

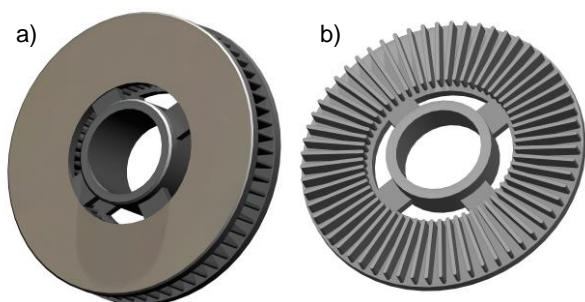
Mateusz JÜNGST, Wojciech SAWCZUK

## PROBLEMATYKA GORĄCYCH OBSZARÓW NA POWIERZCHNI CIERNEJ TARCZ HAMULCOWYCH

*W artykule omówiona została problematyka gorących obszarów na powierzchniach ciernych tarcz hamulcowych. Układy hamulca ciernego, z racji konieczności przejęcia nieraz bardzo dużej energii kinetycznej pojazdu są poddawane dużym obciążeniom termicznym. Przedstawione zostały podstawowe typy gorących obszarów obserwowanych na pierścieniach ciernych tarcz hamulcowych oraz teorie ich powstawania. Następnie omówiony został negatywny wpływ obciążeń termicznych na strukturę tarczy oraz proces hamowania. Opisane zostały wybrane sposoby udoskonalenia rozpraszania ciepła przez tarczę hamulcową. Wskazano dalsze kierunki rozwoju tarcz hamulcowych zwłaszcza w przypadku pojazdów szynowych.*

### WSTĘP

Układy hamulcowe pojazdów mechanicznych, zarówno drogowych jak i szynowych, poddawane są dużym obciążeniom termicznym wskutek przekształcania energii kinetycznej rozpędzonej masy pojazdu w energię cieplną poprzez docisk okładziny do pierścienia ciernego tarczy hamulcowej. Bardziej złożone w tym wypadku jest zachowanie hamulców tarczowych w pojazdach kolejowych, gdzie niejednokrotnie hamulec cierny jest jedynym układem pozwalającym na wytracenie prędkości. Długotrwałe hamowanie podczas jazdy na spadku lub hamowanie awaryjne wymagają, by każda tarcza hamulcowa na pojeździe kolejowym przejęła na siebie energię kilkudziesięciu MJ. Taka ilość energii wskutek ograniczonej przewodności cieplnej doprowadza do poważnego przegrzania pierścienia ciernego tarczy. Gradienty temperatury oraz przemiany fazowe ciała stałe-ciało stałe zachodzące w punktach przegrzań prowadzą do powstania naprężeń rozciągających i ściskających w materiale, a te z kolei w konsekwencji powodują pęknięcia pierścienia ciernego. Są one najczęstszą przyczyną przyspieszonego wyłączenia tarczy z eksploatacji lub dokonania jej regeneracji przez przetoczenie.



**Rys. 1.** Wentylowana tarcza hamulcowa kolejowa 640x110: a) widok ogólny, b) przekrój z widocznymi łopatkami wentylującymi

Dla polepszenia wytracania ciepła przez tarczę hamulcową najczęściej stosuje się wentylację za pośrednictwem łopatek umieszczonych między dwoma pierścieniami ciernymi (Rys. 1). Współczesne prace naukowe wskazują jednak, że taka konstrukcja tarczy, choć relatywnie tania w wykonaniu, nie daje najlepszych wyników w aspekcie oddawania ciepła do otoczenia poprzez opływ – zwłaszcza przy większych obciążeniach chłodzenie jest zbyt mało

wydajne, prowadząc do przegrzań materiału i w dalszej perspektywie do uszkodzeń tarczy.

Poprawa chłodzenia tarcz hamulcowych oraz redukcja negatywnych skutków przegrzań są przedmiotem prac prowadzonych na całym świecie, zarówno przez ośrodki naukowe jak i producentów układów hamulcowych.

### 1. GORĄCE OBSZARY NA POWIERZCHNIACH CIERNYCH TARCZ HAMULCOWYCH

#### 1.1. Klasyfikacja gorących obszarów

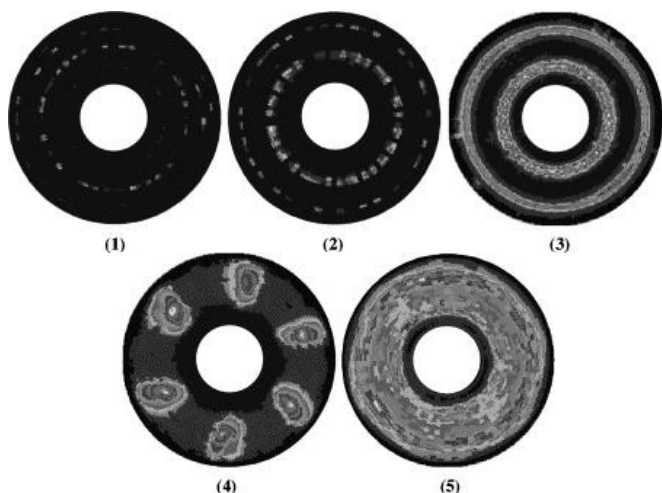
W pracy [1] zaproponowana została klasyfikacja obszarów o podwyższonej temperaturze na powierzchni tarczy hamulcowej (Tab. 1). Wyróżnia się 5 podstawowych typów gorących obszarów na tarczach hamulcowych:

- punktowe hot spoty (chropowatości termiczne) wynikają z odrębnych, małych i nierównych powierzchni styku na powierzchni pierścienia ciernego. Temperatury w tych miejscach gwałtownie rosną, ale efekt ten jest krótkotrwały;
- prążkowe hot spoty (gradienty w gorących pasmach) odpowiadają małym powierzchniom styku pojawiających się wzdłuż pojedynczej ścieżki tarcia;
- gorące pasma pojawiają się jako zmniejszone obszary kontaktu między tarczą i okładziną. Na obrazach termograficznych widoczne są jako wąskie pierścienie o podwyższonej temperaturze, które w trakcie hamowania mogą się przesunąć wzdłuż promienia tarczy w zależności od zmian powierzchni styku tarczy i okładziny;
- makroskopowe hot-spoty to duże gradienty termiczne równomiernie rozłożone na powierzchni tarczy. Ich pozycja jest stała i swoim rozmieszczeniem ukazują wzorec wybożenia pierścienia ciernego wskutek rozszerzalności termicznej. Zjawisko to znacznie zmniejsza powierzchnię styku okładziny i tarczy, lokalnie podnosząc temperaturę do znacznych wartości;
- lokalne hot-spoty to powierzchnie o niskim gradientzie temperatury na całej powierzchni cierniej tarczy, wynikające z niejednorodnego chłodzenia. Takie rozkłady temperatur pojawiają się zwykle pod koniec procesu hamowania.

Obrazy termograficzne sklasyfikowanych obszarów przedstawiono na rysunku 2.

**Tab. 1. Klasyfikacja gorących obszarów [1]**

Typ	Nazwa	Szerokość [mm]	Temperatura [°C]	Czas trwania
1	Punktowe hot spoty	< 1	1200 (szczytowa)	< 1 ms
2	Prążkowe hot spoty	5 – 20	650 – 1000	0,5 – 10 s
3	Gorące pasma	5 – 50	800	> 10 s
4	Makroskopowe hot spoty	40 – 110	1100 (szczytowa)	> 10 s
5	Lokalne hot spoty	80 – 220	20 – 300	> 10 s



**Rys. 2. Obrazy termograficzne gorących obszarów sklasyfikowanych w tabeli 1; (1) punktowe hot spoty, (2) prążkowe hot spoty, (3) gorące pasma, (4) makroskopowe hot spoty, (5) lokalne hot spoty [1]**

### 1.2. Proces powstawania gradientów termicznych na powierzchni ciernej

Pojawienie się gradientów w gorących pasmach jest związane z lokalnymi, cierne wzbudzonymi niestabilnościami termoelastycznymi (TEI – thermoelastic instabilities). Zjawisko jest oparte na zmienności tarcia kontaktowego, nagrzewaniu się powierzchni wskutek tarcia, przewodzeniu ciepła z powierzchni styku i stopniu zużycia. Wg teorii TEI, gorące obszary pojawiają się powyżej krytycznej prędkości ślizgu, która zależy od właściwości termicznych materiału. Lokalne deformacje materiału powodują zmniejszenie powierzchni styku okładziny i tarczy, co prowadzi do pojawienia się gorących pasm w formie stosunkowo wąskich pierścieni. Dalsze rozgrzewanie materiału prowadzi do wyboczenia pierścienia ciernego, co skutkuje pojawieniem się makroskopowych hot-spotów o bardzo dużych gradientach termicznych, mających destrukcyjny wpływ na strukturę pierścienia ciernego. Pod koniec hamowania dyfuzja ciepła powoduje zmniejszenie lokalnych gradientów temperatury, dzięki czemu naprężenia w tarczy maleją.

Obserwacje eksperymentalne przeprowadzone w różnych opracowaniach [1,2,3,4] pozwoliły na sformułowanie dwóch podstawowych teorii generowania hot-spotów w warunkach hamowania z dużej prędkości pod dużym obciążeniem.

### Klasyczny proces formowania gorących obszarów

W klasycznym procesie na początku hamowania jako pierwsze pojawiają się gorące pasma na powierzchni tarczy, stosunkowo jednorodne na obwodzie pierścienia i z możliwością przesuwania się wzdłuż promienia tarczy. Następnie pojawiają się na nich małe gradienty termiczne. Ich liniowy rozkład jest bardzo regularny i stały na tarczy. Wraz z dalszym nagrzewaniem tarczy, na powierzchni pojawiają się przegrzania makroskopowe, również rozmieszczone

regularnie. Ich pozycja nie zmienia się między kolejnymi hamowaniami tej samej pary ciernej – pojawienie się plastycznej deformacji w danym miejscu spowoduje pojawienie się przegrzania w tym samym miejscu w każdym kolejnym hamowaniu.

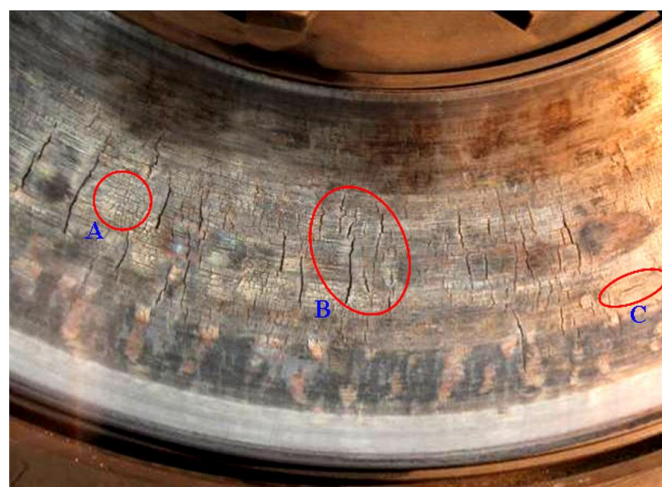
### Alternatywny proces formowania gorących obszarów

W pracy [1] wskazano, że w pewnych warunkach proces formowania gorących obszarów może być odmienny. Obserwowane jest równoczesne wystąpienie gradientów w pasmach oraz gorących pasm na różnych długościach promienia, pomiędzy którymi wraz z przejmowaniem coraz większej energii pojawiają się przegrzania makroskopowe. W odróżnieniu od scenariusza klasycznego, makroskopowe hot spoty w procesie alternatywnym pojawiają się w kolejnych hamowaniach w różnych pozycjach.

### 1.3. Wpływ występowania gorących obszarów na stan tarczy hamulcowej

Duże gradienty termiczne w pierścieniu ciernym niosą za sobą poważne negatywne skutki. Zmiany objętości materiału wskutek jego rozszerzalności termicznej w obszarach przegrzań prowadzą do powstania naprężeń ściskających podczas nagrzewania oraz rozciągających w trakcie chłodzenia. Wielokrotne powtarzanie tego cyklu prowadzi do stopniowego wzrostu dodatnich naprężeń aż do osiągnięcia granicy wytrzymałości na rozciąganie materiału tarczy, przez co pojawiają się pęknięcia, rozrastające się wraz z każdym kolejnym hamowaniem.

W pracy [5] wyróżniono 3 podstawowe pęknięcia pochodzące od naprężeń termicznych oraz mechanicznych w pierścieniu ciernym: mikropęknięcia, pęknięcia promieniowe i pęknięcia obwodowe (rys. 3).



**Rys. 3. Pęknięcia na powierzchni ciernej tarczy; A – mikropęknięcia, B – pęknięcia promieniowe, C – pęknięcia obwodowe (wzdłużne) [5]**

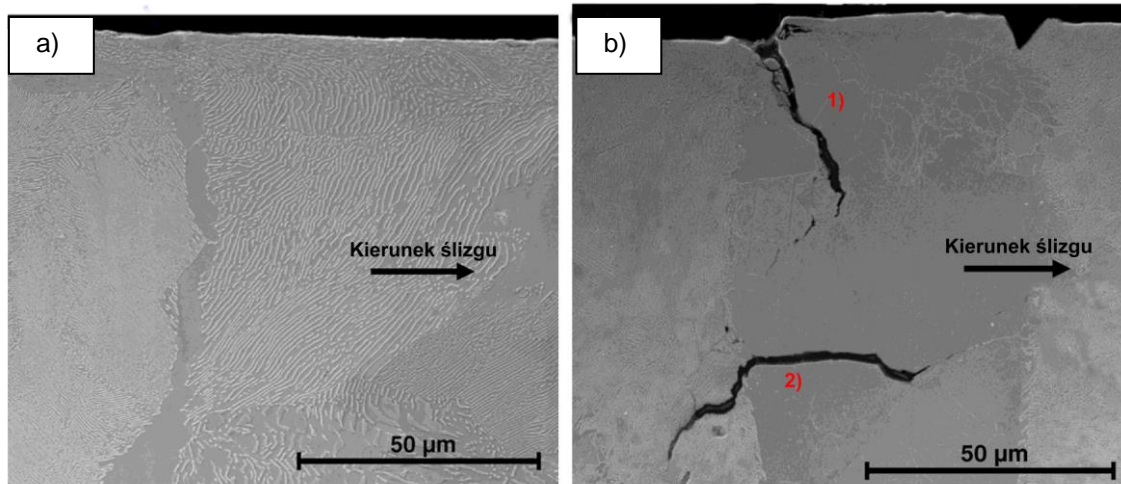
Pęknięcia promieniowe mają swój początek zwykle wewnątrz oraz na obrzeżach zarejestrowanych przegrzań makroskopowych. Ewoluuje one w kształcie eliptycznym, pojedynczo lub poprzez łączenie się kolejnych pęknięć rozmieszczonych wzdłuż tego samego promienia.

Ponadto, jak wskazano w pracy [6] wskutek przemian fazowych ciało stałe-ciało stałe oraz obciążenia mechanicznego może dojść także do pęknięcia równoległego do powierzchni ciernej w głębi materiału, a to z kolei w skrajnych przypadkach może doprowadzić do wykruszeń. W opracowaniu tym potwierdzono także, że obszary na których nie dochodziło do przegrzań wolne są od uszkodzeń mechanicznych: powierzchnia cierna jest równa i nie występują pęknięcia (Rys. 4).

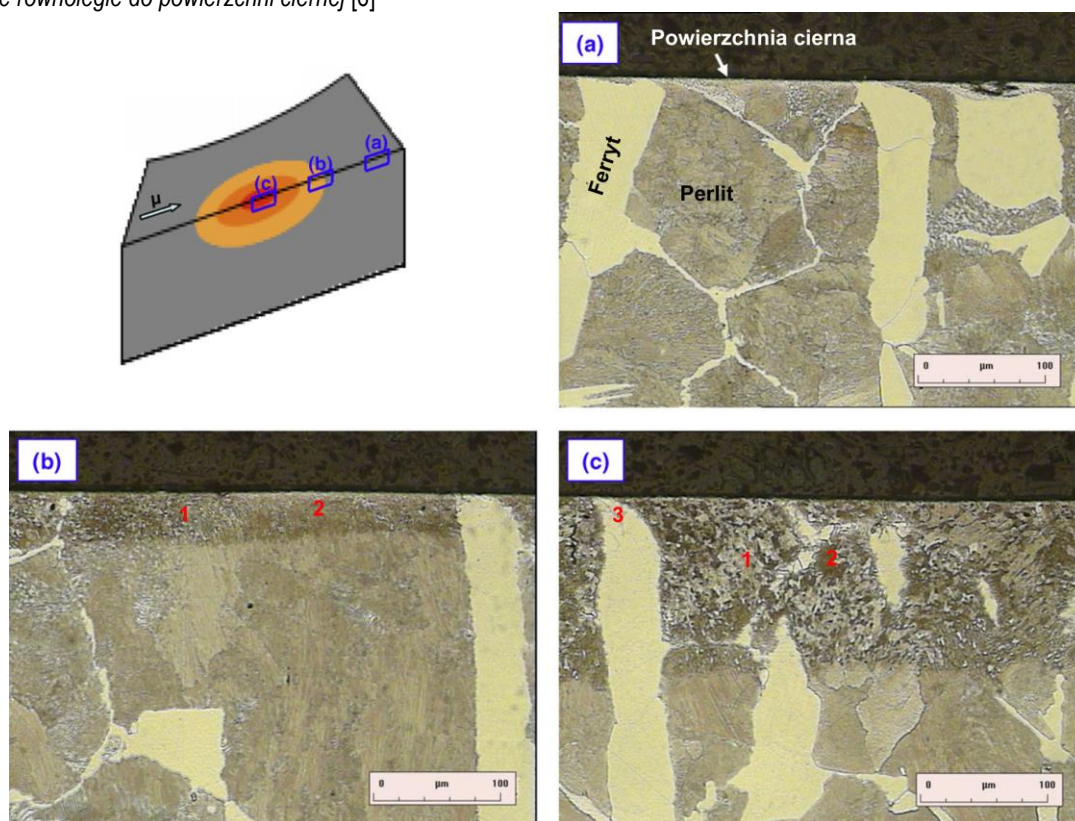
Obserwacje przemian fazowych w strukturze materiału wskazały, że lokalne przegrzania powodują zmiany w strukturze do głębokości 120  $\mu\text{m}$ . [6] Stal C-48 z jakiej wykonana była użyta w badaniach tarcza charakteryzuje się występowaniem wyłącznie dwóch składowych faz:  $\alpha$ -ferytu zawierającej poniżej 0,02% węgla oraz eutektycznego perlitu o zawartości około 8% węgla. Te dwie fazy wskutek przegrzania ulegają transformacji w  $\gamma$ -austenit. Rozkład wytrąceń austenitu zależy od badanego przekroju ze względu na różne temperatury austenizacji pierwotnych faz, wynoszących odpowiednio 890 i 720°C. Następnie wskutek chłodzenia zaustenitizowane obszary przechodzą odwrotną przemianę: feryt pojawia się w formie drobniejszego ziarna, zaś perlit przyjmuje formę mieszaniny bainitu i drobnego perlitu (Rys. 5).

## 1.4. Wpływ występowania gorących obszarów na proces hamowania

W opracowaniu [6] wskazano, że w początkowej fazie hamowania występuje duża amplituda zmienności chwilowego współczynnika tarcia (wyliczonego ze stosunku siły stycznej do normalnej), wynikająca z lokalnych niestabilności styku okładziny z tarczą związanych z pojawieniem się gradientów w gorących pasmach (Rys. 6). Podczas całego hamowania powstałe termicznie nierówności powierzchni ciernej powodują zmiany zarówno sił normalnych jak i stycznych w strefie styku. Dla zobrazowania, na rysunku 7 przedstawiono przebiegi temperatury oraz siły stycznej w funkcji czasu po 11 i 30 sekundach od momentu rozpoczęcia hamowania.

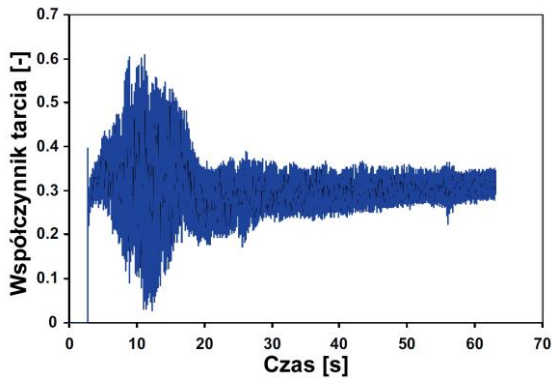


**Rys. 4.** Obrazy przekrojów pierścienia ciernej tarczy hamulcowej uzyskane elektronowym mikroskopem skaningowym: a) przekrój przez obszar wolny od przegrzań, b) przekrój przez obszar pod makroskopowym hot-spotem: 1) - pęknięcie prostopadłe do powierzchni ciernej, 2) - pęknięcie równoległe do powierzchni ciernej [6]



**Rys. 5.** Obrazy struktury uzyskane mikroskopem optycznym w kolejnych punktach: a) przekrój poza obszarem przegrzania, b) przekrój na obrzeżu obszaru przegrzania, c) przekrój bezpośrednio w obszarze przegrzania; 1 – bainit, 2 – drobnodziarnisty perlit, 3 – drobnodziarnisty feryt

Warto zaznaczyć, że choć chwilowy współczynnik tarcia wykazuje wyraźną zmienność, to po początkowej fazie jego średnia wartość stabilizuje się na poziomie ok. 0,35 [6].



**Rys. 6.** Zmienność chwilowego współczynnika tarcia podczas hamowania do zatrzymania [6]

Nierówności pierścienia ciernego wywołane pojawieniem się gorących obszarów (zwłaszcza makroskopowych hot spotów) w pojazdach drogowych mogą prowadzić do pojawienia się drgań przenoszonych na nadwozie pojazdu (tzw. hot judder) [7].

Kolejnym zjawiskiem powiązaniem z gorącymi obszarami na tarczach hamulcowych jest zjawisko fadingu, czyli stopniowego zaniku siły hamowania wskutek przegrzania pary cierniej. Długotrwałe lub wielokrotne intensywne hamowanie może doprowadzić do znacznego nagrzania okładzin hamulcowych, których materiał zaczyna wydzielać z siebie gazy z substancji wiążących, tworząc tym samym poduszkę gazową znacznie obniżając współczynnik tarcia [8].

Wpływ zjawisk termicznych na powierzchniach tarcz hamulcowych na skuteczność hamowania nie został jednak jeszcze dobrze poznany i wymaga dalszych prac.

## 2. WYBRANE ROZWIĄZANIA KONSTRUKCYJNE TARCZ HAMULCOWYCH PRZECIWDZIAŁAJĄCE POWSTAWANIU GORĄCYCH OBSZARÓW

### 2.1. Wprowadzenie

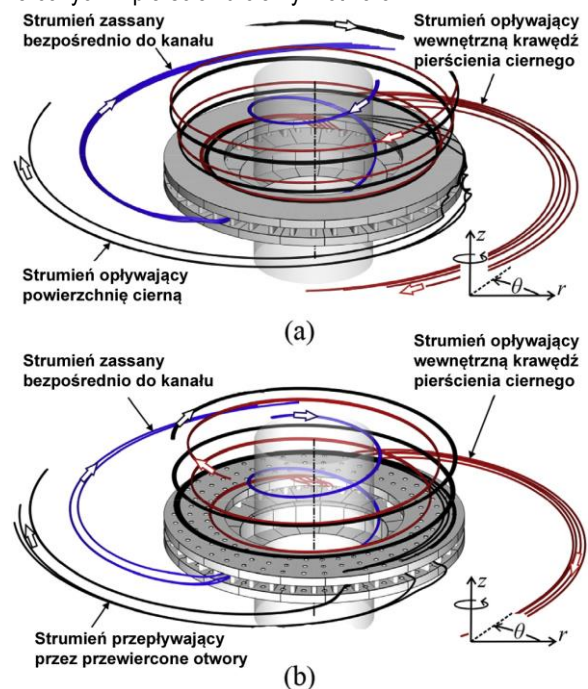
Podstawowym problemem prowadzącym do powstawania gorących obszarów na pierścieniach ciernych tarcz hamulcowych jest ograniczona wydajność chłodzenia tarczy wentylowanej o standar-

dowej konstrukcji. Stąd pojawiło się dotychczas kilka rozwiązań pozwalających na poprawę wymiany ciepła wewnątrz tarczy oraz jego oddawanie do opływającego powietrza.

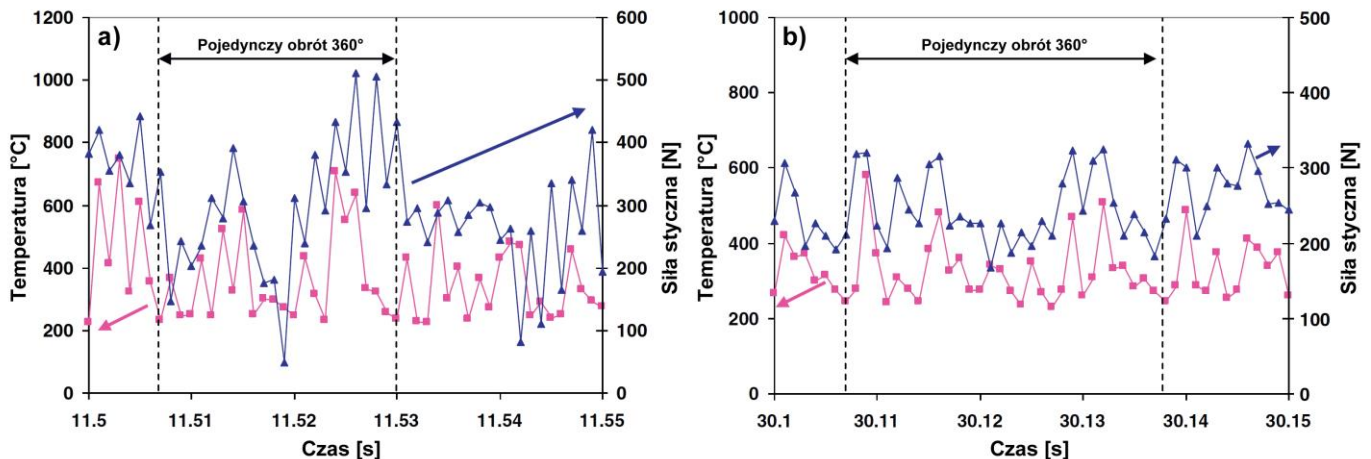
### 2.2. Nawiercane pierścienie cierne

Głównym założeniem nawiercen pierścienia ciernego jest poprawa chłodzenia tarczy poprzez polepszenie przekazywania ciepła. Uzyskuje się to modyfikując schemat opływu strumieni powietrza pomiędzy łopatkami wentylującymi.

W przypadku standardowej tarczy hamulcowej, zewnętrzny strumień powietrza opływający obracającą się tarczę ociera się o powierzchnię trące aż do zewnętrznej krawędzi tarczy, jak podkreślono czarnymi liniami na rysunku 8 a). Dla tarcz przewiercanych powietrze opływające powierzchnię cierną ostatecznie wchodzi do kanałów wentylujących przez otwory, jak zaznaczono czarnymi liniami na rysunku 8 b). Ponadto ciśnienie statyczne w kanale wentylującym jest zwykle niższe niż to na powierzchni cierniej. Taka osiowa różnica ciśnień doprowadza do przekierowania powietrza do wywierconych w pierścieniu ciernym otworów.



**Rys. 8.** Trójwymiarowe linie opływu przedstawiające ogólne schematy opływu powietrza dla: a) standardowej, b) wierconej tarczy hamulcowej [9]

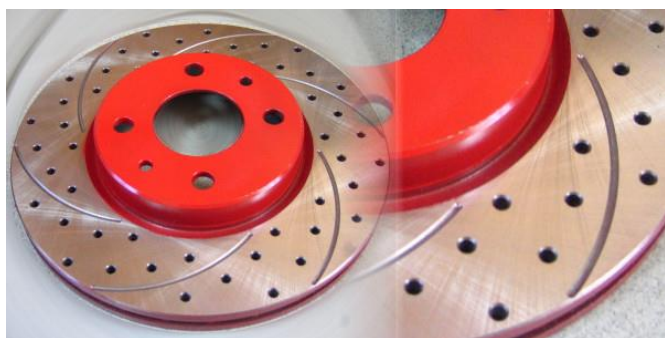


**Rys. 7.** Zmienności temperatury powierzchni oraz siły stycznej: a) podczas dużej zmienności chwilowego współczynnika tarcia po 11 sekundach od rozpoczęcia hamowania (czas uformowania się pierwszych gorących obszarów), b) po stabilizacji średniego współczynnika tarcia po 30 sekundach od rozpoczęcia hamowania [6]

Otwory w pierścieniach ciernych powodują także, że powietrze wpływające przez nie do kanałów wentylujących ogranicza przepływ nawskrośny przez kanał (od wnętrza na zewnątrz tarczy) oraz recyrkulację powietrza wewnątrz kanału, zwiększając przepływ masy wokół łopatek wentylujących tym samym poprawiając wydajność chłodzenia.

W badaniach przeprowadzonych w [9] wykazano, że wprowadzenie otworów w pierścieniach ciernych w zakresie typowych prędkości użytkowych samochodów osobowych tarcze wiercone charakteryzują się 22-27% wyższą liczbą Nusselta (stosunkiem szybkości wymiany ciepła w wyniku konwekcji do szybkości wymiany ciepła w wyniku przewodnictwa cieplnego).

Tarcze wiercone obecnie są dość powszechnie stosowane w samochodach osobowych, zwłaszcza sportowych oraz wyczynowych. Różni producenci stosują różne układy nacięć i przewierceń pierścieni ciernych, mających za zadanie przeciwdziałanie powstawaniu warstwy trzeciej w postaci nalepu jako mieszaniny produktów zużycia tarczy i okładzin oraz polepszanie wydajności chłodzenia. Tarcze takiej konstrukcji nie są jednak póki co stosowane na szerszą skalę w cięższych pojazdach drogowych ani w pojazdach kolejowych.



**Rys. 9.** Tarcza hamulcowa wentylowana, nacinana i nawiercana z serii GT polskiego producenta ATM MIKODA [10]

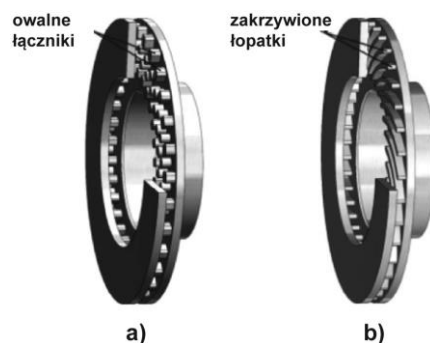
### 2.3. Alternatywne rozwiązania kanałów wentylujących

#### Wentylacja poprzez owalne łączniki

Tarcza hamulcowa takiej konstrukcji charakteryzuje się zastosowaniem owalnych łączników pomiędzy pierścieniami ciernymi. Jej największą zaletą jest bardziej równomierny rozkład temperatury w pierścieniu ciernym, lecz wydajność chłodzenia względem tarczy z łopatkami wentylującymi wskutek mniejszej zdolności pompującej czego? jest niższa. Z tego względu nie nadają się do zastosowań wymagających częstego hamowania z wysoką mocą, lecz są w użytku tam, gdzie warunki pracy mogłyby doprowadzić do zniszczenia tarczy hamulcowej przez pęknięcia termiczne, jak np. w pojazdach ciężarowych pracujących w trudnych warunkach atmosferycznych [11] (Rys. 10 a).

#### Wentylacja poprzez zagięte łopatki

Zagięte łopatki zostały wprowadzone dla zwiększenia przepływu masowego przez kanał wentylujący. Łopatki zagięte są tak, by zminimalizowane zostało zjawisko tłumienia przepływu przez rozproszenie strumienia, a tym samym poprawiona została wydajność chłodzenia. Zastosowanie tarcz takiej konstrukcji jest mocno ograniczone ze względu na kierunkowość pracy tarczy, wobec czego istnieje niewiele opracowań naukowych na ich temat [11] (Rys. 10 b).



**Rys. 10.** Alternatywne rozwiązania wentylacji tarczy: a) owalne łączniki, b) zakrzywione łopatki [11]

#### Wentylacja poprzez strukturę kolumnową

Producenci tarcz hamulcowych stosują różne rozwiązania alternatywnych struktur kolumnowych łączących pierścienie cieme, których założeniem jest polepszenie przepływu masowego z jednoczesnym zwiększeniem powierzchni opływanej strumieniem powietrza. Kolumny mają złożony kształt, zapewniający odpowiednie kierowanie strumieniami powietrza poprzez kanały, poprawiając tym samym wymianę ciepła.

Dobrym przykładem są rozwiązania producenta Brembo, rozwijane od lat 80. XX wieku. Od tego czasu opracowano kilka schematów kanałów wentylacyjnych (Rys. 11). Stosowane są w specjalistycznych pojazdach ciężarowych oraz niektórych ciężkich samochodach osobowych wyższej klasy.



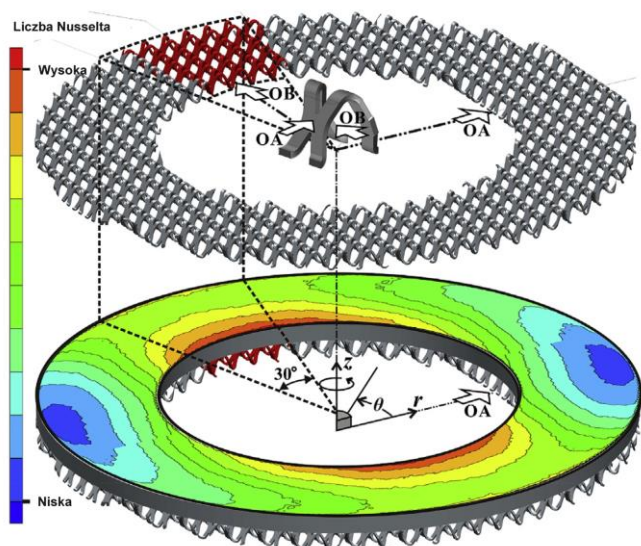
**Rys. 11.** Tarcze hamulcowe Brembo ze strukturami kolumnowymi: a) PVT, b) T Pillar. c) PVT Plus [12]

#### Wentylacja poprzez siatkę typu X

Odmiernym rozwiązaniem poprawiającym wentylację tarczy hamulcowej i tym samym polepszającym jej chłodzenie jest zastosowanie pomiędzy pierścieniami ciernymi strukturalnej siatki typu X, zaprezentowanej w opracowaniu [11] i następnie udoskonalonej w pracy [13] (Rys. 12).

Rezultaty doświadczeń zawartych w [13] wskazują, że zastosowanie takiej struktury pozwalają na jednorodne obniżenie temperatury powierzchni cierniej. W standardowym zakresie prędkości użytkowych samochodu osobowego (25-124 km/h) tarcza o takiej konstrukcji wykazuje 18-21% wyższą liczbę Nusselta niż tarcza ze standardowymi łopatkami wentylującymi. Struktura siatki typu X zapewnia doskonały wpływ elementów odprowadzających ciepło z pierścieni ciernych.

Rozwiązanie jednak pozostaje wciąż w fazie badań i eksperymentów.



Rys. 12. Model symulacyjny tarczy hamulcowej ze strukturą chłodzącą typu X wraz z reprezentacją efektywnej liczby Nusselta na powierzchni cierniej [13]

## PODSUMOWANIE

Gojące obszary na tarczach hamulcowych stanowią poważny problem eksploatacyjny dla współczesnych pojazdów, zarówno drogowych, jak i szynowych. Liczne opracowania na całym świecie koncentrują się na badaniach skutków wystąpienia przegrzań, zwłaszcza w aspekcie pęknięć tarcz hamulcowych. Mniej opracowań traktuje natomiast o wpływie zaistnienia przegrzań i wynikających z nich deformacji pierścienia ciernego na skuteczność procesu hamowania.

W celu ograniczenia występowania przegrzań tarcz hamulcowych, na całym świecie prowadzone są prace nad udoskonaleniem chłodzenia tarcz poprzez modyfikację opływu powietrza: w ostatnich latach wykonano szereg badań oraz symulacji związanych z zastosowaniem alternatywnych układów kanałów wentylacyjnych lub otworów w powierzchniach ciernych, których część dała całkowicie nowe projekty obecnie wprowadzane do użytku w wyspecjalizowanych pojazdach drogowych.

Wartym nadmienienia jest jednak fakt, że większość opracowań dotyczy hamulców pojazdów samochodowych, u których charakterystyka pracy jest zupełnie odmienna niż w przypadku pojazdów szynowych. Daje to szerokie perspektywy do przeprowadzenia dalszych prac ukierunkowanych na poprawę niezawodności układów hamulcowych w pojazdach szynowych, które poddawane są znacznie większym obciążeniom niż hamulce w pojazdach samochodowych, a wciąż poza pojedynczymi przypadkami powszechnie używane są tutaj tarcze standardowej budowy z prostymi łopatkami wentylującymi.

## BIBLIOGRAFIA

1. Panier S., Dufrénoy P., Weichert D., *An experimental investigation of hot spots in railway disc brakes*. "Wear" 256 (2004) s. 764-773.
2. Kasem H., Brunel J.F., Dufrénoy P., Siroux M., Desmet B., *Thermal levels and subsurface damage induced by the occurrence of hot spots during high-energy braking*. "Wear" 270 (2011), s. 355-364.

3. Zhiqiang Li, Jianmin Han, Zhiyong Yang, Weijing Li, *Analyzing the mechanisms of thermal fatigue and phase change of steel used in brake disc*. "Engineering Failure Analysis" 57 (2015), s. 202-218
4. Grześ P., Oliferuk W., Adamowicz A., Kochanowski K., Wasilewski P., Jewtuszenko O., *The numerical-experimental scheme for the analysis of temperature field in a pad-disc braking system of a railway vehicle at single braking*. "International Communications in Heat and Mass Transfer" 75 (2016) s. 1-6.
5. Wu S.C., Zhang S.Q., Xu Z.W., *Thermal crack growth-based fatigue life prediction due to braking for a high-speed railway brake disc*. "International Journal of Fatigue" 87 (2016), s. 359-369.
6. Kasem H., Brunel J.F., Dufrenoy P., Siroux M., Desmet B., *Thermal levels and subsurface damage induced by the occurrence of hot spots during high-energy braking*. "Wear" 270 (2011), s. 355-364.
7. Day A.J., *Braking of Road Vehicles*. Elsevier 2014.
8. Neis P.D., Ferreira N.F., Lorini F.J., *Contribution to perform high temperature tests (fading) on a laboratory-scale tribometer*. "Wear" 271 (2011), s. 2660-2664.
9. Yan H.B., Feng S.S., Yang X.H., Lu T.J., *Role of cross-drilled holes in enhanced cooling of ventilated brake discs*. "Applied Thermal Engineering" 91 (2015), s. 318-333.
10. Strona internetowa: <http://www.henkiel.com.pl/1336.Tarcza-hamulcowa-MIKODA-GT-malowana-nacinana-wiercona-kolor-czerwony-0223----tyl-> [dostęp: 23.03.2017]
11. Yan H.B., Zhang Q.C., Lu T.J., *An X-type lattice cored ventilated brake disc with enhanced cooling performance*. "International Journal of Heat and Mass Transfer" 80 (2015), s. 458-468.
12. Strona internetowa: <http://www.brembo.com/en/company/news/new-ventilation> [dostęp: 23.03.2017]
13. Yan H.B., Zhang Q.C., Lu T.J., *Heat transfer enhancement by X-type lattice in ventilated brake disc*. "International Journal of Thermal Sciences" 107 (2016), s. 39-55.

### Issues of hot spots on rubbing surface of brake discs

*Paper discussed the problem of hot areas on rubbing surfaces of brake discs. Friction brake systems, due to the necessity of taking over and dissipating sometimes very high kinetic energy in the form of heat, are exposed to heavy thermal loads. Typical hot spots observed on rubbing surfaces has been classified and scenarios of their formation were presented. Subsequently, the negative impact of thermal load on the brake disc and braking process were discussed. Selected ways of heat dissipation in the brake disc were described. Further directions of brake discs development were indicated, especially for rail vehicles.*

Autorzy:

mgr inż. **Mateusz Jüngst** – Politechnika Poznańska, Wydział Maszyn Roboczych i Transportu, Instytut Silników Spalinowych i Transportu, Zakład Pojazdów Szynowych; tel. (61) 665 2023, e-mail: [mateusz.m.jungst@doctorate.put.poznan.pl](mailto:mateusz.m.jungst@doctorate.put.poznan.pl),

dr inż. **Wojciech Sawczuk** – Politechnika Poznańska, Wydział Maszyn Roboczych i Transportu, Instytut Silników Spalinowych i Transportu, Zakład Pojazdów Szynowych; tel. (61) 224 4510, e-mail: [wojciech.sawczuk@put.poznan.pl](mailto:wojciech.sawczuk@put.poznan.pl)