

Paweł BARANOWSKI¹
Krzysztof DAMAZIAK²
Jerzy JACHIMOWICZ³
Jerzy MAŁACHOWSKI⁴

PROPOZYCJA METODY SYMULACJI NUMERYCZNEJ PROCESU ZUŻYCIA OKŁADZIN CIERNYCH W HAMULCACH TARCZOWYCH

Poniższa praca przedstawia opis koncepcji numerycznej symulacji procesu zużycia okładzin ciernych. Dodatkowo przedstawione zostaną poszczególne etapy budowy modelu numerycznego stanowiska badawczego okładzin ciernych. Analizę procesu hamowania przeprowadzono przy użyciu kodu numerycznego wykorzystującego jawny schemat całkowania z uwzględnieniem numerycznej zamiany sił tarcia na ciepło. Wstępnie przeprowadzone zostały symulacje zjawisk zużycia w skali mikroskopowej wykorzystującej metodę SPH.

PROPOSITION OF NUMERICAL FRICTION LINING WEAR PROCESS SIMULATION METHOD IN DISK BRAKES

In this paper the concept of numerical wear process simulation of brake friction linings is presented. Moreover, the development process of the special test rig's numerical model is described. Performed computations of brake process were done based on the dynamic code with explicit solution scheme with heat generation. In order to represent the brake linings abrasive wear with numerical methods the Smooth Particle Hydrodynamics approach was finally adopted.

1. WSTĘP

W dzisiejszych czasach standardem jest to, że produkowane seryjne samochody potrafią przyspieszyć z 0 do 100 km/h na drodze o długości ok. 200 m w czasie 10 s i mniejszym. W identycznych warunkach, lecz podczas wytracania prędkości (hamowania) zajmuje to ok. 3-5 s. Na podstawie tego przykładu widać, jakie wymagania stawiane są przed układem hamulcowym, który jest jednym z najważniejszych układów mających znaczący wpływ na bezpieczeństwo w ruchu drogowym.

¹ Wojskowa Akademia Techniczna; Katedra Mechaniki i Informatyki Stosowanej; pbaranowski@wat.edu.pl

² Wojskowa Akademia Techniczna; Katedra Mechaniki i Informatyki Stosowanej; kdamaziak@wat.edu.pl

³ Wojskowa Akademia Techniczna; Katedra Mechaniki i Informatyki Stosowanej; jjachimowicz@wat.edu.pl

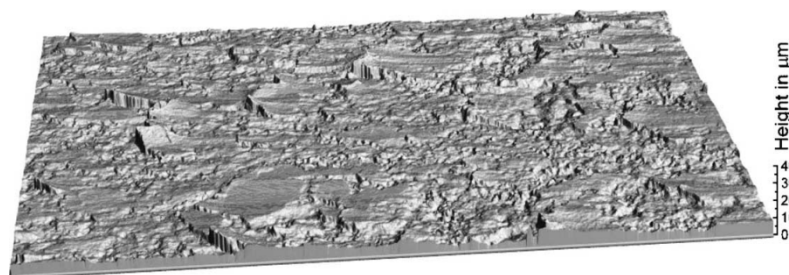
⁴ Wojskowa Akademia Techniczna; Katedra Mechaniki i Informatyki Stosowanej; jerzy.malachowski@wat.edu.pl

Generowana w procesie hamowania temperatura oraz wartości naprężeń wynikają z sił nacisku oraz imperfekcji geometrycznych współpracujących powierzchni. To powoduje, że materiał okładzin ciernych ulega procesom zużycia, które mają swój początek w mikroobszarach powierzchni styku współpracujących ze sobą dwóch lub więcej ciał. Jednymi z metod pozwalających na ocenę poprawności zastosowanych okładzin są badania eksperymentalne oraz metody numeryczne mechaniki. Dają one możliwość odwzorowania rzeczywistego działania układu z punktu widzenia występujących odkształceń, dystrybucji generowanego ciepła oraz procesu zużycia.

2. PROBLEM ZUŻYCIA MATERIAŁÓW CIERNYCH

Zużycie trybologiczne jest nieodłącznym elementem towarzyszącym zjawisku fizycznemu, jakim jest tarcie. Szybkość oraz intensywność zużywania się materiału zależy od wielu czynników, m.in.: rodzaju procesu zużywania, środowiska, w jakim elementy ze sobą współpracują, odporności materiałów na zużycie itd. Podstawowym i najczęściej spotykanym z procesów zużycia jest zużycie ściernie. Powstaje ono wtedy, gdy w wyniku oddzielania się cząstek materiału o niższej twardości następuje ubytek materiału w skutek rysowania, mikroskrawania lub bruzdowania. Dodatkowo można wyróżnić zużycie adhezyjne występujące w mikroobszarach plastycznego odkształcenia warstwy wierzchniej, a szczególnie w obszarach najwyższych wierzchołków chropowatości. Wówczas powstają lokalne łączenia, które są niszczone w wyniku przemieszczenia się powierzchni metali względem siebie [1].

W pracy [2] autorzy przy pomocy mikroskopowej metody pomiarowej oraz wizualizacji za pomocą promieni POV (Persistence of Vision) uzyskali profil powierzchniowy powierzchni, na której dokładnie widać ślady zużycia, m.in. wierzchołki chropowatości, bruzdy czy wgłębienia (Rys. 1).

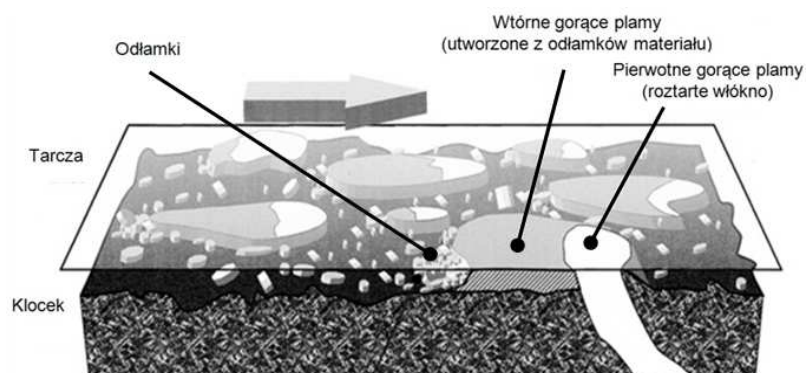


Rys. 1. Profil chropowatości powierzchni uzyskany metodą POV [2]

Oprócz wyżej wymienionych mechanicznych rodzajów zużycia podczas dużych prędkości oraz nacisków w układzie elementów trących generuje się ciepło, które jest przyczyną występowania zjawiska mięknięcia oraz nadtopiania metalu na powierzchniach styku. Skutkuje to wzrostem odkształceń termicznych oraz nacisków jednostkowych. Procesy te powodują odsłanianie czystych powierzchni metalu i ich zbliżenie na odległość sił międzycząsteczkowych. Następstwem tego jest szczepienie i uszkodzenie powierzchni przez wrywanie z niej cząstek i ich rozmazywanie na przeciw-powierzchni. W rezultacie

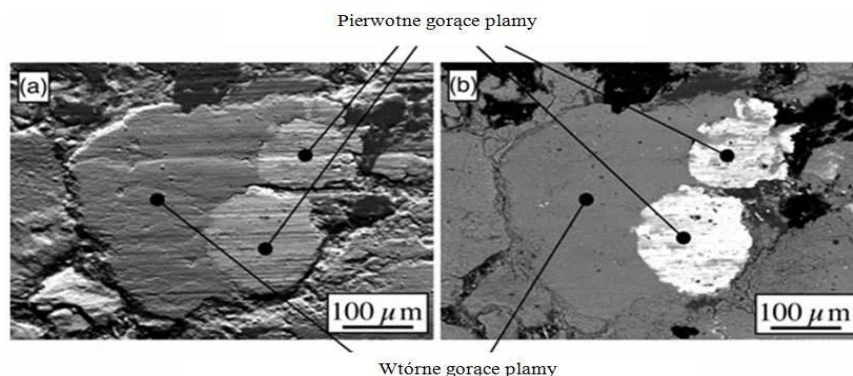
powierzchnia kontaktu zostaje ograniczona do lokalnych obszarów, które potocznie określane są jako "gorące plamy", do których zaliczamy plamy wierzchołkowe, zogniskowane, odkształceniowe, pasmowe, strefowe i mieszane [3]

Gorące plamy składają się z plam pierwotnych oraz wtórnych. Pierwotne plamy tworzą się w wyniku mniejszego zużycia się składowych wchodzących w skład okładzin. Pomiędzy okładziną i tarczą tworzą się labirynty płytkich korytarzy, w których powstałe odłamki materiału przemieszczają się zmniejszając rozmiary by w konsekwencji utworzyć wtórne gorące plamy na wcześniej utworzonym pierwotnych plamach (Rys. 2).



Rys.2. Tworzenie się gorących plam w obszarze kontaktu okładziny ciernej i tarczy [4]

Gorące plamy są widoczne gołym okiem na powierzchniach trących. Przejawiają się one jako odblaskowe plamki na ciemniejszym otoczeniu. W wyniku pomiaru metodą skaningową oraz profilometrem okazało się, że średnica plam mieści się w przedziale $50 \div 500 \mu\text{m}$, a ich wysokość wynosi kilka mikronów (Rys. 3).

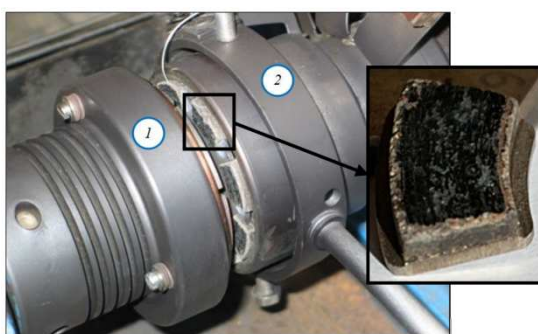


Rys. 3. Gorące plamy okładziny ciernej: a) zwiększony kontrast topograficzny, b) zwiększony kontrast strukturalny [4]

2. BADANIA OKŁADZIN CIERNYCH NA STANOWISKU IL-68

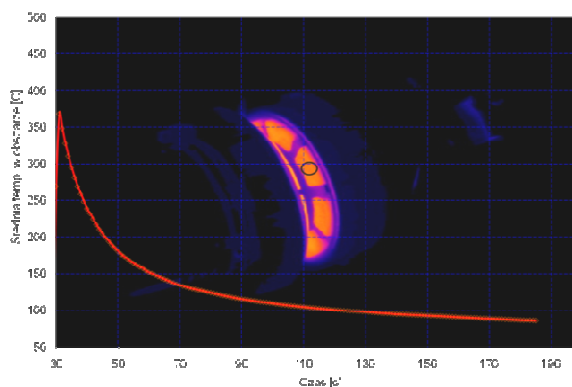
2.1 Eksperymentalne testy materiałów ciernych

Eksperymentalne testy okładzin ciernych przeprowadzone zostały na specjalnie do tego celu stworzonym stanowisku badawczym IL-68 znajdującym się w Instytucie Lotnictwa w Laboratorium Badań Podwozi Lotniczych pod kierownictwem dr inż. R. Kajki. Rysunek 4 przedstawia zespół tarczyowy stanowiska IL-68 składający się z głowicy przesuwnej oraz głowicy obrotowej. W głowicy obrotowej montowane są przeciwpróbki, natomiast badane próbki z okładziną cierną montowane są w głowicy przesuwnej, dociskanej w kierunku przeciwpróbek przy pomocy siłownika hydraulicznego.



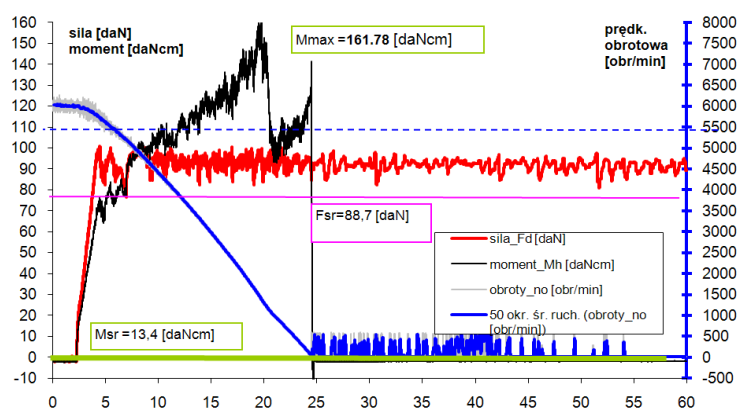
Rys. 4. Zespół tarczyowy: 1) Głowica obrotowa, 2) Głowica przesuwna [5]

W wyniku zastosowania kamery termowizyjnej oraz oprogramowania ThermaCam, możliwy jest pomiar temperatury, jaka powstaje w układzie podczas hamowania. Na Rysunku 5 przedstawiony jest wykres średniej temperatury w funkcji czasu na próbkach okładziny cierniej.



Rys.5. Wykres średniej temperatury próbek okładziny cierniej w funkcji czasu [6]

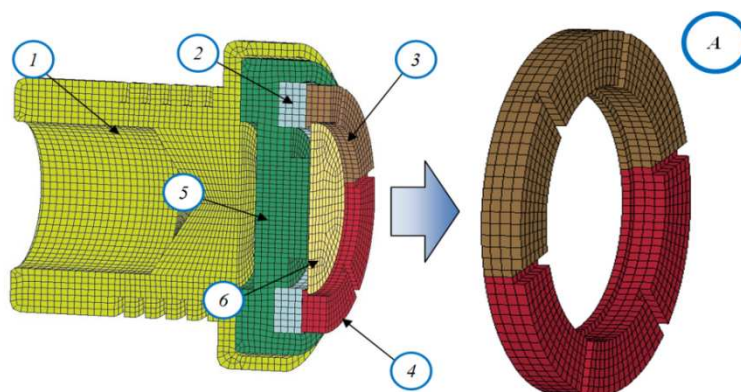
Dodatkowo na stanowisku IL-68 możliwe jest oszacowanie średniej siły oraz momentu działających w układzie podczas dokonywanych pomiarów. Rysunek 6 ukazuje charakterystyki siły, momentu oraz prędkości obrotowej w funkcji czasu.



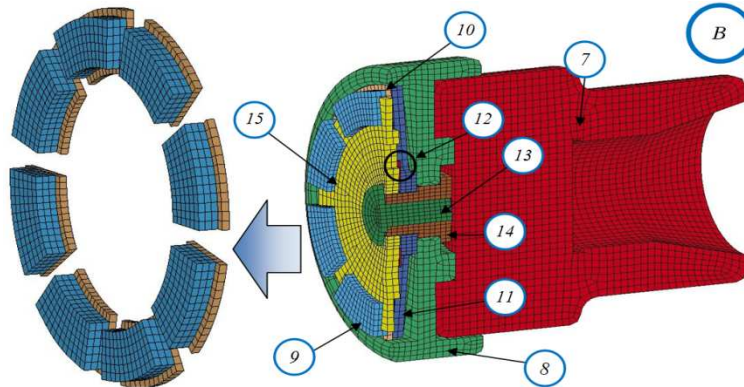
Rys. 6. Wykres siły, momentu oraz prędkości obrotowej w funkcji czasu [6]

2.2. Numeryczne testy okładzin ciernych

W celu utworzenia modelu numerycznego układu skupiono się głównie na zespole tarciovym, w skład którego wchodzi głowica obrotowa oraz głowica dociskowa. Szczegółowy opis modelu opisano w pracy [5]. Na każdy z 15 elementów stanowiska IL-68 nałożona została siatka z elementów heksagonalnych (Rys. 7, Rys. 8).

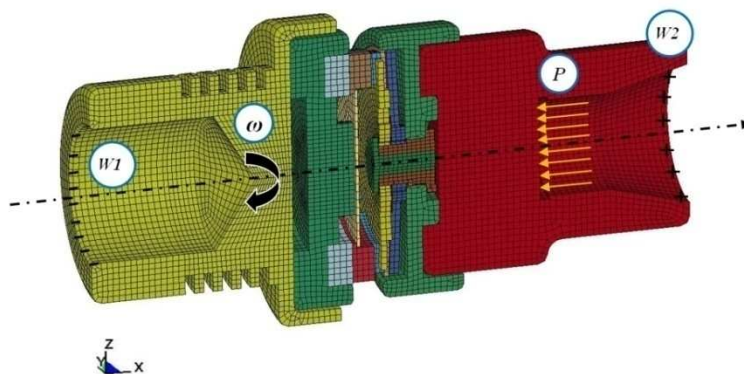


Rys. 7. Model numeryczny głowicy obrotowej oraz wyszczególnione przeciwpróbki:
1) tuleja przeciwpróbek, 2) podkład przeciwpróbek, 3 i 4) przeciwpróbki,
5) oprawa przeciwpróbek, 6) podkładka oprawy, [5]



Rys. 8. Model numeryczny głowicy przesuwnej oraz wyszczególnione próbki okładziny: 8) oprawa próbek okładziny, 9) próbka okładzin, 10) podkład próbki okładzin, 11) rozeta, 12) podkładka, 13,14) wkręty, 15) nakładka zamykająca, [5]

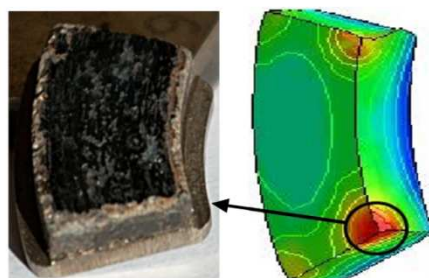
Warunki początkowo-brzegowe zostały zdefiniowane w sposób, który pozwolił kinematycznie wymusić obrót wszystkich elementów części hamowanej oraz uniemożliwić ich przesuw wzdłuż osi obrotu (W1). Wymuszenie obrotu głowicy obrotowej zrealizowane zostało poprzez zdefiniowanie prędkości kątowej $\omega = 628,31$ 1/s, której wektor leży na kierunku osi X. Dodatkowo zwiększono gęstość części obrotowej w celu odzwierciedlenia momentu bezwładności występującego na wale urządzenia. Na część dociskającą natomiast zostały nałożone więzy umożliwiające ruch jedynie wzdłuż osi modelu, zabierające możliwość ruchu w kierunkach Y i Z (W2). W celu odzwierciedlenia docisku realizowanego przez siłownik hydrauliczny, zdefiniowano siłę o wartości oszacowanej w badaniach eksperymentalnych, tj. 850 N. Model wraz z przyjętymi warunkami brzegowymi przedstawiony jest na Rysunku 9.



Rys. 9. Warunki początkowo-brzegowe stanowiska IL-68 [5]

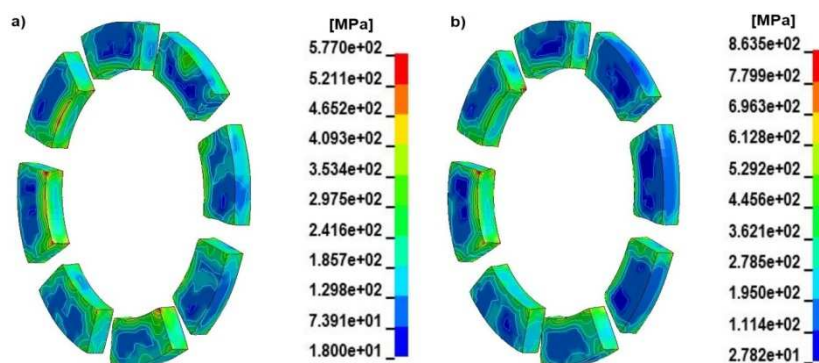
3. WYNIKI WSTĘPNYCH ANALIZ NUMERYCZNYCH

Przeprowadzone analizy numeryczne odzwierciedliły charakter powstałego procesu zużycia w warunkach laboratoryjnych. Z uwagi na wielkość i złożoność modelu MES zaprezentowano wyniki dla wstępnych chwil czasowych (0 do 0,2 s). Na Rysunku 10 przedstawiona jest próbka okładziny czarnej po testach eksperymentalnych oraz model MES próbki po przeprowadzonych symulacjach numerycznych.



Rys. 10. Wyrwania w materiale próbki okładziny oraz wyężenia powstałe na krawędziach próbki w analizach numerycznych [5]

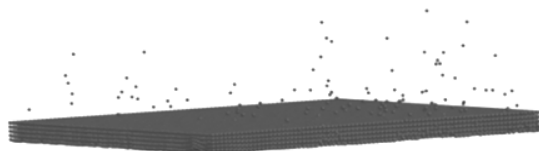
Dodatkowo otrzymano wyniki w postaci rozkładu naprężeń zredukowanych powstałych na powierzchni próbek okładziny (Rys. 11).



Rys. 11. Wartości naprężeń zredukowanych w próbkach wyznaczonych wg Hubera-Mises'a-Hencky'ego dla : a) 0,05 s, b) 0,2 s we wstępnym procesie hamowania [MPa] [5]

Uzyskane wyniki pokazują, iż w pierwszej fazie hamowania dochodzi do powstania zniszczenia w postaci wyrw na krawędzi próbek okładziny co jest związane z koncentracją naprężeń w tych obszarach (0,05 s). Dopiero w późniejszych chwilach czasowych rozpoczyna się pełny proces współpracy pomiędzy próbką, a przeciwpóbką, który doprowadza do równomiernego zużywania się środkowej powierzchni próbki (0.2 s).

Równolegle prowadzone wstępne testy próbek w skali mikroskopowej, m.in. za pomocą metody Smooth Particle Hydrodynamics (SPH) ukazały nierównomierne zużywanie się warstwic okładziny ciernej (Rys. 12) [7].



Rys.12. Odłączanie się cząstek od próbki okładziny ciernej [7]

4. WNIOSKI

Przeprowadzone symulacje procesu hamowania na stanowisku IL-68 ukazały efekt wzrostu temperatury oraz naprężeń na krawędziach próbek, co podczas badań eksperymentalnych skutkowało powstaniem wyrw oraz bruzd w materiale. W rzeczywistych warunkach prowadzi to do ścinania nierówności wierzchołków chropowatości, tworzenia się gorących plam oraz w konsekwencji do zużywania się materiału okładziny ciernej.

Uzyskane wyniki analiz w skali mikroskopowej za pomocą metody SPH potwierdziły, że procesy zachodzące na powierzchni okładzin mają swój początek w mikroobszarach styku. Zastosowana procedura zużycia w połączeniu z modelem makroskopowym pozwoli na przeprowadzenie symulacji numerycznych procesu hamowania z uwzględnieniem imperfekcji materiału okładziny ciernej.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] Baranowski P., Małachowski J., *Badania numeryczne zjawisk termomechanicznych występujących na powierzchni ciernej tarczy hamulcowej*, WAT, Warszawa, 2010.
- [2] Bettge D., Starcevic J., *Topographic properties of the contact zones*, Wear, no. 254, 2003.
- [3] Anderson AE., Knapp RA., *Hot spotting in automotive friction systems*, Wear, no. 135, 1990.
- [4] Eriksson M., Staffan J., *Tribological surfaces of organic brake pads*, Tribology international, no. 33, 2000.
- [5] Baranowski P., Małachowski J., Mazurkiewicz Ł., Kajka R., *Budowa modelu numerycznego stanowiska badawczego okładzin ciernych IL-68*, Górnictwo odkrywkowe, no. 3, 2010.
- [6] Kajka R., Harla R., *Raport 26/LW/2009*, Instytut Lotnictwa, Warszawa, 2009.
- [7] Baranowski P., Damaziak K., Małachowski J., *Analysis of a brake including thermomechanical coupling*, Computer Methods in Mechanics, Warsaw, 2011.