

Prof. dr hab. inż. Włodzimierz Gąsowski
Politechnika Poznańska
Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Pojazdów Szynowych
w Poznaniu
Mgr inż. Marian Kaluba
Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Pojazdów Szynowych
w Poznaniu

Trybologiczne badania okładziny ciernej hamulca tarczowego pojazdów szynowych

W pracy przedstawiono oryginalne wyniki badań zależności pomiędzy współczynnikiem tarcia i zużyciem okładziny hamulca tarczowego a prędkością pojazdu, naciskiem okładziny i temperaturą tarczy. Badania okładziny w skali naturalnej przeprowadzono w OBRPS na bezwładnościowym stanowisku spełniającym wymagania Międzynarodowego Związku Kolei (UIC).

1. Wprowadzenie.

Skuteczność procesu hamowania pojazdu szynowego hamulcem tarczowym jest w znacznym stopniu uwarunkowana charakterystyką trybologiczną okładziny ciernej.

W celu dobrego zaprojektowania układu hamulca potrzebna jest znajomość zmiany współczynnika tarcia w zależności od prędkości pojazdu, nacisku okładziny, temperatury tarczy oraz przebiegu zużycia okładziny w funkcji tych parametrów.

W ostatnich dwudziestu latach w Polsce coraz powszechniejsze zastosowanie w pojazdach szynowych – ze względu na swe zalety [1] – znajduje hamulec tarczowy, w skład którego wchodzi para cierna *okładzina-tarcza hamulcowa*. Rozwiązanie to rozdziela funkcje biegowe pojazdu i funkcje hamowania i rozpraszania energii hamowania, przez układ hamulcowy. Okazało się bowiem, że ze względów konstrukcyjnych nie da się poprawnie rozwiązać węzła konstrukcyjnego, jakim jest koło, by spełniało właściwie obie te funkcje jednocześnie w zakresie obciążeń mechanicznych i cieplnych, szcze-

gólnie przy zwiększonych prędkościach jazdy. Podczas toczenia się kół po szynie w płaszczyźnie ich styku pojawiają się naciski Hertza. Powodują one przekroczenie granicy plastyczności materiału na głębokości kilku milimetrów pod powierzchnią toczną kół. Naprężenia zredukowane, σ_ϕ , (rys 1) w tym obszarze są proporcjonalne do

$$\sqrt{\phi \frac{Q}{D}}$$

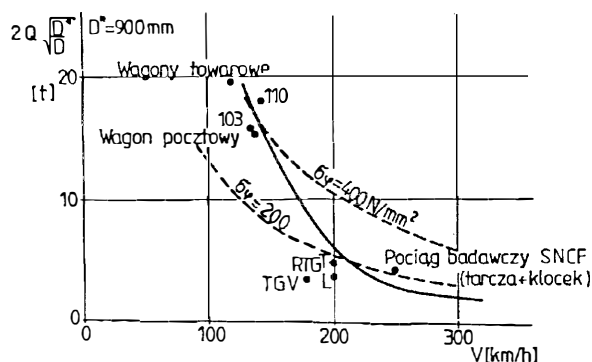
gdzie: ϕ – współczynnik zależny przede wszystkim od prędkości jazdy,

Q – obciążenie przypadające na koło,

D – średnica koła,

i osiągają wartość około 350N/mm^2 [4]. Natomiast strumień cieplny wpływający do koła, w wyniku działania hamulca klockowego, wywołuje w kierunku promieniowym wieńca koła gradient temperatury. Na skutek tego, podczas nagrzewania się wieńca koła, pojawia się malejący gradient naprężeń ściskających. Maksymalne naprężenia pojawiające się na powierzchni tocznej mogą osiągnąć nawet 400N/mm^2 i więcej [4]. Nałożenie się obu tych obciążeń prowadzi do prze-

kroczenia granicy plastyczności na powierzchni toczonej (na skutek czego po kilkudziesięciu intensywnych hamowaniach pojawia się siatka pęknięć termicznych) oraz pod powierzchnią toczną w okolicach maksymalnych naprężeń od naciśków Hertza (co jest przyczyną wykruszania się materiału tj. powstawania zjawiska pittingu powierzchni tocznej kół). Oba te obciążenia wyznaczają granicę stosowalności hamulca klockowego pokazaną na rys 1.



Rys.1 Graniczne obciążenia pary cierniej koło-kłosek żeliwnej pojazdów szynowych [4]

Rozwiązanie *klockowa wstawka hamulcowa-koło* jest więc wręcz niebezpieczne w przypadku zwiększonych energii pojazdów np. dla wagonów nowoczesnych zespołów trakcyjnych, dla wagonów towarowych przy zwiększonych naciskach na oś – większych niż 18t i zwiększonych prędkościach jazdy (większych niż 120km/h) oraz dla wagonów osobowych przy prędkościach większych niż 160km/h. Rozdzielenie funkcji biegowych i hamulcowego systemu trybologicznego (tzn. zastosowanie hamulca tarczowego) podnosi istotnie bezpieczeństwo pojazdów szynowych. Umożliwiło to podniesienie ich prędkości eksploatacyjnych, np. w pojazdach osobowych do 400 km/h. Tak znaczne podniesienie prędkości jazdy pojazdów szynowych stawia przed hamulcem tarczowym specjalne wymagania.

2. Wymagania dotyczące okładzin

Okładziny hamulca tarczowego współpracujące z tarczą hamulcową pojazdów szynowych muszą spełniać wysokie wymagania stabilności cierności (stałości współczynnika tarcia w funkcji nacisku, prędkości i temperatury) w bardzo szerokim zakresie zewnętrznych warunków eksploatacyjnych (zima, lato, śnieg, woda), warunków obciążeń (duża chwiloowa moc hamowania, długotrwałe hamowania na spadkach w obecności wysokiej temperatury tarczy oraz w warunkach nadzwyczajnych przeciążeń cieplnych hamulca). Spełnienie tych wymagań jest konieczne, ale nie dostateczne aby okładzina cierna mogła być dopuszczona do eksploatacji. Bez ekonomicznej opłacalności stosowania danego typu okładzin żaden zarząd kolejowy nie przyjmie ich do eksploatacji. Tak więc okładzina w warunkach eksploatacyjnych musi wykazać się bardzo dobrą odpornością na zużycie ($< 2\text{cm}^3/\text{kWh}$

w homologacyjnym cyklu badawczym). Ponadto nie może ona wywoływać negatywnych zjawisk we współpracy z tarczą, a szczególnie:

- miejscowych przegrzań tarczy, przyspieszających powstawanie pęknięć termicznych będących wynikiem niestabilności termosprężystej zogniskowanej [5],
- dymienia i nieprzyjemnego zapachu,
- iskrzenia,
- wtrąceń metalicznych (inkrustacji),
- dużej hałaśliwości (długotrwałych i głośnych pisków),
- nadmiernego zużycia tarczy hamulcowej, itp.

Żaden typ eksploatowanych okładzin nie spełnia całkowicie wszystkich wymienionych wymagań. Najczęściej parametry okładzin są rozsądnym kompromisem pomiędzy własnościami ciernymi (bezpieczeństwo), negatywnymi zjawiskami i ekonomią eksploatacji (zużyciem). Wszystkie podstawowe wymagania odnośnie do parametrów okładziny zostały sformułowane przez Podkomisję Hamulcową UIC i zawarte w karcie UIC 541-3 [6]. Okładziny, które uzyskają pomyślne wyniki badań według tej karty, mogą być stosowane do pojazdów szynowych o prędkości maksymalnej 200km/h w ruchu międzynarodowym. Powszechnie stosowane współczesne, kompozytowe, homologowane okładziny organiczne hamulca tarczowego wykazują quasistabilne współczynniki tarcia w funkcji nacisku okładziny i prędkości pojazdu. Zapewniają one relatywnie stałą skuteczność hamulcowego systemu pojazdu. Stabilność ta jest sprawdzana w badaniach homologacyjnych. Zakresy parametrów stosowanych w tych badaniach (masa pojazdu, prędkości i naciski) odnoszą się do pojazdów typu wagony osobowe.

W ramach prac prowadzonych w Ośrodku Badawczo-Rozwojowym Pojazdów Szynowych w Poznaniu, zastosowano hamulec tarczowy w nowoczesnych wagonach towarowych o dużej ładowności i dużych prędkościach jazdy, w zespołach trakcyjnych podmiejskich i dalekobieżnych oraz innych prototypowych pojazdach. W związku z powyższym zaistniała potrzeba identyfikacji parametrów trybologicznych powszechnie w Polsce stosowanej okładziny cierniej hamulca tarczowego FR20H.2. Chodzi szczególnie o zbadanie dotychczas nie określonych przebiegów współczynników tarcia i zużycia w zakresie bardzo małych obciążeń (próżne wagony towarowe) jak i dużych obciążeń, występujących w ładownych wagonach towarowych i zespołach trakcyjnych wyposażonych w jedną tarczę przypadającą na zestaw kołowy.

3. Program i cel badań

W celu uzyskania wymaganych przez projektantów i użytkowników taboru informacji na temat skutków procesów tarcia w konkretnych pojazdach, zastosowano metodę parametrycznego badania procesu tarcia i zużycia rzeczywistych obiektów trybologicznych (okładzina, tarcza hamulcowa) na bezwładnościowym stanowisku do badań hamulców.

Metoda badania parametrycznego polega na zdefiniowaniu pary cierniej w postaci okładziny i tarczy, wielkości obciążeń, prędkości, warunków otoczenia oraz na badaniu obiektu

trybologicznego w wielkości naturalnej od zewnątrz tj. dokonując pomiarów całościowych (prędkości, nacisku, sił tarcia, zużycia, temperatur itp.) bez wnikania w fizyko-chemiczne procesy i zjawiska elementarne oraz ich współzależności i sprzężenia zwrotne między nimi [2, 3]. Badania takie, z punktu widzenia konstrukcji i eksploatacji, prowadzą do całościowego opisu procesu tarcia i nie wymagają od badającego szczegółowej wiedzy z zakresu procesów elementarnych składających się na zjawisko tarcia.

Badania identyfikacyjne eksploatowanej przez PKP okładzi-

ny ciernej FR20H.2 (4×200cm²) przeprowadzono w OBRPS-Poznań na stanowisku bezwładnościowym z przewietrzaną tarczą $\phi 640 \pm 110$ według programu badań przedstawionego w tabeli 1. Mierzone wielkości i tory pomiarowe były zgodne z wymaganiami stawianymi przez kartę UIC 541-3 podczas badań homologacyjnych okładzin ciernych.

Celem badań było ustalenie charakteru zmian współczynnika tarcia (μ) i wartości zużyć właściwych (C [g/kWh]) w całym zakresie stosowanych parametrów ruchu pojazdów szynowych.

Tabela 1

Program identyfikacyjnych prób trybologicznych okładziny dla pojazdów szynowych						
I. Warunki ogólne						
Układ hamulca zgodny z kartą UIC 541-3. Kształt okładziny zgodny z załącznikiem 1a w/w karty. Tarcza hamulcowa firmy BSI $\phi 640 \times 110$ mm przewietrzana z żebrami promieniowymi. Modelowana średnica koła $\phi 890$ mm. Obliczeniowy promień hamowania (promień przyłożenia siły nacisku) $r_H = 247$ mm. Czas narastania nacisku okładziny do wartości 95% wartości maksymalnej $3 \pm 0,2$ s.						
II. Sposób prowadzenia prób						
Nowe okładziny należy dotrzeć do min. 70% powierzchni tarcia okładziny zgodnie z warunkami docierania określonymi w programie nr 2 wg karty UIC 541-3. Po dotarciu wykonać po 20 hamowań 13-to sekundowych ze stałymi naciskami i prędkościami modelowanego pojazdu, rozpoczynając je od stałej temperatury tarczy (Wartości w/w parametrów w tabeli poniżej). Próby rozpocząć od najmniejszych prędkości i nacisków. Przed i po próbach ze stałymi parametrami hamowania wykonać ważenie oczyszczonych okładzin w celu określenia zużycia z dokładnością 1g. W przypadku stwierdzenia zużycia mniejszego od 3g, wykonać należy kolejne 20 prób z tymi samymi parametrami. W przypadku dużych zużyć okładziny (powyżej 10-15g) ilość prób w kolejnych seriach zmniejszyć o połowę. Po próbie z prędkością 200km/h wykonać dodatkowo 20 prób z prędkością 50km/h z kolejnym większym naciskiem w celu „odnowienia” warstwy wierzchniej okładziny przed próbami właściwymi z tymi parametrami. Określić średni współczynnik tarcia, zużycie właściwe [g/kWh], zużycie jednostkowe [g/s] oraz średnią temperaturę końca próby.						
III. Parametry prób						
Σ nacisków okładzin na tarczę (kN)	Prędkość pojazdu (km/h)					
	50	80	120	140	160	200
8						
16						
24						
32						
40						
44						
Próby z wyżej przedstawionymi parametrami wykonać dla temperatury początkowej tarczy 50°C, 100°C, 150°C, 200°C i 250°C						

4. Matematyczny opis badanego procesu zużycia

W oparciu o prace innych badaczy [3, 5] przyjęto, że wartość zużycia okładzin Z zależy będzie od pracy tarcia (tzn. od iloczynu mocy hamowania i czasu hamowania):

Zakładając wstępnie liniową zależność zużycia od mocy hamowania i czasu hamowania,

$$Z = f(P \cdot t_H), \quad (1)$$

zużycie jednostkowe okładziny można opisać zależnością:

$$z = \frac{Z}{t_H} = \frac{C}{3600} \mu_a N \frac{V}{3,6} \frac{r_H}{r_K} \quad (2)$$

gdzie: z [g/s] – zużycie jednostkowe badanego kompletu okładziny,

C [g/kWh] – stała charakteryzująca materiał okładziny (zużycie właściwe materiału okładziny),

μ_a [-] – średni współczynnik tarcia,

N [kN] – suma nacisku okładziny na tarczę,

V [km/h] – prędkość pojazdu,

r_H [m] – promień hamowania,

r_K [m] – promień koła pojazdu.

W wyniku przeprowadzonych badań, na podstawie pomierzonego: zużycia okładziny Z , średniego współczynnika tarcia μ_a , sumy nacisków okładziny na tarczę N i modelowanej prędkości pojazdu V , wyznaczono dla poszczególnych parametrów ruchu (zgodnie z programem badań) wartości zużycia właściwego materiału okładziny:

$$C = \frac{Z}{\Sigma E} \quad (3)$$

gdzie: ΣE – suma energii rozproszonej w serii prób hamowania z określonymi parametrami. Zależność na ΣE przyjmie postać:

$$\sum_{i=1}^n E_i = \frac{r_H}{r_K} \sum_{i=1}^n (V_i \cdot N_i \cdot t'_{Hi} \cdot \mu_{ai}), \quad (4)$$

gdzie: V_i , N_i – parametry kolejnej próby,

t'_{Hi} – ekwiwalentny czas hamowania w kolejnej próbie,

μ_{ai} – średni współczynnik tarcia w i -tej próbie,

n – ilość prób w serii.

Próby przeprowadzano w taki sposób, aby V , N , t_H były stałe dla prób w danej serii. W związku z tym można zapisać:

$$\sum_{i=1}^n E_i = V \cdot N \cdot t'_H \cdot \frac{r_H}{r_K} \sum_{i=1}^n \mu_{ai}. \quad (5)$$

Średni współczynnik tarcia dla danej próby wyznaczano z zależności:

$$\mu_{ai} = \frac{\int_S \mu_j dS}{S} = \frac{1}{S} \sum_{j=1}^k \mu_j \cdot S_j \quad (6)$$

gdzie: μ_j – chwilowy współczynnik tarcia określony podczas próby jako stosunek chwilowej zmierzonej siły hamowania do chwilowej zmierzonej sumy siły nacisku,

S – droga hamowania w próbie,

S_j – wielkość drogi zmierzonej w czasie próbkiowania,

k – ilość pomiarów w próbie.

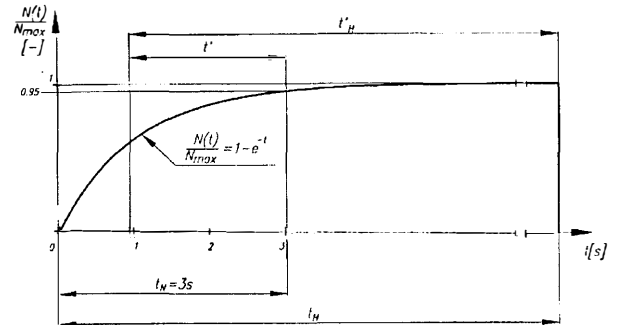
Aby można było w prosty sposób określić ekwiwalentny czas hamowania t'_H , zaprogramowano na stanowisku badaw-

czym sposób narastania siły nacisku w funkcji czasu według zależności:

$$N(t) = N_{\max}(1 - e^{-t}), \quad (7)$$

gdzie: t – bieżący czas próby hamowania.

Czas narastania siły nacisku od zera do 0,95 wartości maksymalnej według wyżej przedstawionej zależności wynosi $t_N = 3$ s. Przebieg funkcji $N(t)/N_{\max}$ przedstawiono na rys.2.



Rys. 2 Przebieg narastania siły nacisku okładzin w funkcji czasu podczas badań trybologicznych

Ekwiwalentny czas hamowania dla przedstawionego przypadku przyjmie postać:

$$t'_H = t_H - t_N + t'$$

gdzie:

$$t' = \int_0^{t_N} (1 - e^{-t}) dt = t_N + e^{-t_N} - 1 \quad (8)$$

czyli

$$t'_H = t_H + e^{-t_N} - 1 \quad (9)$$

Dla czasu hamowania $t_H = 13$ s i $t_N = 3$ s ekwiwalentny czas hamowania wynosi $t'_H = 12,05$ s. Dla $t_H \equiv 12$ s, $r_H = 247$ mm, $r_K = 445$ mm suma energii w serii prób wyniesie:

$$\sum_{i=1}^n E_i = 5,14 \cdot 10^{-4} \cdot V \cdot N \cdot \sum_{i=1}^n \mu_{ai} \quad (10)$$

gdzie: ΣE [kWh], V [km/h], N [kN].

5. Uzyskane wyniki z badań

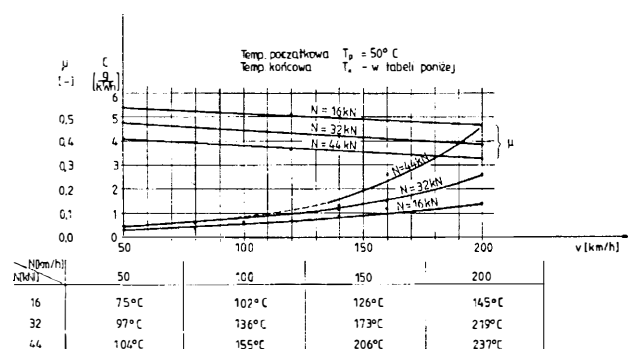
Na rys.3 i 4 przedstawiono uzyskane w badaniach przebiegi średniego współczynnika tarcia okładziny oraz wartości zużycia właściwego C (3) dla wybranych nacisków na okładzinę, w funkcji prędkości pojazdu. Natomiast na rys.5 i 6 przedstawiono przebiegi średniego współczynnika tarcia okładziny i zużycia właściwego dla wybranych prędkości w funkcji sumy nacisków okładziny na tarczę hamulcową. Rys.3 i 5 przedstawia przebiegi uzyskane dla temperatury początkowej tarczy $T_p = 50^\circ\text{C}$, a rys.4 i 6 dla temperatury $T_p = 200^\circ\text{C}$. Pod wykresami zamieszczono zestawienie średnich temperatur końcowych tarczy w próbach dla wybranych prędkości (rys.3 i 4) oraz dla wybranych nacisków na okładzinę (rys.5 i 6).

Przestrzenny przebieg współczynnika tarcia w funkcji nacisku okładziny i prędkości pojazdu dla temperatury początko-

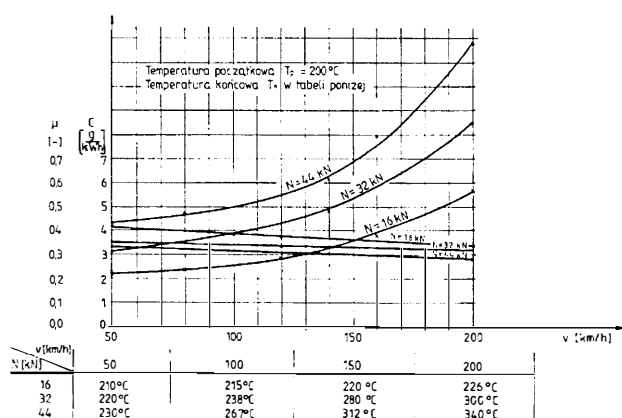
wej tarczy $T_p=50^{\circ}\text{C}$ i $T_p=200^{\circ}\text{C}$ przedstawiono na rys.7 i 8. Natomiast na rys.9 i 10 przedstawiono przestrzenny przebieg zużycia właściwego C w funkcji nacisku okładziny i prędkości pojazdu dla temperatury $T_p=50^{\circ}\text{C}$ i $T_p=200^{\circ}\text{C}$.

6. Omówienie wyników i wnioski

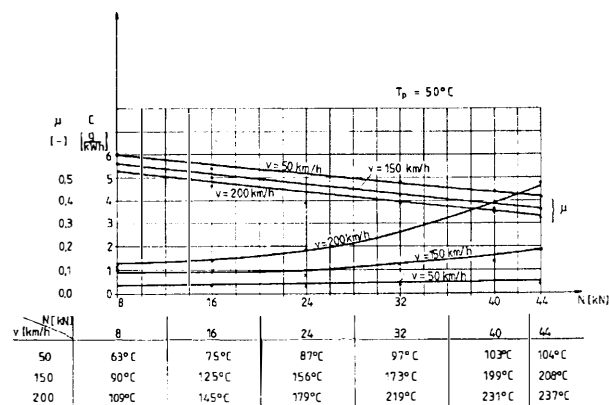
Z analizy zmierzonych w czasie prób wielkości wynika, że przebieg współczynnika tarcia dla zimnej tarczy ($T_p=50^{\circ}\text{C}$) i dla małych nacisków i prędkości przekracza wartość 0,4 a dla dużych, krótkotrwałych obciążeń cieplnych (duży nacisk i duża prędkość), spada do wartości 0,35. Dla tarczy gorącej ($T_p=200^{\circ}\text{C}$) współczynnik tarcia okładziny jest bardzo stabilny w całym zakresie badanych prędkości i nacisków, a jego wartości mieszczą się w granicach wymaganych kartą UIC 541-3. Biorąc pod uwagę, że hamowania z zimną tarczą występują krótko (początek każdego procesu hamowania) można stwierdzić, że współczynnik tarcia okładziny jest stabilny w całym zakresie parametrów eksploatacyjnych dla typowych



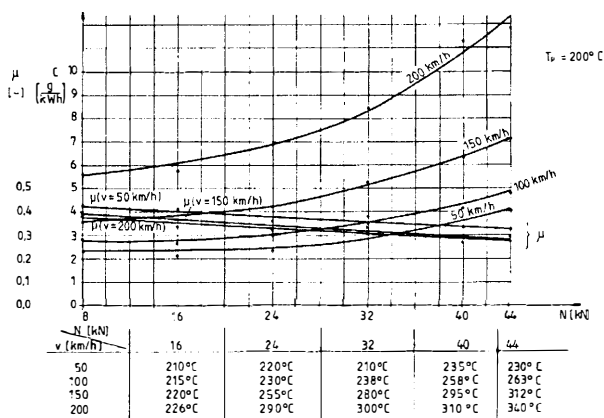
Rys.3 Przebieg średniego współczynnika tarcia oraz wartości zużycia właściwego okładziny FR20H.2 w funkcji prędkości pojazdu dla temperatury początkowej tarczy 50°C .



Rys.4 Przebieg średniego współczynnika tarcia oraz wartości zużycia właściwego okładziny FR20H.2 w funkcji prędkości pojazdu dla temperatury początkowej tarczy 200°C .



Rys.5 Przebieg średniego współczynnika tarcia oraz wartości zużycia właściwego okładziny FR20H.2 w funkcji sumy nacisków okładziny dla temperatury początkowej tarczy 50°C .

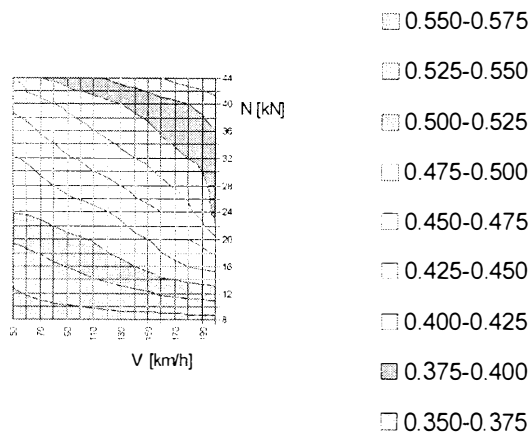
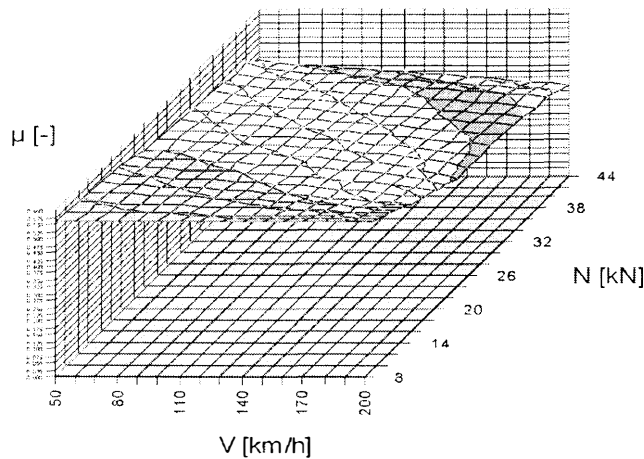


Rys.6 Przebieg średniego współczynnika tarcia oraz wartości zużycia właściwego okładziny FR20H.2 w funkcji sumy nacisków okładziny dla temperatury początkowej tarczy 200°C .

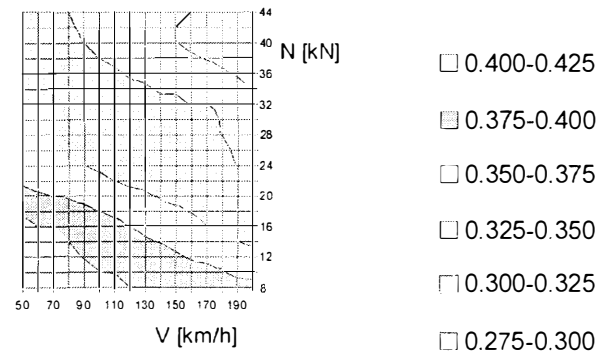
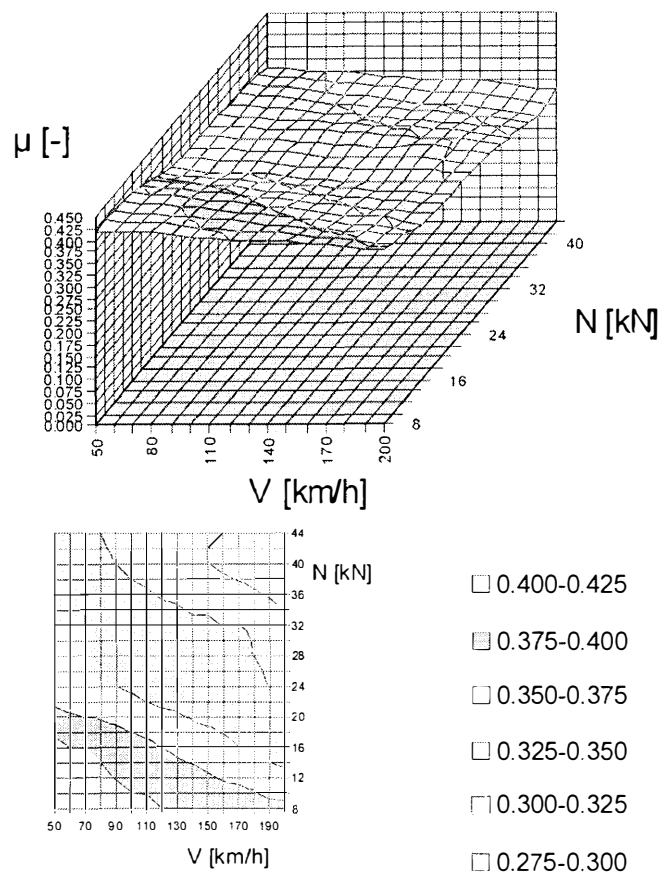
wagonów osobowych, co potwierdzają próby homologacyjne okładziny. W zakresie bardzo niskich nacisków okładziny, niewielkich prędkości i temperatury tarczy stwierdzony wzrost współczynnika tarcia będzie można uwzględnić w układach hamulcowych poprzez odpowiednią regulację sterującej aparatury pneumatycznej hamulca. Odnosi się to szczególnie do wagonów towarowych w stanie próżnym, dla których w hamowaniach pełnych trzeba będzie stosować relatywnie niskie naciski okładzin na tarczę. Wyniki badań wykazały, że dla bardzo dużych obciążeń cieplnych należy liczyć się z niewielkim spadkiem współczynnika tarcia, (który można będzie również skompensować odpowiednim doborem parametrów aparatury pneumatycznej) oraz zwiększonym zużyciem okładzin.

Odnosnie przebiegu zużycia okładzin należy stwierdzić, że gdyby prawdziwa była liniowa zależność zużycia okładziny w funkcji pracy hamowania to zużycie właściwe (C) musiałoby być stałą w zależności (2). Badania nie potwierdziły tego założenia. Zużycie właściwe zależy najslabiej od nacisku, następnie od prędkości i silnie od temperatury tarczy (rys.3, 4, 5 i 6). Zależności te mają charakter wykładniczy. Szczególnie duży wzrost zużycia właściwego okładziny stwierdzo-

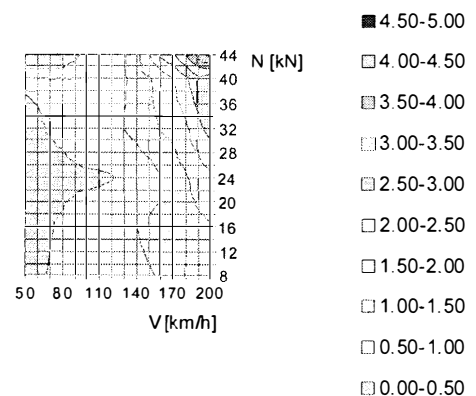
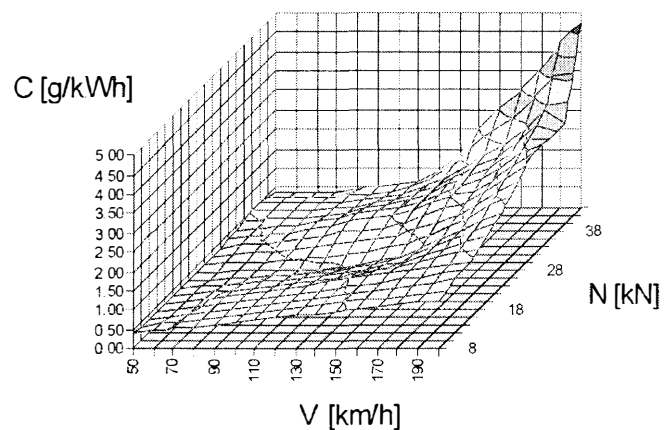
no podczas prób w podwyższonych temperaturach i z dużą prędkością pojazdu. Tak więc dla ładownych wagonów towarowych wystąpi nieco zwiększone zużycie okładzin, co w zasadzie jest zjawiskiem normalnym. Natomiast w pojazdach o bardzo dużej prędkości maksymalnej lub w pojazdach ciężkich, wyposażonych w jedną tarczę hamulcową na zestawie kołowym (np. zespoły trakcyjne), należy liczyć się z dość znacznym zużyciem okładzin. W takim przypadku zastosowanie tego typu rozwiązania będzie uzasadnione tylko wówczas, gdy pojazd wyposażony będzie w wydajny hamulec elektrodynamiczny, a hamulec trybologiczny pojazdu będzie służyć tylko jako hamulec wspomagający i awaryjny.



Rys.7 Przebieg wartości współczynnika tarcia dla temperatury początkowej tarczy 50°C.

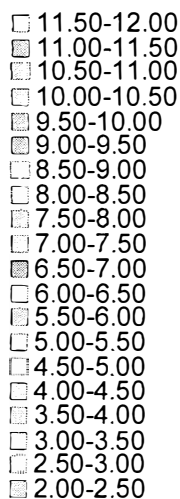
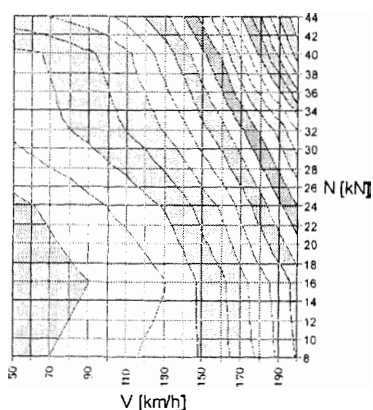
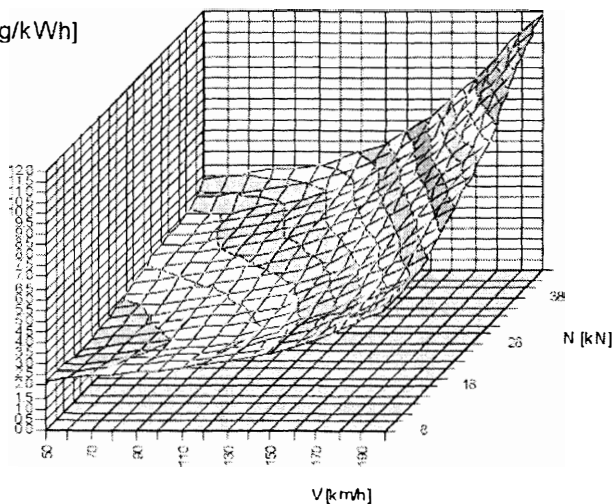


Rys.8 Przebieg wartości współczynnika tarcia dla temperatury początkowej tarczy 200°C



Rys.9 Przebieg wartości zużycia właściwego materiału okładziny FR20H.2 dla temperatury początkowej tarczy 50°C.

C [g/kWh]



Rys.10 Przebieg wartości zużycia właściwego materiału okładziny FR20H.2 dla temperatury początkowej tarczy 200°C.

Przeprowadzone próby trybologiczne okładziny FR20H.2 umożliwiły uzyskanie po raz pierwszy kompleksowych danych w zakresie przebiegu jej współczynnika tarcia i zużycia w funkcji prędkości pojazdu, nacisku okładziny i temperatury tarczy. Dane te przydatne będą przy projektowaniu różnych typów pojazdów szynowych i umożliwią prognozowanie w dowolnych cyklach eksploatacyjnych (przejazdach teoretycznych) ekonomiczności eksploatacji pojazdów wyposażonych w hamulec tarczowy oraz w przyszłości mogą stać się punktem wyjściowym dla innych badań trybologicznych hamulca tarczowego.

Literatura:

- [1] Gąsowski W.: *Wagony kolejowe – konstrukcja i badania*. WKŁ. Warszawa 1988.
- [2] Janecki J., Hebda M.: *Tarcie, smarowanie i zużycie części maszyn*. WNT Warszawa 1972.
- [3] Lawrowski Z.: *Trybologia. Skrypt Politechniki Wrocławskiej*, Wrocław 1985.
- [4] Saumweber E.: *Leistungsgrenzen Kombierter Bremssysteme*. ZEV-Glasers Annalen nr 7/8, 1974.
- [5] Ścieszka S. F.: *Hamulce cierne*. Wydawnictwo Instytutu Technologii i Eksploatacji. Gliwice-Radom 1998.
- [6] *Hamulec tarczowy i okładziny hamulcowe. Warunki ogólne dla prób na stanowisku badawczym. Karta UIC 541-3VE*. 4-te wydanie, 1.07.1993.