

Mateusz JÜNGST, Wojciech SAWCZUK

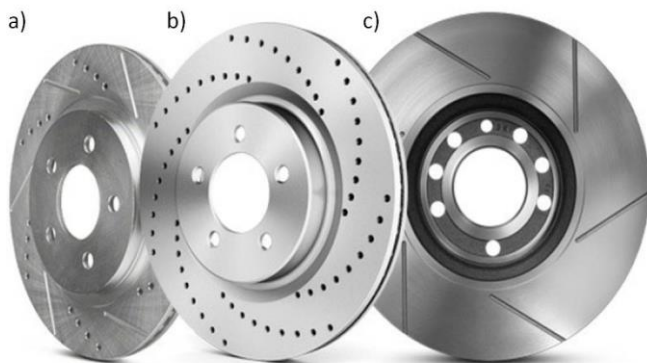
ANALIZA ROZWIĄZAŃ KONSTRUKCYJNYCH POWIERZCHNI CIERNYCH NOWYCH TARCZ HAMULCOWYCH

W tarczowych układach hamulcowych jednym z najważniejszych elementów jest tarcza hamulcowa. Od początku pojawienia się tego rodzaju hamulca jako układu zastępującego hamulec bębnowy, powstało wiele rozwiązań konstrukcyjnych samych tarcz hamulcowych. Wyższość tarczowego układu hamulcowego nad klasycznym hamulcem bębnowym wynika głównie z możliwości realizacji większych mocy hamowania, doboru materiału na parę cierną pozwalającą na dowolne kształtowanie charakterystyki ciernej współczynnika tarcia w funkcji czasu i prędkości hamowania oraz zdecydowanie lepsze warunki wymiany ciepła powstałego w czasie hamowania do otoczenia. W hamulcach tarczowych poddanych większym obciążeniom stosuje się tarcze hamulcowe które oprócz wentylacji między pierścieniami ciernymi dodatkowo są nawiercane lub nacinane. Takie konstrukcje istotnie wpływają na poprawę procesu hamowania szczególnie przy dużych obciążeniach cieplnych, co przekłada się na skuteczność hamowania, jednak istotnie wpływają na większe koszty wytwarzania i skłonność do pęknięć powierzchniowych. W artykule przedstawiono kilka rozwiązań tarcz hamulcowych z rowkiem w kształcie spirali Archimedesesa jako rozwiązania, które poprawia charakterystyki cierne przy niewielkich nakładach związanych przy ich wytwarzaniu.

WSTĘP

Z najważniejszych dat związanych z hamulcami w pojazdach samochodowych jest rok 1899, w którym Wilhelm Maybach wynalazł pierwszy hamulec bębnowy. Trzy lata później, ten typ hamulca został zastosowany przez braci Renault. Kolejną ważną datą w historii hamulców był rok 1910, kiedy to zastosowano hamulce na wszystkich czterech kołach pojazdu. Wcześniej hamulce stosowano na jednej z osi pojazdu, tj. osi napędnej czyli tylnej. W tym samym czasie rozpoczęto prace nad hamulcem tarczowym, którego patent w 1902 roku uzyskał Brytyjczyk Frederick Lanchester. Jako pierwsza wykorzystana to austriacka firma Graf&Stift dopiero w 1937 roku. W latach 40-tych rozpoczął się dynamiczny rozwój hamulców tarczowych uruchamianych hydraulicznie.

W pojazdach samochodowych oprócz tarcz pełnych (niewentylowanych) oraz wentylowanych, co przedstawia rysunek 1 również stosuje się tarcze nacinane lub nawiercane. Tego typu tarcze są stosowane w szczególności w układach hamulcowych pracujących przy większych obciążeniach cieplnych związanych z częstym ich uruchamianiem podczas jazdy w terenie górzystym lub w pojazdach sportowych.



Rys. 1. Tarcze hamulcowe wentylowane pojazdów samochodowych: a) nawiercane i nacinane, b) nawiercane, c) nacinane [4]

Według opracowań zawartych w [3, 4 i 5] 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 wyżarzeniu na etapie produkcji (zjawisko fadingu) oraz wody (zjawisko akwaplaningu). Jednak otwory po wierceniu przez całą grubość pierścienia ciernego (do przestrzeni wentylacji w środku tarczy) zmniejszają pojemność cieplną, co przy częstych hamowaniach przy realizacji dużych mocy hamowania może wpływać na ich odkształcenia. Ponadto otwory w dłuższej eksploatacji tarcz hamulcowych przyczyniają się do powstawania pęknięć termicznych (mikropęknięć) 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.

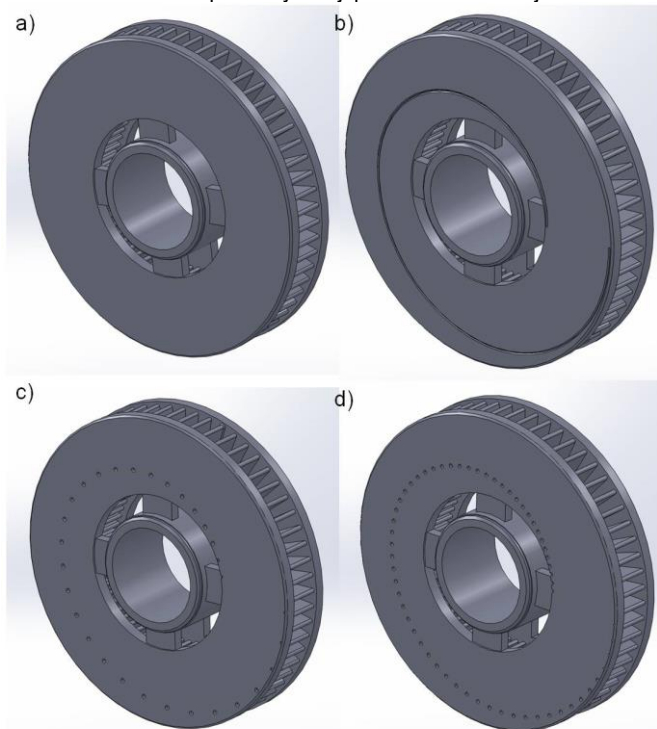
1. OCENA PRZYDATNOŚCI WYNIKÓW BADAŃ DO OPTYMLIZACJI POWIERZCHNI CIERNEJ TARCZ HAMULCOWYCH

Po przeprowadzeniu stanowiskowych badań ciernych oraz symulacji stwierdzono, że modyfikacja powierzchni tarczy hamulcowej wpływa na poprawę procesu hamowania rozumianego niezmiennym (stałym) przebiegiem chwilowego współczynnika tarcia w funkcji prędkości hamowania. Należy jednak zaznaczyć, że niektóre zmiany wprowadzone na powierzchniach ciernych z jednej strony stabilizują proces hamowania jednak z drugiej, wpływają na pogorszenie innych parametrów jak zużycie materiału ciernego. Ponadto większa pracochłonność przy obróbce elementów ciernych podnosi koszty jego wytwarzania i zmniejsza wydajność procesu produkcyjnego.

Do oceny trybologiczno-eksploatacyjnej wybrano następujące koncepcje tarcz hamulcowych:

- tarcza hamulcowa z rowkiem spiralnym, T_s ,
- tarcza z otworami w linii spiralnej, T_{10} ,
- tarcza ze zwiększoną liczbą otworów w linii spiralnej, T_{20} .

Ocenę zaproponowanych rozwiązań konstrukcyjnych zmodyfikowanych tarcz hamulcowych i okładzin ciernych przeprowadzono w odniesieniu do klasycznej tarczy gładkiej T_g . Na rysunku 2 przedstawiono widok tarcz po modyfikacji powierzchni ciernej.



Rys. 2. Widok powierzchni ciernej zmodyfikowanej: a) tarcza gładka, b) tarcza a rowkiem spiralnym, c) tarcza z otworami w linii spiralnej, d) tarcza ze zwiększoną liczbą otworów w linii spiralnej

2. WYBÓR KRYTERIÓW OCENY I ICH WARTOŚCIOWANIE

Przydatność proponowanych koncepcji tarcz hamulcowych dokonano wykorzystując następujące kryteria ich oceny:

- wahania (tolerancja) chwilowego współczynnika tarcia μ_a w odniesieniu do czasu hamowania,
- wartość średniego współczynnika tarcia μ_m ,
- temperatura tarczy hamulcowej T_T ,
- zużycie okładzin ciernych z ,
- koszt wykonania k .

Pierwszym kryterium oceny zmodyfikowanych konstrukcji tarcz hamulcowych były wahania chwilowego współczynnika tarcia wyznaczonego podczas badań stanowiskowych. Współczynnik tarcia obliczano zgodnie z zależnością (1) jako zależność chwilowej siły stycznej F_t odniesionej do promienia hamowania oraz chwilowej siły docisku F_b okładziny do tarczy hamulcowej [1].

$$\mu_a = \frac{F_t}{F_b} \quad (1)$$

Tolerancję chwilowego współczynnika tarcia określono jako różnica maksymalnej zarejestrowanej jego wartości do minimalnej wartości w czasie hamowania od wymaganej prędkości hamowania aż do zatrzymania. Jest to najważniejszy z parametrów w ocenie ponieważ zachowanie najmniejszych zmian chwilowego współczynnika tarcia wpływa bezpośrednio na niezmienną opóźnienia hamowania aż do zatrzymania. Ponadto w ocenie pasażera (podróżnych) wpływa pośrednio na poprawę komfortu podróżowania, w którym hamowanie przebiega łagodnie bez szarpnięć.

Drugim kryterium oceny był średni współczynnik tarcia obliczony zgodnie z zależnością (2) jako całka chwilowego współczynnika tarcia po drodze hamowania s_2 [1].

$$\mu_m = \frac{1}{s_2} \int_0^{s_2} \mu \, ds \quad (2)$$

Trzecim kryterium oceny była średnia temperatura tarczy hamulcowej. Ten parametr wyznaczony był zarówno na podstawie symulacji komputerowych jak i badań stanowiskowych. Istotą pomiaru temperatury było określenie jak modyfikacje powierzchni ciernych tarcz wpływają na średnią jej temperaturę. Jest to parametr, który określa przydatność danego rozwiązania kształtu powierzchni ciernej do dużej liczby hamowań bez wcześniejszego chłodzenia tarczy hamulcowej. W warunkach stanowiskowych, hamowania przeprowadza się przy stałych warunkach początkowych (warunkach brzegowych) w celu porównania uzyskanych parametrów jak współczynnik tarcia czy droga hamowania z innym hamowaniem przeprowadzonym w tych samych warunkach. Uzyskanie niższych wartości temperatury tarczy będzie świadczyć o możliwości wykonania większej liczby hamowań bez wcześniejszego chłodzenia, co będzie miało związek z podniesieniem bezpieczeństwa podczas jazdy oraz mniejszą skłonnością do uszkodzeń mechanicznych w wyniku odkształceń termicznych.

Czwartym parametrem oceny był pomiar zużycia materiału ciernego po serii hamowań na stanowisku hamulcowym. Ocenę zużycia wagowego dokonywano po 15 hamowaniach z różnych prędkości od 50 do 200 km/h w trzech powtórzeniach. Dążenie do mniejszego zużycia okładzin ciernych będzie miało wpływ na mniejsze pylenie materiału ciernego do środowiska naturalnego.

Piątym parametrem oceny był koszt wykonania dodatkowych rowków lub otworów na tarczy hamulcowej i okładzinach ciernych. W tej ocenie wzięto pod uwagę koszty roboczogodzin osób zajmujących się pracą na obrabiarkach skrawających oraz koszty związane z wykorzystaniem standardowych lub specjalistycznych obrabiarek skrawających do produkcji tarcz hamulcowych. Ponadto uwzględniono koszty programowania jednej lub kilku obrabiarek skrawających w celu uzyskania wymaganego kształtu powierzchni roboczej tarczy hamulcowej.

3. WYBÓR KRYTERIÓW OCENY I ICH WARTOŚCIOWANIE

Kryteria oceny zaproponowanych i analizowanych rozwiązań konstrukcyjnych tarcz hamulcowych i przeanalizowanych w rozdziale 1, możliwych do wykorzystania w przyszłym procesie produkcyjnym, zostały wraz z zaproponowanym wartościowaniem przedstawione w tab. 1.

Wskazanie najlepszego rozwiązania konstrukcyjnego tarczy hamulcowej ze zmodyfikowaną powierzchnią cierną jest związane z rozwiązaniem problemów decyzyjnych, bazującym na wybranych kryteriach wyboru. W tym celu zaproponowano zastosowanie specjalnej metody programowania wielokryterialnego, uwzględniającej mnogość funkcji celu [7]. Porządkowanie (agregację) kryteriów decyzyjnych przeprowadzono stosując Metodę Unitaryzacji Zerowanej (MUZ) [2]. Założono cztery różne warianty powierzchni ciernej tarczy (parametry wyznaczone na podstawie badań ciernych stanowiskowych i symulacji komputerowych). Warianty scharakteryzowano za pomocą pięciu cech (zmiennych decyzyjnych). Wartości charakterystyk wariantów rozwiązań konstrukcyjnych powierzchni ciernych dla tarczy, z uwzględnieniem wartości minimalnej i maksymalnej dla danej cechy, przedstawia tab. 2.

Tab. 1. Kryteria oceny i wartościowanie rozwiązań konstrukcyjnych (parametrów) tarcz hamulcowych

Typ tarczy hamulcowej		Tolerancja μ_s [-]	Średni wsp. tarcia μ_m [-]	Przyrost temp. tarczy [-]	Zużycie okładzin z [g]	Przyrost kosztu wykonania k [-]*
1	Tarcza gładka pełna T_g	0,110	0,340	1	72	1
2	Tarcza z rowkiem spiralnym T_s	0,069	0,339	0,950	79	1,09
3	Tarcza z otworami w linii spiralnej T_{1o}	0,094	0,333	0,940	87	1,14
4	Tarcza z podwójną liczbą otworów w linii spiralnej T_{2o}	0,078	0,326	0,890	104	1,32

* założenie produkcji seryjnej

Tab. 2. Zestawienie wartościowania zmiennych diagnostycznych dla analizowanych wariantów rozwiązań konstrukcyjnych (parametrów) tarcz hamulcowych

Warianty	Cechy (zmiennych diagnostycznych)				
	X1	X2	X3	X4	X5
W1	0,110	0,340	1	72	1
W2	0,069	0,339	0,950	79	1,09
W3	0,094	0,333	0,940	87	1,14
W4	0,078	0,326	0,890	104	1,32
Max x_{ij}	0,11	0,348	1,019	104	1,32
Min x_{ij}	0,064	0,326	0,89	72	1

W pierwszej kolejności rozwiązanie problemu decyzyjnego wymagało rozpoznania zmiennych diagnostycznych. Stymulanta wskazuje na zalecane wyższe wartości dla danego wariantu, natomiast destymulanta określa niższe wartości zalecane dla wariantu danego rozwiązania konstrukcyjnego. Stymulantę stanowi tylko jedna cecha – X2, ponieważ została ona opisana średnim współczynnikiem tarcia. Wyższe wartości współczynnika tarcia wpływają na realizację większych momentów hamowania, co bezpośrednio przekłada się na skrócenie drogi hamowania. Pozostałe cechy są destymulantami.

Normowanie zmiennej diagnostycznej (cechy) obliczono na podstawie zależności (3) i (4):

$$z_{ij,S} = \frac{x_{ij} - \min \cdot x_{ij}}{\max \cdot x_{ij} - \min \cdot x_{ij}} \quad (3)$$

$$z_{ij,D} = \frac{\max \cdot x_{ij} - x_{ij}}{\max \cdot x_{ij} - \min \cdot x_{ij}} \quad (4)$$

gdzie: z_{ij} – i-ta wartość unormowanej j-jej zmiennej diagnostycznej,

x_{ij} – wartość danej cechy (zmiennej diagnostycznej).

Ostatnim etapem metody *MUZ* było obliczenie wartości zmiennej agregatywnej, która charakteryzuje parametry związane z kształtem zmodyfikowanej powierzchni ciernej tarczy (warianty) ze względu na oceniane zjawisko. Obliczenie wartości zmiennej agregatywnej dla każdego wariantu oraz zmiennej diagnostycznej dokonano, stosując zależność (5):

$$Q_i = \sum_j z_{ij} \quad (5)$$

gdzie: Q_i – wartość zmiennej agregatywnej przypisanej do i-tego obiektu.

W tab. 3 zestawiono wyniki normowania dla rozpatrywanych wariantów, natomiast w tab. 4 przedstawiono ranking i wybór najlepszych wariantów konstrukcyjnych powierzchni ciernej tarcz hamulcowych.

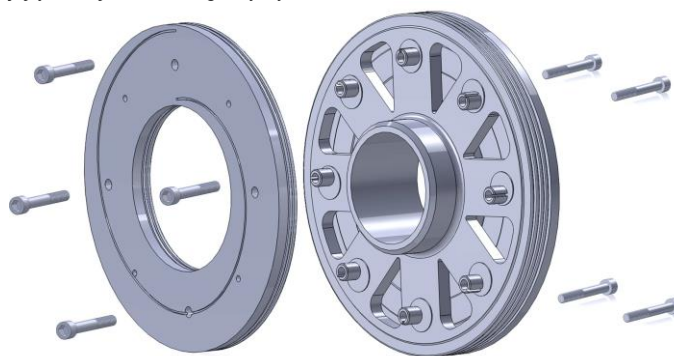
Tab. 3. Zestawienie wyników normowania dla rozpatrywanych wariantów konstrukcyjnych tarcz hamulcowych

Warianty	Unormowane zmienne diagnostyczne					Q_i
	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	
W1	0	0,636	0,147	1	1	2,784
W2	0,891	0,591	0,535	0,781	0,719	3,517
W3	0,348	0,318	0,612	0,531	0,563	2,372
W4	0,696	0	1	0	0	1,696

Tab. 4. Ranking i wybór najlepszych wariantów konstrukcyjnych tarcz hamulcowych

Parametr	Wariant	Q_i	Ocena
Tarcza z rowkiem spiralnym	W2	3,517	Max
Tarcza gładka pełna	W1	2,784	
Tarcza z otworami w linii spiralnej	W3	2,372	
Tarcza ze zwiększoną liczbą otworów w linii spiralnej	W4	1,696	

Po przeprowadzeniu analizy wielokryterialnej metodą *MUZ* stwierdzono, że najlepszym rozwiązaniem kształtu powierzchni ciernej tarczy hamulcowej jest rowek spiralny. W tym rozpatrywanym przypadku stwierdzono najwyższą wartości zmiennej agregatywnej. Przeprowadzona analiza w odniesieniu do klasycznej tarczy gładkiej wykazała, że otwory nawiercone na tarczy hamulcowej wzdłuż linii spiralnej nie wnoszą istotnej poprawy w procesie hamowania. Uzyskuje się jedynie lepszy parametr związany z mniejszą tolerancją chwilowego współczynnika tarcia oraz niższej temperatury. Jedynie w układach hamulcowych silnie obciążonych cieplnie wskazane jest stosowanie takich tarcz hamulcowych niż tarcze z rowkiem spiralnym czy tarcze hamulcowe gładkie. Jest to szczególnie ważne i zalecane dla układów hamulcowych pojazdów poruszających się w terenie górzystym.



Rys. 3. Model tarczy hamulcowej z rowkiem spiralnym według zgłoszenia patentowego P.418361 z dnia 16.08.2016

Na podstawie przeprowadzonych badań, symulacji oraz analiz możliwe było opracowanie modelu tarczy hamulcowej spełniającej postawione kryteria oceny. Na rysunku 3 przedstawiono model tarczy hamulcowej wykonanej w środowisku SolidWorks jako konstrukcji dzielonej z przykręcanymi pierścieniami ciernymi z rowkiem spiralnym do piast hamulcowej. Tarcza z rowkiem spiralnym z jednym zwojem spirali Archimedesza została zgłoszona do Urzędu Patentowego RP w celu uzyskania ochrony patentowej na wynalazek [6].

PODSUMOWANIE

W artykule poruszono problematykę tarcz hamulcowych w aspekcie oceny rozwiązań konstrukcyjnych z nacięciem lub nawierceniami wzdłuż linii spiralnej na powierzchni czarnej. Jest to nowa propozycja tarcz hamulcowych względem tarcz nacinanych i nawiercanych na całej powierzchni jako rozwiązania, które jednocześnie poprawia proces hamowania w zakresie stabilizacji przebiegu chwilowego współczynnika tarcia w funkcji czasu hamowania oraz niewielkich nakładów przy ich wytwarzaniu względem tarcz gładkich. Rowek lub szereg otworów wykonanych jako spirala Archimedeasa o jednym zwoju na powierzchni czarnej jest rozwiązaniem wystarczającym względem tarcz modyfikowanych na całej powierzchni. Uzyskuje się niewielkie wahania chwilowego współczynnika tarcia, wyższą względem tarcz gładkich wartość średniego współczynnika tarcia oraz obniżenie temperatury tarczy hamulcowej. W stosunku do tarcz nawiercanych lub nacinanych na całej powierzchni uzyskuje się mniejsze zużycie okładzin ciernych, co również wpływa na ich pylenie, mniejszy hałas oraz koszty modyfikacji (obróbki) powierzchni czarnej. Z przedstawionych trzech rozwiązań powierzchni czarnej na podstawie Metody Unitaryzacji Zerowanej MUZ najlepszym rozwiązaniem względem zaproponowanych kryteriów oceny jest tarcza z rowkiem spiralnym. Dla układów bardziej obciążonych cieplnie proponuje się tarcze z nawierceniami wzdłuż linii spiralnej.

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

BIBLIOGRAFIA

1. Kodeks UIC 541–3. *Hamulec–Hamulec tarczowy i jego zastosowanie. Warunki dopuszczenia okładzin hamulcowych.* Wydanie 7, czerwiec 2010.
2. Kukuła K., *Metoda unitaryzacji zerowej.* WNT, Warszawa 2000.
3. Strona internetowa:
<https://brakestock.pl/news/view-fazy-tuningu-hamulcow.html>
4. Strona internetowa:
<http://www.rgarage.pl/index.php/modyfikacje/brakes/tarcze-wiercone-czy-nacinane8>.
5. 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>
6. Sawczuk W., *Tarcza hamulcowa.* Zgłoszenie o udzielenie patentu oznaczonego numerem P.418361 z dnia 16.08.2016.
7. Szwabowski J., Deszcz J., *Metody wielokryterialnej analizy porównawczej. Podstawy teoretyczne i przykłady zastosowań w budownictwie,* Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2001.

Analysis of structural solution of surface new brake discs

Disc brakes are one of the most important components of the brake disc. Since the inception of this type of brake as a replacement for the drum brake, many brake discs have been developed. The superiority of the disc brake system over the classic drum brake is mainly due to the possibility of achieving higher braking power, friction material selection allowing for friction characteristics as a function of time and braking speed, and significantly better heat exchange conditions occurring during braking to the environment. Disc brakes subjected to higher loads use brake discs which, in addition to the ventilation between the friction rings, are additionally drilled or scored. Such constructions have a significant effect on the improvement of the braking process, especially at high thermal loads, which results in braking performance, but significantly affect the higher manufacturing costs and the tendency to surface cracks. The article presents several archimedean spiral-shaped brake discs as a solution that improves friction characteristics at low cost associated with their manufacture.

Autorzy:

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

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,