  [obr/s] i ciśnienia dociskającego klocek hamulcowy  $p=100$  [MPa] temperatura wyniosła  $T=321$  °C, a prędkości wirowania tarczy hamulcowej  $\omega=0,6$  [obr/s] i ciśnieniu dociskającym klocek  $p=200$  [MPa] temperatura wyniosła  $T=950$  °C. Również wraz ze wzrostem prędkości wirowania tarczy hamulcowej i ciśnienia dociskającego klocek hamulcowy wartość intensywności naprężeń. Powyższe analizy mają charakter jedynie rozpoznawczy, w celu głębszej analizy zagadnienia należy przeprowadzić szczegółowe symulacje dla większej ilości czynników zmiennych. Wyniki symulacji mogą posłużyć do prognozowania stanu naprężeń, pól temperatury przed wykonaniem modelu rzeczywistego tarczy hamulcowej.

### 4. BIBLIOGRAFIA

- [1] Lacki P.: *Teoretyczno-doświadczalna analiza wymiany ciepła w węzle tarcia*. Materiały Konferencji XXI Jesiennej Szkoły Tribologicznej, Łódź 1996.
- [2] Rakowski G., Kacprzak Z.: *MES w mechanice konstrukcji*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2005.

- [3] Reński A.: *Budowa samochodów. Układy hamulcowe i kierownicze oraz zawieszenia*. OWPW, Warszawa 2004.
- [4] Staniszewski B.: *Wymiana ciepła*. PWN Warszawa 1980.
- [5] Studziński K.: *Teoria, konstrukcja i obliczanie samochodu*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1973.
- [6] Zagrajek T., Krześciński G., Marek P.: *Metoda Elementów Skończonych w mechanice konstrukcji*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2006.