

Article citation info:

Sawczuk W, Jungst M. Numerical analyzes and a comparative study of an automotive standard brake disc with a disc drilled along the Archimedes spiral. The Archives of Automotive Engineering – Archiwum Motoryzacji. 2018; 79(1): 79-94, <http://dx.doi.org/1014669/AM.VOL79.ART6>

Analizy numeryczne oraz badanie porównawcze samochodowej standardowej tarczy hamulcowej z tarczą nawiercaną po spirali Archimedesesa

**WOJCIECH SAWCZUK¹
MATEUSZ JÜNGST²**

Politechnika Poznańska

Streszczenie

W artykule przedstawiono koncepcję nowej powierzchni ciernej tarczy hamulcowej z otworami wykonanymi wzdłuż spirali Archimedesesa. W technice hamulcowej spotyka się tarcze hamulcowe z perforowaną w różny sposób powierzchnią cierną. Może być to perforacją na powierzchni ciernej za pomocą otworów, nacięć, nawierceń oraz ich kombinacji. Mimo wielu zalet takich tarcz, modyfikacja powierzchni ciernej wpływa na wzrost zużycia materiału ciernego. W nowo projektowanej tarczy założono tylko jedno nacięcie wykonane na promieniu tarczy, które zostało zamienione na ciąg otworów ułożonych w linii spirali Archimedesesa rozpoczynającej się przy promieniu wewnętrznym tarczy i kończącym się na promieniu zewnętrznym tarczy tworząc tylko jeden zwój. Dla tak opracowanej koncepcji powierzchni ciernej przeprowadzono symulacje numeryczne odniesione do tarczy gładkiej bez perforacji w zakresie wyznaczenia charakterystyki przyrostu temperatury w funkcji czasu hamowania, rozkładu naprężeń zredukowanych oraz odkształceń tarczy. Następnie po wykonaniu prototypowej tarczy z nawierceniami po spirali Archimedesesa oraz dla tarczy bez perforacji przeprowadzono porównawcze badania stanowiskowe. Na tej podstawie określono typ hamowań przy których tarcza wiercona charakteryzowała się lepszymi charakterystykami ciernotermicznymi względem tarczy gładkiej bez perforacji.

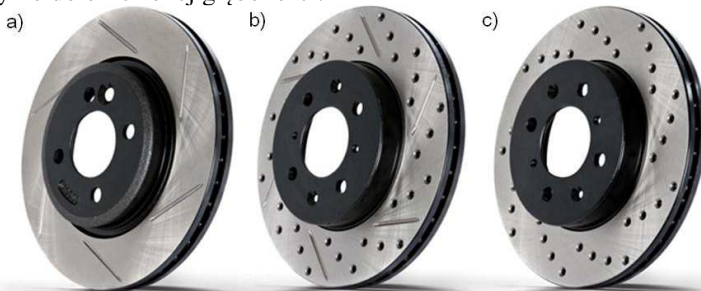
Słowa kluczowe: tarcza hamulcowa, spirala Archimedesesa, symulacje numeryczne, badania stanowiskowe

¹ Politechnika Poznańska, Wydział Maszyn Roboczych i Transportu, Instytut Silników Spalinowych i Transportu, ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań, e-mail: wojciech.sawczuk@put.poznan.pl

² Politechnika Poznańska, Wydział Maszyn Roboczych i Transportu, Instytut Silników Spalinowych i Transportu, ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań, e-mail: mateusz.m.jungst@doctorate.put.poznan.pl

1. Wstęp

Analizując dostępną literaturę z zakresu tarczowych układów hamulcowych obserwuje się ogólne informacje dotyczące poprawy kontaktu (współpracy) okładzin ciernych z tarczą hamulcową. Jednym ze sposobów poprawy charakterystyk cierno-termicznych jest stosowanie tarcz nawiercanych i nacinanych przy standardowych okładzinach ciernych. Według opracowań zawartych w [8, 9] tarcze nacinane w pojazdach samochodowych (rys. 1a)) wpływają na skuteczne usuwanie pyłu okładzinowego z pary cierniej hamulca, przez co w kolejnych hamowaniach uzyskuje się odnowioną powierzchnię okładzin (klocków) hamulcowych. Tarcze wiercone najlepiej wpływają na zarówno oczyszczanie okładzin ciernych z produktów zużycia jak również z odgazowania klocków po ich wyżarzaniu na etapie produkcji (zjawisko fadingu) oraz wody (zjawisko akwaplaningu) [17]. Również ograniczają zjawisko lokalnych wzrostów temperatury typu hot spots [4]. Jednak otwory po wierceniu przez całą grubość pierścienia ciernego zmniejszają pojemność cieplną tarczy, co przy częstych hamowaniach i przy realizacji dużych mocy hamowania może wpływać na ich odkształcenia [13, 16]. Ponadto otwory w dłuższej eksploatacji tarcz hamulcowych przyczyniają się do powstawania pęknięć termicznych (mikropęknięć) [1, 14] oraz istotnie zwiększają zużycie okładzin ciernych. Stąd kompromisem są tarcze nacinane i nawiercane, w których otwory (w przypadku tylko tarcz nawiercanych) są tylko do określonej głębokości.



Rys. 1: Tarcze hamulcowe wentylowane pojazdów samochodowych: a) nacinane, b) nacinane i nawiercane, c) nawiercane [7, 8]

Drugim sposobem poprawy charakterystyk cierno-termicznych jest stosowanie konstrukcji tarcz hamulcowych z innych materiałów niż żeliwa jak np. tarcze stalowe, spiekane czy z włókien węglowych. Również stosowanie tarcz pływających pozwala na realizację dużych obciążeniach cieplnych nie powodujących przyrostu naprężeń prowadzących do odkształceń tarczy [15, 16]. Innym sposobem na podniesienie sprawności układu hamulcowego jest stosowanie zacisków dwu i czterotłokowych pływających lub nieruchomych. Jednak wspomniane rozwiązania są bardzo rzadko stosowane w pojazdach użytkowych, tylko sportowe przeznaczenie samochodów sprawia, że ich użytkownicy przerabiają układy hamulcowe dla realizacji większych mocy hamowania i lepszego rozpraszania zgromadzonej energii cieplnej do otoczenia.

2. Koncepcja nowej tarczy hamulcowej

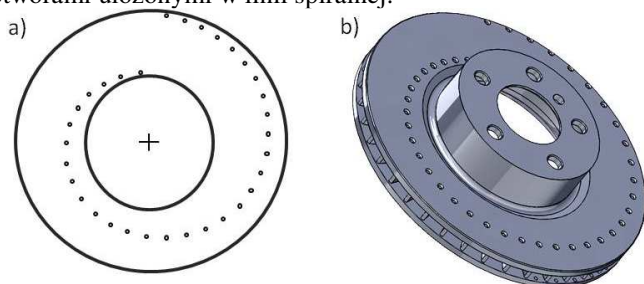
W oparciu o dostępną literaturę z zakresu tarczowych układów hamulcowych opracowano nową powierzchnię cierną tarczy z otworami ułożonymi wzdłuż spirali Archimedesa o jednym zwoju. Takie założenie jest kompromisem zarówno w zakresie ustabilizowania procesu hamowania związanego ze stałym przebiegiem chwilowego współczynnika tarcia w funkcji czasu

hamowania jak i mniej intensywnym względem innych konstrukcji tarcz wierconych zużyciem okładzin ciernych. Spirale Archimedesesa we współrzędnych biegunowych można zapisać w następującej postaci [6]:

$$R(\varphi) = \frac{(k \cdot \varphi + \Delta k)}{2\pi} \cdot (\varphi + \Delta \varphi) \quad (1)$$

gdzie: φ – zmienna kąta wyrażonego w radianach,
 $R(\varphi)$ – funkcja zależności promienia od kąta φ ,
 k – parametr określający przyrost odległości pomiędzy poszczególnymi zwojami spirali Archimedesesa,
 Δk – parametr przesuwający promień wodzący funkcji o zadaną wartość,
 $\Delta \varphi$ – parametr przesuwający kąt początkowy spirali Archimedesesa.

Przedstawione rozwiązanie powierzchni tarczy hamulcowej z jednym zwojem spirali Archimedesesa zostało zgłoszone do Urzędu Patentowego RP w celu uzyskania ochrony patentowej na wynalazek [5]. Na rysunku 2 przedstawiono schemat oraz modeli tarczy z otworami ułożonymi w linii spiralnej.



Rys. 2: Tarcze hamulcowe z nawierceniami w ułożonymi w linii spirali Archimedesesa o jednym zwoju: a) schemat, b) model tarczy wykonany w środowisku SolidWorks 2016.

3. Warunki brzegowe analiz numerycznych tarcz hamulcowych

Przed rozpoczęciem analiz numerycznych w zakresie wyznaczenia rozkładów temperatury, naprężeń oraz odkształceń tarcz hamulcowych konieczne było określenie warunków brzegowych symulacji w środowisku SolidWorks 2016. Analizy numeryczne przeprowadzono dla przypadku hamowania na torze płaskim z założonej prędkości 160km/h aż do zatrzymania. Dane wykorzystane do symulacji numerycznych przedstawia tabela 1.

Tabela 1. Dane do symulacji numerycznych hamulca tarczowego w środowisku SolidWorks

Lp.	Nazwa	Symbol	Wartość
1	Masa pojazdu (BMW X3 (F25))	M	2270 [kg]
2	Prędkość początku hamowania	v_o	44,4 [m/s]
3	Promień tarczy hamulcowej	r_d	0,164 [m]
4	Promień koła samochodu (225/60R17)	r_w	0,3509 [m]
5	Czas hamowania	t_z	7 [s]
6	Opóźnienie hamowania	a	4 [m/s ²]

W celu obliczenia strumienia ciepła działającego na tarczę w pierwszej kolejności należy wyznaczyć siłę działającą na tarczę hamulcową na podstawie [3] z zależność (1):

$$F_{DISC} = \frac{0,5 \cdot P \cdot M \cdot v_0^2}{2 \cdot \frac{r_d}{r_w} \cdot (v_0 \cdot t_z - 0,5 \cdot a \cdot t_z^2)} = \frac{0,5 \cdot 1 \cdot 2270 \cdot 44,4^2}{2 \cdot \frac{0,164}{0,3509} \cdot (44,4 \cdot 7 - 0,5 \cdot 3 \cdot 7^2)} = 10094,24 [N] \quad (1)$$

gdzie: P – stosunek rozdziału siły hamowania pierwszej osi względem drugiej, $P=1$ dla hamowania tylko przednią osią (tylna oś nieobciążona),
 M – masa pojazdu,
 v_0 – prędkość początku hamowania,
 r_d – promień tarczy hamulcowej,
 r_w – promień koła samochodu,
 t_z – czas hamowania,
 a – opóźnienie hamowania.

Wówczas strumień ciepła działający na jedną stronę tarczy zgodnie z [3] określa zależność (2):

$$\dot{Q}(t) = F_{DISC} \cdot v_{DISC}(t) = F_{DISC} \cdot \frac{r_d}{r_w} \cdot (v_0 - a \cdot t) = 209677,4 - 14153(t) [W] \quad (2)$$

Wyznaczenie gęstości strumienia ciepła poprzedzone jest obliczeniem powierzchni czarnej tarczy hamulcowej z zależność (3):

$$A = \frac{\pi D_z^2}{4} - \frac{\pi d_w^2}{4} = \frac{314 \cdot 0,328^2}{4} - \frac{314 \cdot 0,196^2}{4} = 0,054 [m^2] \quad (3)$$

gdzie: D_z – średnica zewnętrzna tarczy hamulcowej,
 d_w – średnica wewnętrzna pierścienia ciernego tarczy hamulcowej.

Gęstość strumienia ciepła przedstawia zależność (4):

$$q = \frac{\dot{Q}(t)}{A} = \frac{209677,4}{0,054} = 3859726 \left[\frac{W}{m^2} \right] \text{ dla } t = 0s \quad (4)$$

Do analiz numerycznych założono gęstość strumienia ciepła wynoszącą 4000000 W/m². Natomiast przy założeniu wartości współczynnika tarcia $\mu=0,4$, z zależności (5) na podstawie [3] obliczono siłę działającą na zacisk hamulca.

$$F_{CALIPER} = \frac{F_{DISC}}{\mu} = \frac{10094,24}{0,4} = 25235,6 [N] \quad (5)$$

Dla samochodu BMW X3 (F25) średnica tłoczka hamulcowego wynosi 57mm, natomiast ciśnienie w układzie hamulcowym przy hamowaniu zatrzymującym z opóźnieniem 4m/s² nie przekracza 60bar. Wówczas siła nacisku tłoczka hamulcowego na klocek wyniesie zgodnie z zależnością (6):

$$F_{PISTON} = p \cdot A_t = 6000000 \cdot \frac{\pi \cdot 0,057^2}{4} = 15310,55 [N] \quad (6)$$

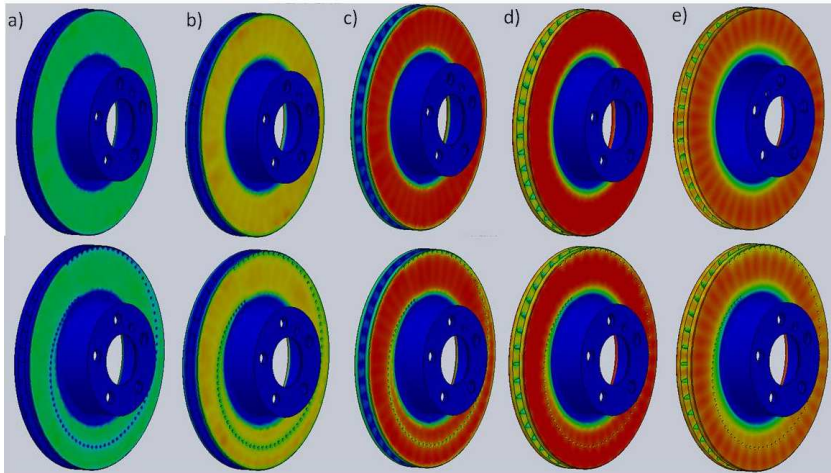
gdzie: p – ciśnienie w układzie hamulcowym,
 A_t – powierzchnia tłoczka hamulcowego.

Nacisk powierzchniowy okładziny do tarczy hamulcowej przedstawia końcowa zależność (7) na podstawie [3]:

$$p = \frac{F_{PISTON}}{A_{BRAKE} \cdot \mu} = \frac{15310,55}{0,005675 \cdot 0,4} = 6744736 [Pa] \approx 6,7 [MPa] \quad (7)$$

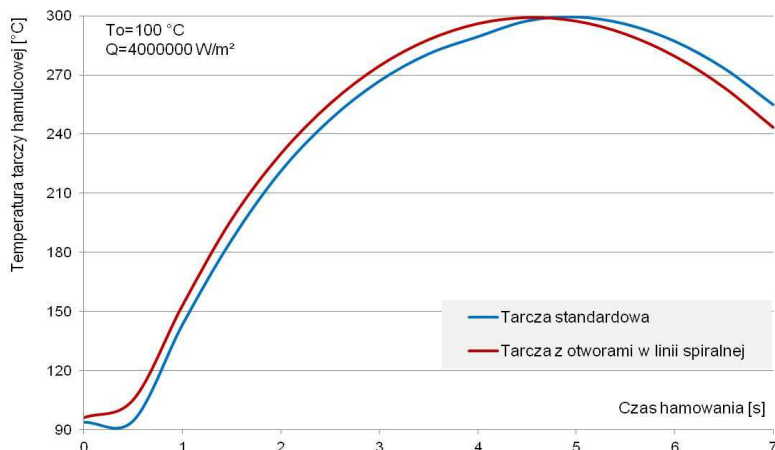
gdzie: A_{BRAKE} – powierzchnia klocka hamulcowego, $A_{BRAKE}=56,75[\text{cm}^2]$.

Wykorzystując zależności (1)-(7) przeprowadzono symulacje numeryczne rozkładu temperatury na tarczach hamulcowych w czasie hamowania. Na rysunku 3 przedstawiono obrazy rozkładu temperatury tarcz hamulcowych po symulacji hamowania zatrzymującego dla wybranych chwil czasowych.



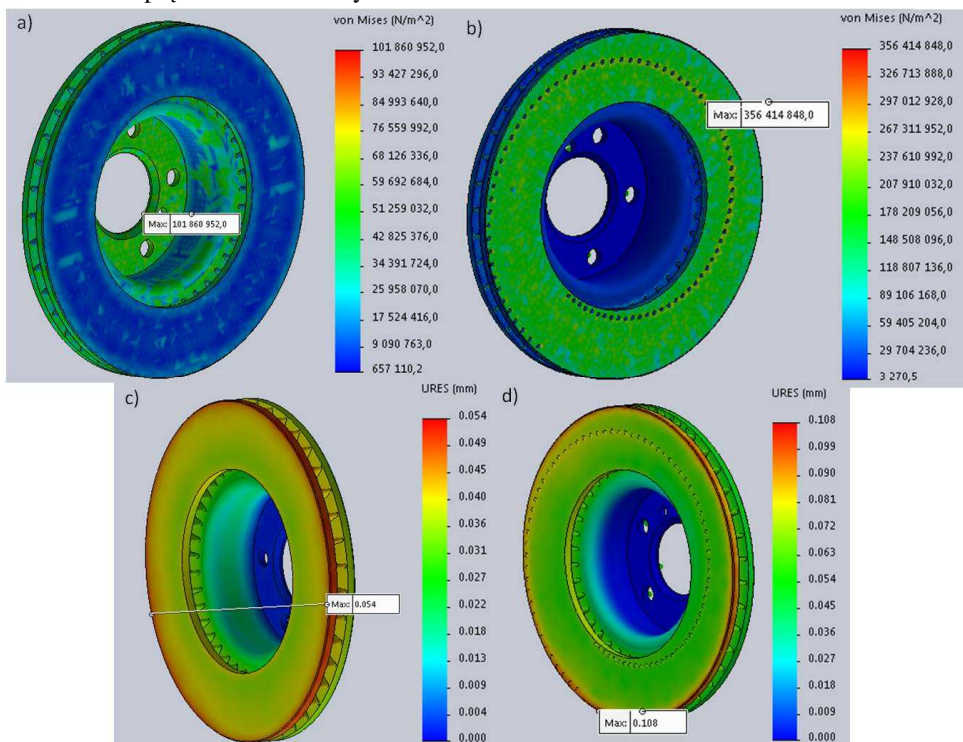
Rys. 3: Rozkład temperatury na tarczy gładkiej (bez perforacji powierzchni ciernej) oraz tarczy z otworami wykonanymi w linii spiralnej po symulowanym hamowaniu trwającym 7 sekund w chwili czasowej: a) 1s, b) 2s, c) 3s, d) 4s, e) 7s.

Dla każdej chwili czasowej hamowania po symulacji określano wartość temperatury maksymalnej tarczy. Na tej podstawie sporządzono charakterystykę przyrostu temperatury tarcz (perforowanej oraz gładkiej) w czasie symulowanego hamowania trwającego 7 sekund (rys.4).



Rys. 4: Rozkład średniej temperatury tarcz hamulcowych po symulowanym hamowaniu.

Analizując wykres przedstawiony na rysunku 4 stwierdza się, że dodatkowa perforacja na tarczy wpływa na obniżenie temperatury tarczy w ostatniej fazie hamowania w odniesieniu do tarczy klasycznej. Analizę rozkładu naprężeń przeprowadzono dla naprężeń zredukowanych wg Misesa, uwzględniając działanie strumienia ciepła na pierścienie cierne tarcz hamulcowych, temperaturę pozostałych elementów tarczy hamulcowej oraz działaniem momentu hamującego na tarczę względem jej osi symetrii. Temperaturę początku hamowania ustalono do symulacji na poziomie 100°C , natomiast strumień ciepła jako wynik symulacji termicznych był importowany do symulacji rozkładu naprężeń. Wartość momentu hamującego podobnie jak wartość temperatury początku hamowania ustalono z karty badań stanowiskowych testu AK Master. Do symulacji naprężeń założono wartość momentu wynoszącego 686Nm jak podczas badań dla symulacji zjawiska fadingu. Na rysunkach 5a) i 5b) przedstawiono widok tarcz hamulcowych z rozkładem naprężeń zredukowanych Misesa.

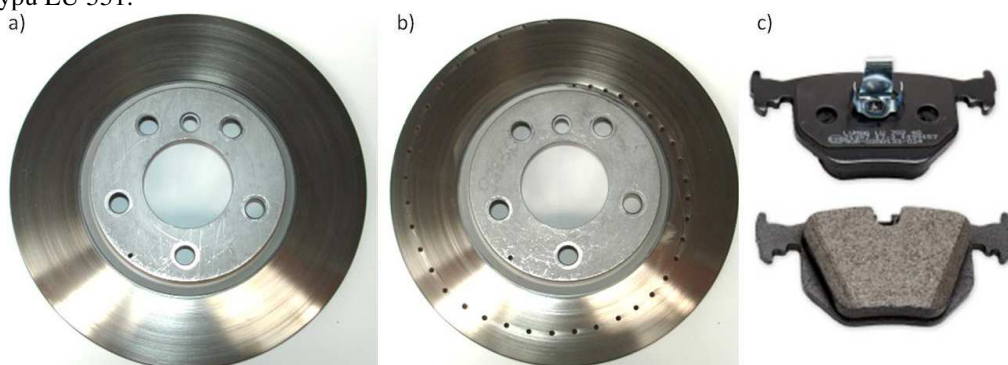


Rys. 5: Analiza numeryczna naprężeń zredukowanych von Mises dla tarczy a) standardowej bez perforacji, b) z otworami w linii spiralnej oraz odkształceń c) dla tarczy standardowej, d) z otworami w linii spiralnej

Natomiast na rysunkach 5c) i 5d) przedstawiono przemieszczenia (odkształcenia) tarcz hamulcowych po symulacji naprężeń zredukowanych. W każdym z analizowanych przypadków tarcz hamulcowych można zaobserwować, że największe odkształcenia występują na promieniu zewnętrznym tarczy drugiego (wewnętrznego) pierścienia cierneho tj. od strony silnika a naprężenia w obrębie otworów tarczy wierconej są trzykrotnie większe w odniesieniu do tarczy gładkiej bez perforacji. W dłuższej eksploatacji tarcz hamulcowych wierconych w obrębie otworów mogą występować pęknięcia termiczne.

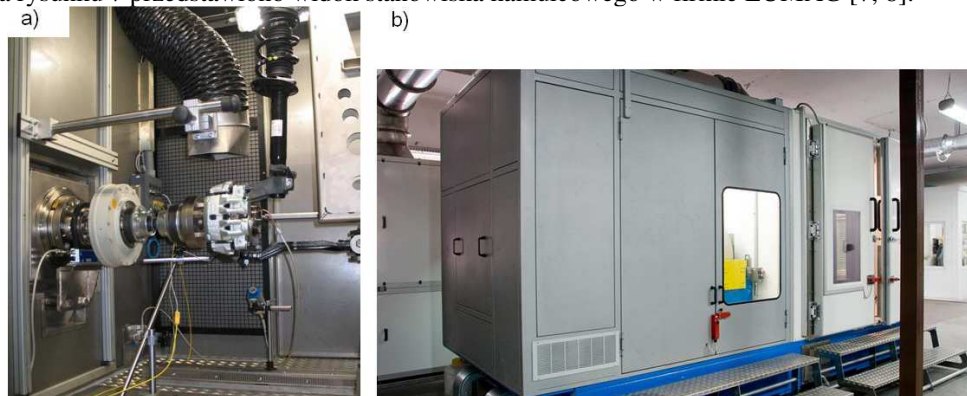
4. Metodyka badań stanowiskowych tarcz hamulcowych

Drugim etap prac nad tarczą z nową powierzchnią cierną z otworami wywierconymi w linii spiralnej były badania stanowiskowe. Badania o charakterze cierno-mechanicznym (gdzie rejestrowano zmianę współczynnika tarcia oraz temperatury tarczy w czasie hamowania) przeprowadzone zostały w firmie LUMAG w Budzynie na bezwładnościowym stanowisku do badań hamulców bębnowych i tarczowych pojazdów samochodowych Tecsa TC185-EL. Obiektem badań były dwie tarcze hamulcowe typu 24.0128-0254.1 z wentylującymi łopatkami. Pierwsza tarcza klasyczna bez perforacji, druga z nawierceniami w kształcie spirali Archimedesesa o jednym zwoju (rys. 6b)) współpracujące ze spiekanymi okładzinami ciernymi firmy LUMAG typu LU 551.



Rys. 6: Widok tarcz hamulcowych zastosowanych podczas badania, a) tarcza standardowa (gładka), b) tarcza z otworami w linii spiralnej, c) widok okładzin ciernych.

Na rysunku 7 przedstawiono widok stanowiska hamulcowego w firmie LUMAG [7, 8].



Rys. 7. Widok stanowiska hamulcowego w firmie LUMAG, a) widok części badawczej z zamocowanym zaciskiem hamulca tarczowego, b) widok na część napędową stanowiska wraz zastąpionymi masami wirującymi o różnej inercji [10, 11].

Do badań wykorzystano program badawczy AK-Master wg SAE J2522 [12]. Dla wspomnianego programu przeprowadzono hamowania i przyhamowania z różnych prędkości. Ciśnienie w układzie hamulcowym w większości prób wyniosło 30bar. Pomiar temperatury tarczy hamulcowej przeprowadzono przy pomocy jednej termopary zamocowanej do tarczy hamulcowej. Badanie na stanowisku hamulcowym wykonano zgodnie z założeniami

eksperymentu czynnego opisanego w [2]. W tabeli 2 przedstawiono wymagania dla poszczególnych prób oraz warunków do ich przeprowadzenia.

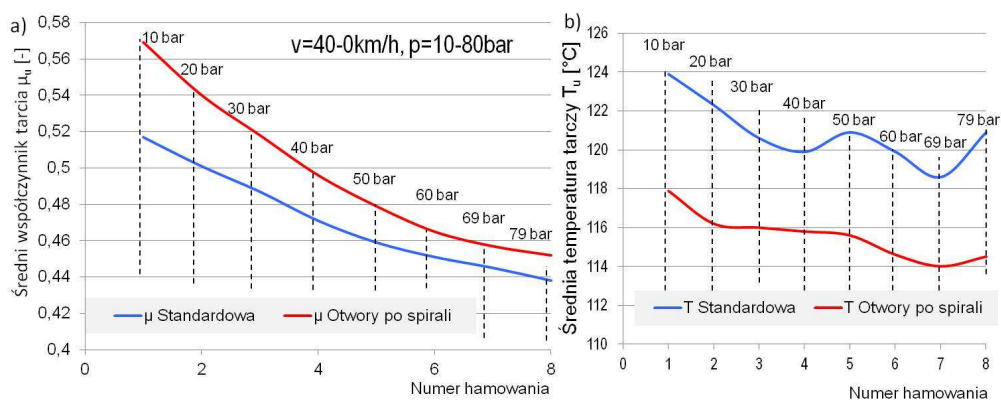
Tabela 2. Wytyczne przeprowadzenia testu AK-Master wg SAE J2522 przed próbą hamowania

Lp.	Nazwa próby	Prędkość w km/h	Ciśnienie w barach	Temperatura tarczy w °C	Liczba prób
1	μ Green test	80-30	30	100	30
2	Bedding test	80-30	30	100	60
3	Characteristic value 1	80-30	30	100	6
4.1	Test Speed/Pressure Sensitivity	40-5	10, 20, 30, 40, 50, 60, 69, 79	100	8
4.2	Test Speed/Pressure Sensitivity	80-40	10, 20, 30, 40, 50, 60, 69, 79	100	8
4.3	Test Speed/Pressure Sensitivity	120-80	10, 20, 30, 40, 50, 60, 69, 79	100	8
4.4	Test Speed/Pressure Sensitivity	160-130	10, 20, 30, 40, 50, 60, 69, 79	100	8
4.5	Test Speed/Pressure Sensitivity	180-150	10, 20, 30, 40, 50, 60, 69, 79	100	8
5	Characteristic value 2	80-30	30	100	6
6	Cold Application	40-5	30	40	1
7	Motorway test	100-5	60	40	1
		190-105	60	40	1
8	Characteristic value 3	80-30	30	100	18
9	Fade 1 test	100-3	od 38 do 60	100 bez chłodzenia	15
10	Recovery 1 test	80-30	30	100	18
11	Temperature/Pressure Sensitivity 100 test	80-30	10, 20, 30, 40, 50, 60, 69, 79	100	8
12.1	Increasing Temperature 500 test	80-30	30	100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500	9
12.2	Pressure Line 500 test	80-30	10, 20, 30, 40, 50, 60, 69, 80	500	8
13	Recovery 2 test	80-30	30	100	18
14	Fade 2 test	100-3	od 38 do 60	100 bez chłodzenia	15
15	Recovery 3 test	80-30	30	100	6

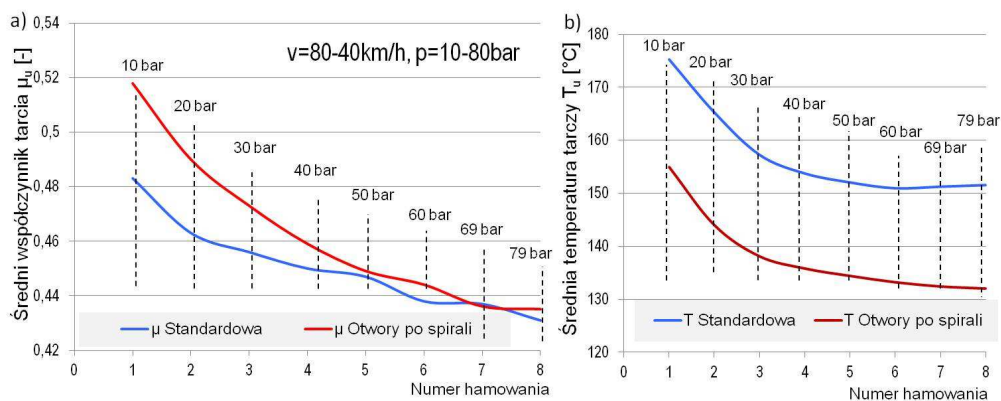
Na jeden cykl badań (na jedną tarczę) przypadało 276 hamowań z różnych prędkości, nacisku oraz początkowej temperaturze tarczy hamulcowej.

5. Wyniki badań stanowiskowych tarcz hamulcowych

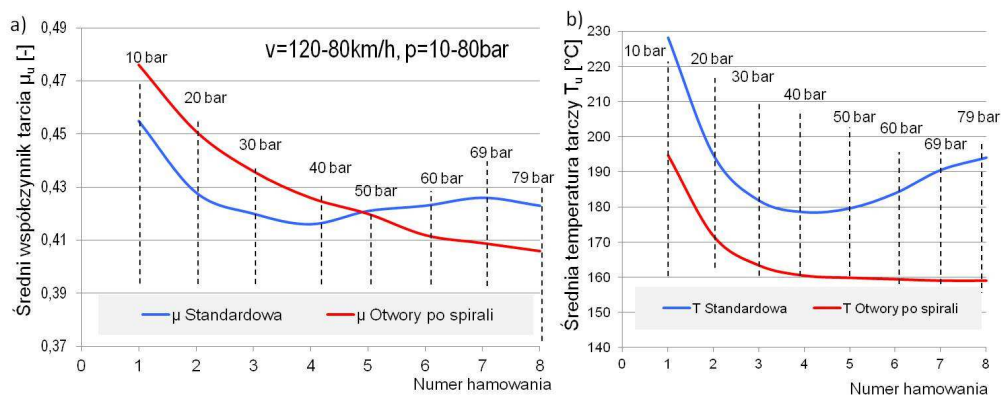
Pierwsze dwa testy badań stanowiskowych wg. normy SAE J2522 zgodnie z wytycznymi zawartymi w tabeli 2 związane są z dotarciem materiału cierne względem tarczy hamulcowej. Pierwszą ocenę zmienności współczynnika tarcia dokonuje się po teście wrażliwości na prędkość hamowania oraz ciśnienie w układzie hydraulicznym (Test Speed/Pressure Sensitivity). Na rysunkach 8-12 przedstawiono charakterystyki cierne oraz termiczne hamulca tarczowego w zależności od prędkości i ciśnienia w układzie hamulcowym.



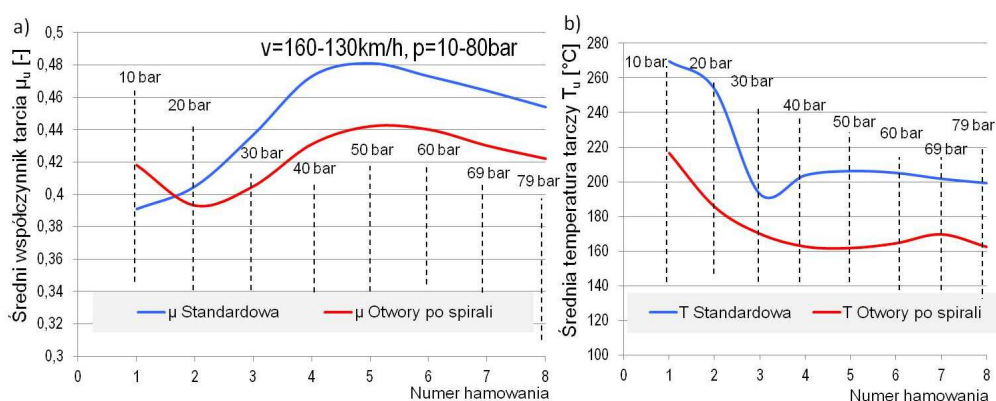
Rys. 8. Przebieg a) średniego współczynnika tarcia, b) średniej temperatury tarczy w funkcji kolejnych hamowań ($v=40-0\text{km/h}$) dla tarczy standardowej bez perforacji oraz tarczy z otworami wykonanymi w linii spiralnej dla testu *Speed/Pressure Sensitivity*.



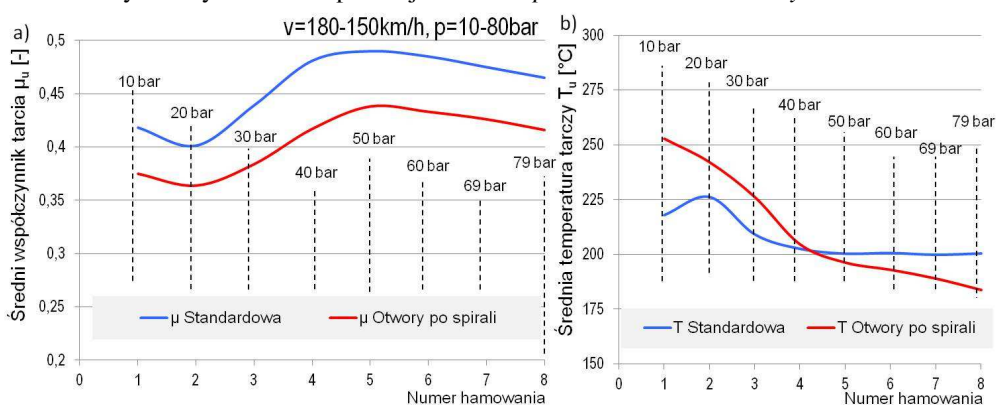
Rys. 9. Przebieg a) średniego współczynnika tarcia, b) średniej temperatury tarczy w funkcji kolejnych hamowań ($v=80-40\text{km/h}$) dla tarczy standardowej bez perforacji oraz tarczy z otworami wykonanymi w linii spiralnej dla testu *Speed/Pressure Sensitivity*.



Rys. 10. Przebieg a) średniego współczynnika tarcia, b) średniej temperatury tarczy w funkcji kolejnych hamowań ($v=120-80\text{km/h}$) dla tarczy standardowej bez perforacji oraz tarczy z otworami wykonanymi w linii spiralnej dla testu *Speed/Pressure Sensitivity*.



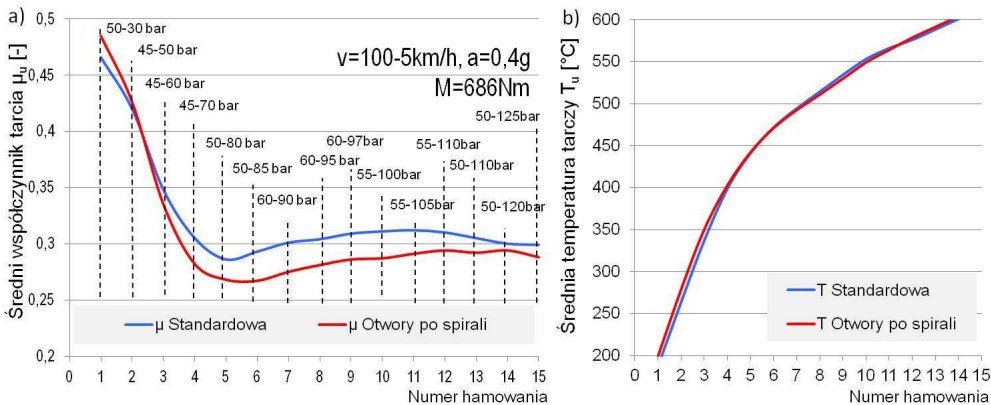
Rys. 11. Przebieg a) średniego współczynnika tarcia, b) średniej temperatury tarczy w funkcji kolejnych hamowań ($v=160-130\text{km/h}$) dla tarczy standardowej bez perforacji oraz tarczy z otworami wykonanymi w linii spiralnej dla testu *Speed/Pressure Sensitivity*.



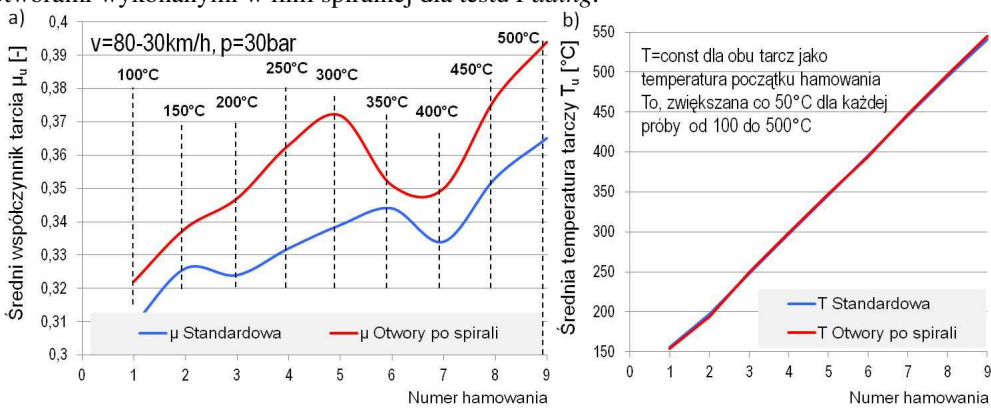
Rys. 12. Przebieg a) średniego współczynnika tarcia, b) średniej temperatury tarczy w funkcji kolejnych hamowań ($v=180-150\text{km/h}$) dla tarczy standardowej bez perforacji oraz tarczy z otworami wykonanymi w linii spiralnej dla testu *Speed/Pressure Sensitivity*.

Przyhamowanie typu *Fade* tzw. fading wykonywane jest w 15-tu powtórzeniach bez wcześniejszego chłodzenia tarczy oraz ze zmiennym ciśnieniem. Wspomniany test odwzorowuje przyhamowanie z prędkości 100 do 5 km/h w celu uzyskania stałego opóźnienia hamowania wynoszącego 0,4g, co powoduje nieliniowe narastanie ciśnienia hamowania w czasie próby. Na rysunku 13 przedstawiono rozkład średniego współczynnika tarcia oraz temperatury z danej próby hamowania.

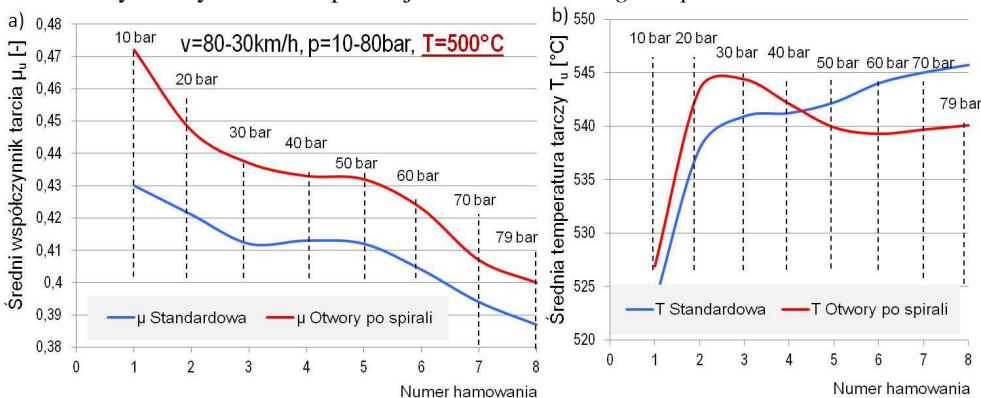
Przyhamowanie typu *Increasing Temperature 500°C* wykonywane jest w 9-ciu powtórzeniach ze stałym ciśnieniem dla każdej próby tj. 30 bar. Istotną cechą tego testu jest pomiar w zmiennej narastającej temperaturze tarcz tj. początku hamowania. Pierwsze hamowanie odbywa się przy temperaturze tarczy wynoszącej 100°C, kolejne o 50°C więcej aż do 500°C temperatury początku hamowania dla ostatniej 9-jej próby. Wspomniany test odwzorowuje przyhamowanie z prędkości 80 do 30 km/h. Na rysunku 14 przedstawiono przebiegi średniego współczynnika tarcia oraz średniej temperatury dla badanych tarcz tj. standardowej bez perforacji oraz z otworami w linii spiralnej.



Rys. 13. Przebieg a) średniego współczynnika tarcia, b) średniej temperatury tarczy w funkcji kolejnych hamowań ($v=180-150\text{km/h}$) dla tarczy standardowej bez perforacji oraz tarczy z otworami wykonanymi w linii spiralnej dla testu *Fading*.



Rys. 14. Przebieg a) średniego współczynnika tarcia, b) średniej temperatury tarczy w funkcji kolejnych hamowań ($v=180-150\text{km/h}$) dla tarczy standardowej bez perforacji oraz tarczy z otworami wykonanymi w linii spiralnej dla testu *Increasing Temperature 500°C*.



Rys. 15. Przebieg a) średniego współczynnika tarcia, b) średniej temperatury tarczy w funkcji kolejnych hamowań ($v=180-150\text{km/h}$) dla tarczy standardowej bez perforacji oraz tarczy z otworami wykonanymi w linii spiralnej dla testu *Pressure Line 500 test*.

Przyhamowanie typu *Pressure Line 500 °C* wykonywane jest po teście *Increasing Temperature 500°C*. Badanie wykonywane jest w 8-miu powtórzeniach ze zmiennym ciśnieniem dla każdej próby. Pierwsze badanie wykonywane jest przy ciśnieniu 10bar, kolejne 20, 30, 40, 50, 60, 70 i 80bar przy 8-ym badaniu. Wspomniany test odwzorowuje przyhamowanie z prędkości 80 do 30km/h. Temperatura początkowa tarczy dla wynosiła 500°C przed wszystkimi próbami. Na rysunki 15 przedstawiono zestawienie średniego współczynnika tarcia oraz temperatury tarczy. Analizując wykresy przedstawione na rysunkach 8-15 stwierdza się, że dodatkowa perforacja na powierzchni cierniej nie wpływa na poprawę wszystkich charakterystyk cierno-mechanicznych względem tarczy klasycznej. Przydatność tarcz wierconych obserwuje się w przypadku hamowań z małych i średnich prędkości hamowań oraz w czasie hamowań z dużym obciążeniem cieplnym. Dodatkowo dla badanych tarcz przeprowadzono testy zużyciowe.

Tabela 3. Zestawienie wyników końcowych po teście AK-Master wg SAE J2522

Lp.		Tarcza standardowa gładka	Tarcza z otworami w linii spiralnej
1	Zużycie wagowe okładzin ciernych	23g	24g
2	Zużycie liniowe tarcz hamulcowych	0,06mm	0,07mm
3	Średni współczynnik tarcia ze wszystkich prób	0,399	0,402
4	Całkowita droga hamowania	89,7m	88,3m
5	Całkowity czas hamowania	1531,2s	1499,4s

W tabeli 3 przedstawiono zestawienie zużycie elementów pary cierniej hamulca tj. okładzin ciernych oraz tarczy hamulcowej. Ponadto zawarto końcowe (średnie) wyniki z badań stanowiskowych w zakresie średniego współczynnika ze wszystkich prób, całkowitej drogi i czasu hamowania po 276 hamowaniach.

6. Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych analiz numerycznych oraz badań porównawczych testem AK-Master wg SAE J2522 tarczy wierconej względem tarczy klasycznej wysunięto następujące wnioski:

- tarcze wiercone względem tarczy klasycznej bez perforacji uzyskują o około 5% wyższą średnią temperaturę w pierwszej fazie hamowania, natomiast w drugiej fazie hamowania temperatura obniża się również o około 5%. Na podstawie analiz numerycznych obserwuje się gwałtowniejszy przyrost średniej temperatury tarczy perforowanej względem klasycznej przez co tarcza wiercona szybciej osiąga wartość maksymalną. Jednak wartości maksymalne temperatury tarcz wykazały o około 2% niższą temperaturę tarczy wierconej względem tarczy klasycznej z całego czasu symulacji,
- tarcza perforowana wykazuje blisko trzykrotnie większy wzrost naprężeń zredukowanych wg Misesa względem tarczy klasycznej tylko w okolicach perforacji. W dłuższej eksploatacji może być to powodem powstawania pęknięć powierzchniowych. Dalsze symulacje numeryczne wykazały, że możliwe jest istotne obniżenie napręż w okolicach otworów tarczy wierconej stosując fazowania krawędzi otworu przy powierzchni cierniej tarczy,
- w badaniach stanowiskowych tarcze wiercone nie poprawiają wszystkich charakterystyk ciernych w zakresie wzrostu średniego współczynnika tarcia względem tarcz gładkich,

- natomiast poprawiają przebiegi chwilowego współczynnika tarcia w funkcji czasu oraz średniej temperatury tarczy hamulcowej,
- d) istotny przyrost średniego współczynnika tarcia dla tarczy wierconej w linii spirali Archimedesesa o jednym zwoju występuje podczas hamowań z małych i średnich prędkości hamowań. Tarcza klasyczna bez perforacji wykazała wyższy lub na zbliżonym poziomie (w zależności od ciśnienia) przebieg średniego współczynnika tarcia podczas prób z dużych prędkości od 160 do 180km/h.
 - e) test fadingowy wykazał, że wiercone tarcze nie wpływają na podwyższenie współczynnika tarcia, w pierwszych hamowaniach tarcza wiercona wykazała nieznacznie wyższy średni współczynnik tarcia natomiast w kolejnych hamowaniach wyższe μ_u wykazała tarcza klasyczna,
 - f) tarcze z perforacją wykazują największą przydatność w zakresie hamowań przy dużym obciążeniu cieplnym jak i narastającym ciśnieniu w układzie hamulcowym, wówczas obserwuje się istotnie wyższy współczynnik tarcia w całym zakresie ciśnień tj. od 10 do 80bar,
 - g) tarcze nawiercane wykazały stabilniejsze przebiegi chwilowego i średniego współczynnika tarcia względem tarczy klasycznej, co przekłada się na stałą wartość opóźnienia hamowania. Odchylenia standardowe od wartości średniej w większości hamowań były blisko dwukrotnie mniejsze względem tarczy standardowej,
 - h) testy zużyciowe na 276 symulowanych hamowań wykazały nieznaczne wyższe (o 1 gram) zużycie wagowe okładzin ciemnych współpracujących z tarczą perforowaną w postaci otworów w linii spiralnej oraz zużycie na grubości tarczy perforowanej o 0,01mm względem tarczy gładkiej.
 - i) tarcza z otworami w linii spirali Archimedesesa również przeszła pozytywnie testy na bezwładnościowym stanowisku hamulcowych dla pojazdów szynowych, szczegółowe wyniki z tych badań przedstawiono w pracy [3].

Projekt jest finansowany ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju, program LIDER V, umowa nr LIDER/022/359/L-5/13/NCBR/2014

Literatura

- [1] 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.
- [2] Leszek W., Wybrane zagadnienia metodyczne badań empirycznych. Instytut Technologii Eksploatacji, Radom 2006, 142-153.
- [3] Mackin T.J., Thermal cracking in disc brakes, Engineering Failure Analysis 9(2002), s. 63–76, February 2002.
- [4] Panier S., Dufrenoy P., Weichert D., An experimental investigation of hot spots in railway disc brakes. "Wear" 256 (2004) s. 764-773.
- [5] Sawczuk W., Tarcza hamulcowa. Zgłoszenie o udzielenie patentu oznaczonego numerem P.418361 z dnia 16.08.2016.

- [6] Sawczuk W., Koncepcja nowej tarczy hamulcowej do pojazdów szynowych. Technika Transportu Szynowego 12/2016.
- [7] Strona internetowa:
<http://www.iparts.pl/czesc/tarcza-hamulcowa-ate-24012802541,0-3-24012802541-985783.html>
- [8] Strona internetowa:
<http://www.rgarage.pl/index.php/modyfikacje/brakes/tarcze-wiercone-czy-nacinane8>.
- [9] Strona internetowa:
<http://mojafirma.infor.pl/moto/eksploatacja-auta/uklad-hamulcowy/271667,Co-daja-nawiercane-tarcze-hamulcowe-czy-mozna-je-montowac-w-kazdym-aucie.html>
- [10] Strona internetowa:
<http://lumag.pl/inwestycje-w-urzadzenia-badawcze/>
- [11] Strona internetowa:
<http://motofocus.pl/technika/14036/lumag-inwestuje-w-urzadzenia-badawcze-do-klockow-breck>
- [12] Strona internetowa:
[https://webstore.ansi.org/RecordDetail.aspx?sku=SAE+J+2520-2013+\(SAE+J2520-2013\)20](https://webstore.ansi.org/RecordDetail.aspx?sku=SAE+J+2520-2013+(SAE+J2520-2013)20)
- [13] Strona internetowa:
<http://www.autoexpert.pl/aktualnosci/Te-elementy-najczesciej-sie-psuja-w-naszyc-autach.9417.1>
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.