

Dr inż. Marian Kaluba
Ośrodek Badawczo-Rozwojowy
Pojazdów Szynowych w Poznaniu

Zużycie okładzin ciernych hamulca tarczowego pojazdów szynowych

Okładzina cierna jest zużywającym się elementem układu hamulca tarczowego rozpraszającego energię pojazdu. Szybkość zużywania się okładzin pojazdu szynowego ma podstawowe znaczenie ekonomiczne podczas jego eksploatacji. W artykule opisano sposób opracowania wyników badań identyfikujących zużycie okładziny podczas badań na bezwładnościowym stanowisku badawczym. Przedstawiono również próbę opisanie matematycznego tego zjawiska dla przebadanych okładzin FR20H.2 powszechnie eksploatowanych na PKP.

1. Wprowadzenie

W ostatnich latach w pojazdach szynowych hamulec klockowy wypierany jest przez hamulec tarczowy. Aktualnie nie buduje się już wagonów osobowych z hamulcem klockowym. Ze względu na swoje zalety [1] hamulec tarczowy stosowany jest także w nowoczesnych pojazdach trakcyjnych a nawet w niektórych wagonach towarowych. Wobec powszechności stosowania, mimo większej odporności na zużycie hamulca tarczowego w porównaniu z hamulcem

klockowym, użytkownik coraz bardziej interesuje się okładzinami o dużej odporności na zużycie. Zarządy kolejowe Europy nie chcą już stosować okładziny o średnim zużyciu 2g na kWh rozpraszanej energii pojazdu (uzyskanym w próbach według programu nr 2 według Kart UIC 541-3 [2]). W związku z powyższym rozwój metod badań zużycia okładzin ciernych i same badania będą miały w przyszłości istotne znaczenie przy wyborze okładzin i ocenie ich właściwości trybologicznych.

2. Badania identyfikacyjne okładziny

Badania identyfikujące parametry eksploatacyjne okładziny w skali 1:1 z rzeczywistą tarczą hamulcową przeprowadzone zostały przez OBRPS w Poznaniu na homologowanym w UIC bezwładnościowym stanowisku do badań okładzin. Próby wykonano powszechnie stosowaną na PKP parą cierną składającą się z okładziny FR20H.2 (4x200cm²) i wentylowanej typowej tarczy hamulcowej żeliwnej firmy BSI o średnicy 640mm i szerokości 110mm. Naciski okładziny, prędkość i warunki prób realizowano według „Programu identyfikacyjnych prób trybologicznych okładziny dla pojazdów szynowych” [3], który opracowano tak, by obejmował cały zakres parametrów pary cierniej występujący podczas eksploatacji wszelkich pojazdów szynowych. Uzyskane wyniki z tych badań przedstawiono w pracy [3].

3. Matematyczny opis badanego procesu zużycia

Zgodnie z przewidywaniami zużycie okładzin zależało nie tylko od rozpraszanej energii ale również od temperatury pary cierniej (mierzonej 1mm pod powierzchnią tarcia tarczy) tj.

$$Z = f(E, T) \quad (1)$$

gdzie: Z – zużycie okładziny,

E – energia hamowania,

T – temperatura pary cierniej.

Można więc przyjąć na wstępie, że zużycie okładziny jest proporcjonalne do współczynnika proporcjonalności, którego wielkość zależy od własności materiału ciernego okładziny tj. zużycia właściwego okładziny, energii rozproszonej w procesie hamowania oraz od krotności przyrostu temperatury pary cierniej wobec najmniejszej temperatury w trakcie badań identyfikacyjnych ($T_0 = 50^\circ\text{C}$), dla której wyznacza się wielkość zużycia właściwego. Przyjmując takie założenie można zapisać:

$$Z = C \cdot P \cdot t_H \cdot \frac{T}{T_0} \quad (2)$$

gdzie: C [g/kJ] – stała charakteryzująca materiał okładziny (zużycie właściwe okładziny dla temperatury referencyjnej tarczy $T_0 = 50^\circ\text{C}$)

$P = \mu(N, v) \cdot N \cdot v$ [kW] – moc hamowania,

t_H [s] – czas hamowania,

T [$^\circ\text{C}$] – temperatura tarczy,

T_0 [$^\circ\text{C}$] – temperatura referencyjna tarczy,

$\mu(N, v)$ [–] – współczynnik tarcia okładziny po tarczy, będący funkcją nacisku okładziny N i prędkości poślizgu okładziny po tarczy v ,

N [kN] – nacisk okładziny na tarczę,

v [m/s] – prędkość względna tarczy i okładziny.

Szybkość zużycia [g/s] okładziny przyjmie więc postać:

$$z = \frac{Z}{t_H} = C \cdot \mu \cdot N \cdot v \cdot \frac{T}{T_0} \quad (3)$$

Uzyskane wyniki z badań przedstawione w [3] wykazały, że szybkość zużycia okładzin zależy najslabiej od nacisku, następnie od prędkości i silnie od temperatury tarczy. Zależność szybkości zużycia okładziny będzie więc funkcją typu wykładniczego wymienionych zmiennych.

Szczególnie duży wzrost szybkości zużycia stwierdzono podczas prób z dużymi naciskami i prędkościami przy podwyższonej temperaturze tarczy. Również zwiększone zużycie stwierdzono podczas badań identyfikacyjnych okładziny dla prędkości mniejszych (do 160km/h) i z niewielkimi naciskami (8kN i 16kN) ale dla badań wykonanych bezpośrednio po próbach z prędkością 200km/h i z relatywnie dużymi naciskami. Tłumaczyć to można tym, że po próbach z prędkością 200km/h, wykonanie (zgodnie z programem badań) 20-tu hamowań w celu „odnowienia” warstwy wierzchniej okładziny było niewystarczające. Spowodowane to jest tym, że warstwa wierzchnia okładziny po współpracy tarciowej w podwyższonej temperaturze ze znacznym obciążeniem cieplnym tj. przy dużych prędkościach i naciskach, wykazuje znaczne zorientowanie cząsteczek materiału okładziny i formowanie lameli. Przy bardzo dużych obciążeniach cieplnych, na powierzchni tarcia okładziny stwierdzono pojawianie się warstwy grafitopodobnego materiału o znacznym stopniu amorfizacji. Zjawisko tworzenia takiej warstwy wierzchniej występuje dlatego, że przy dużych prędkościach przyrosty temperatury na powierzchni styku mikronierówności pary cierniej (ze względu na małą rzeczywistą powierzchnię styku przy tych prędkościach) są bardzo duże, przewyższające temperaturę destrukcji polimerów wiążących okładzinę. Prowadzi to do intensywnego utleniania materiału okładziny i cieplnego niszczenia jej warstwy wierzchniej. Intensywność tych procesów zależy od wartości rzeczywistego strumienia cieplnego wnikażącego do okładziny w trakcie hamowania:

$$q_{H_0} = \mu_j \cdot p_r \cdot v \cdot \alpha_0 \quad (4)$$

gdzie: μ_j – chwilowy współczynnik tarcia,

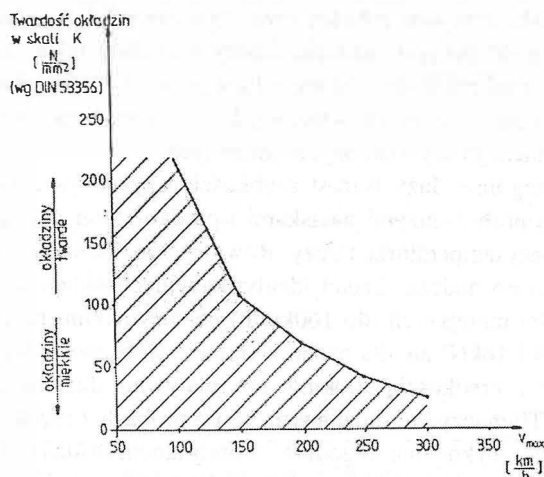
p_r – rzeczywisty nacisk jednostkowy okładziny na tarczę (w punktach rzeczywistego kontaktu),

v – prędkość poślizgu okładzina–tarcza,

α_0 – współczynnik rozdziału strumienia cieplnego (dla okładziny, pomiędzy tarczą i okładziną).

Rzeczywista wartość powierzchni styku okładziny i tarczy dla hamulca tarczowego pojazdów szynowych wyraźnie maleje z prędkością pojazdu. Jest to spowodowane usztywnieniem się okładziny na skutek tarcia wewnętrznego jej materiału na skutek szybkozmiennych chwilowych nacisków (zwiększenie się twardości okładziny podczas hamowania). Potwierdzać to może zależność pokazana na rys. 1.

Zmniejszanie się rzeczywistej powierzchni styku podczas hamowania z dużą prędkością prowadzi do zwiększenia strumienia cieplnego i tym samym do wyraźnego wzrostu temperatury rzeczywistej powierzchni tarcia. Zużycie w takim przypadku ma przede wszystkim charakter zużycia cieplnego, ale również zmęczeniowego, ściernego i delaminacyjnego.



Rys. 1. Graniczna twardość organicznych okładzin kolejowych w funkcji prędkości pojazdu, nie powodująca niestabilności termosprężystej zogniskowanej tarcz [5].

go przez odwarstwienie (równoległe do powierzchni tarcia) materiału grafitopodobnego doprowadzając do ścinania jego warstewek (płytek) słabo związanych z rodzimym materiałem okładziny. Zużywanie się warstwy wierzchniej słabo związanej z materiałem okładziny, jak wykazały przeprowadzone badania, rozłożone jest na kilkadziesiąt hamowań o niskich parametrach ruchowych (N i v) następujących po hamowaniach z prędkości 200 km/h. Objawiło się to zwiększonym zużyciem okładziny podczas hamowań z niskimi naciskami okładziny (8 i 16 kN) i relatywnie niedużą prędkością v .

Podczas badań identyfikacyjnych należałoby wykonać kilkakrotnie więcej hamowań kondycjonujących okładzinę (prawdopodobnie około 100) po serii hamowań z prędkości 200 km/h w celu zużycia (odnowienia) zniszczonej, dość grubej warstwy wierzchniej okładziny.

W trakcie normalnej eksploatacji okładzin w pojazdach szynowych występuje duża zmienność (dynamika) obciążeń okładziny. Wynik badań unaoczniał więc złożoność mechanizmu zużycia, jaki prawdopodobnie występuje podczas eksploatacji hamulca na pojeździe.

Biorąc powyższe pod uwagę, wydaje się celowe podjęcie w przyszłości prac badawczych wyjaśniających bliżej dynamikę zmian własności zużyciowych warstwy wierzchniej, znajdującej się w różnym stanie destrukcji.

Wobec stwierdzenia wykładniczej zależności podstawowych parametrów hamowania (N , v , T) na proces zużycia dla zdefiniowanej na wstępie pary ciernej, zaproponowałem zmienioną zależność na szybkość zużycia badanej okładziny:

$$z = \frac{C}{3600} \cdot \mu_a \cdot N^a \cdot v^b \cdot \left(\frac{T}{T_0} \right)^c \quad (5)$$

gdzie: z [g/s] – szybkość zużywania się okładzin (zużycie kompletu okładzin w jednostce czasu),
 C [g/kWh] – stała – zużycie właściwe dla danego materiału okładziny dla temperatury T_0 oraz najmniejszego N i v ,

μ_a [–] – średni współczynnik tarcia pomiędzy okładziną i tarczą,

N [kN] – nacisk okładzin na tarczę,

$v = V \cdot \frac{r_H}{3,6 \cdot r_K}$ [m/s] – średnia prędkość poślizgu okładzina–tarcza

(V [km/h] – prędkość pojazdu,

r_H [m] – promień hamowania,

r_K [m] – promień koła),

T [°C] – temperatura tarczy (mierzona, jak opisano w [4]),

T_0 [°C] – temperatura referencyjna dla przeprowadzonych badań (50°C),

a , b , c [–] – wykładniki charakterystyczne dla danego typu materiału okładziny, określające wpływ nacisku, prędkości i temperatury tarczy na wielkość szybkości zużycia.

4. Opracowanie wyników badań zużycia okładziny

Chcąc wyznaczyć równanie regresji w wyżej przedstawionej formie (wyznaczyć wykładniki a , b i c) na podstawie wyników z badań identyfikacyjnych okładziny, w których jedynie prędkość nie ulegała zmianie, należało wyznaczyć ekwiwalentny czas hamowania (ze względu na wpływ zmienności nacisku w funkcji czasu na pomierzone zużycie okładziny) oraz ekwiwalentną temperaturę próby, która zmieniała się od temperatury początkowej tarczy (T_p) do temperatury końcowej (T_k).

4.1 Ekwiwalentny czas hamowania (dla wyznaczenia szybkości zużycia okładziny)

Zakładając, że badamy szybkość zużycia [g/s] w zależności jedynie od nacisku (inne parametry są stałe) zależność (5) przyjmie postać:

$$z = C_2 \cdot N^a \quad (6)$$

Przebieg nacisku okładzin podczas prób identyfikacyjnych został tak zaprogramowany na stanowisku badawczym (dla czasu napełniania cylindra $t_N = 3$ s), że zmieniał się w funkcji czasu według zależności $N(t) = N_{\max}(1 - e^{-t})$ i dlatego szybkość zużycia przyjmie postać:

$$z(t) = C_2 \cdot N_{\max}^a \cdot (1 - e^{-t})^a \quad (7)$$

Całkowite zużycie [g] kompletu okładzin w czasie napełniania t_N cylindrów hamulcowych wyniesie:

$$Z_N = C_2 \cdot N_{\max}^a \int_0^{t_N} (1 - e^{-t})^a dt \quad (8)$$

Ekwiwalentny czas hamowania określony jest zależnością [3]:

$$t'_H = t_H - t_N + t' \quad (9)$$

gdzie: t_H – czas próby,

t_N – czas napełnienia cylindra (narastania siły nacisku do 95% wartości maksymalnej podczas próby),

t' – ekwiwalentny czas „napełnienia cylindrów”,

czyli dla rozpatrywanego przypadku t' wyznaczyć można z zależności:

$$t' = \frac{Z_N}{Z_{N_{\max}}} \quad (10)$$

gdzie: $Z_{N_{\max}} = C_2 \cdot N_{\max}^a$

Ostatecznie ekwiwalentny czas napełnienia cylindrów wyniesie:

$$t' = \int_0^{t_N} (1 - e^{-t})^a dt \quad (11)$$

Całka ta dla dowolnego a nie jest rozwiązywalna analitycznie, więc dla przewidywanej z badań wielkości a ($a \approx 0,8$) wyznaczono t' metodą całkowania numerycznego ($t' \approx 2,23s$). Przyjmując $t' \approx 2,2s$, ekwiwalentny czas hamowania (9) dla czasu napełnienia cylindrów $t_N = 3s$ i całkowitego czasu hamowania $t_H = 13s$ przyjętego dla prób identyfikacyjnych wyniesie $t'_H \approx 12,2s$. Czas ten posłużył do wyznaczenia szybkości zużycia okładziny (z) z badań według zależności:

$$z = \frac{Z}{t'_H} \quad (12)$$

gdzie: Z [g] – zużycie kompletu okładzin w czasie hamowania t_H .

4.2 Ekwiwalentna temperatura próby (dla wyznaczenia szybkości zużycia okładziny)

Zakładając, że badamy szybkość zużycia okładziny [g/s] w zależności jedynie od temperatury tarczy [inne parametry w zależności (5) są stałe], można zapisać:

$$z = C_3 \cdot \left(\frac{T}{T_0} \right)^c \quad (13)$$

W serii prób możemy określić jedynie sumaryczne zużycie okładziny i z niego wyznaczyć średnią szybkość zużywania się okładzin. Zakładając, że wzrost temperatury w próbie jest liniowy oraz korzystając z definicji wartości średniej funkcji w granicach T_p i T_k wartość średnia szybkości zużycia okładziny wyniesie:

$$z_{sr} = \frac{1}{T_k - T_p} \int_{T_p}^{T_k} C_3 \left(\frac{T}{T_0} \right)^c dT \quad (14)$$

$$z_{sr} = \frac{C_3}{(T_k - T_p) T_0^c} \cdot \left[\frac{T_k^{(c+1)} - T_p^{(c+1)}}{c+1} \right] \quad (15)$$

Temperaturę ekwiwalentną T' , odpowiadającą średniej (wyznaczonej z badań) szybkości zużycia okładzin, wyznaczyć można z równania powstałego z porównania ze sobą zależności (13) i (15):

$$C_3 \left(\frac{T'}{T_0} \right)^c = \frac{C_3}{(T_k - T_p) T_0^c} \cdot \left[\frac{T_k^{(c+1)} - T_p^{(c+1)}}{c+1} \right] \quad (16)$$

Ekwiwalentne temperatury wyznaczono z równania (16) dla wstępnie ocenionej wartości $c \approx 3$ według zależności:

$$T' = \left[\frac{T_k^{(c+1)} - T_p^{(c+1)}}{(T_k - T_p)(c+1)} \right] \quad (17)$$

Biorąc za podstawę hipotezę przedstawioną zależnością (5) wszystkie uzyskane wyniki z badań przedstawione w [3] (przyjmując ekwiwalentny czas hamowania i ekwiwalentną temperaturę, wyznaczone według zależności przedstawionych wyżej), wykonano przy pomocy programu komputerowego SigmaPlot 3.0 obliczenia wykładników a , b i c iteracyjną metodą najmniejszych kwadratów. Dla zużycia właściwego $C = 0,33g/kWh$ i $T_0 = 50^\circ C$ uzyskano następujące wyniki:

$$a = 0,652$$

$$b = 1,199$$

$$c = 2,402$$

przy czym odchylenie standardowe wyznaczonych wielkości wyniosło odpowiednio: $\sigma_a = 0,0934$, $\sigma_b = 0,0795$, $\sigma_c = 0,142$. Współczynnik korelacji zaproponowanego równania regresji (5) z wyżej wyznaczonymi wykładnikami względem wyników z badań wyniósł $r = 0,811$, co wskazuje na silny związek pomiędzy zaproponowanymi parametrami hamowania a szybkością zużycia okładzin. Ze względu na zaobserwowaną i wyżej opisaną destrukcję materiału ciernego podczas hamowań z bardzo dużym rzeczywistym strumieniem ciepła (tj. pojawienie się wyraźnej warstwy grafitopodobnej i dużego zużycia po hamowaniach z $V = 200km/h$ oraz podwyższonego zużycia dla prób z małym strumieniem cieplnym ale bezpośrednio po hamowaniach z prędkości $V = 200km/h$), postanowiono sprawdzić współczynnik korelacji zaproponowanej krzywej regresji po odrzuceniu wyników z prób z prędkością $200km/h$ i o szybkości zużycia okładzin większym niż $1g/s$.

Uzyskano następujące wyniki obliczeń:

$$a = 0,81$$

$$b = 1,03$$

$$c = 2,21$$

Odchylenia standardowe wyznaczonych wykładników były wyraźnie mniejsze i wynosiły odpowiednio:

$$\sigma_a = 0,0449, \sigma_b = 0,0441 \text{ i } \sigma_c = 0,0707.$$

Współczynnik korelacji wzrósł i wyniósł $r = 0,932$, co wskazuje na to, że krzywa regresji bardzo dobrze opisuje zależność szybkości zużycia okładziny.

W celu przedstawienia graficznego charakteru wyznaczonej zależności przyjęto: stały współczynnik tarcia $\mu = 0,35$ (w zakresie eksploatacyjnych parametrów praktycznie jest on rzeczywiście prawie stały) oraz zmienną T (temperaturę) przyjęto jako parametr. Dzięki temu przebieg szybkości zużycia okładziny według zależności:

$$z = \frac{Z}{t'_H} = \frac{C}{3600} \cdot \mu_a \cdot N^{0,81} \cdot v^{1,03} \cdot \left(\frac{T}{T_0} \right)^{2,21} \quad (18)$$

dla stałych: $C = 0,33$ [g/kWh],

$$\mu = 0,35$$

$$T_0 = 50$$

i zmiennych N w [kN], v w [m/s], T w $^\circ C$ przedstawiono graficznie jako funkcję dwu zmiennych N i v , gdzie temperatura tarczy T jest parametrem. Na rys. 2 przedstawiono przebieg szybkości zużycia okładziny dla temperatury $T = 100^\circ C$, na rys. 3 – dla temperatury $T = 200^\circ C$ i na rys. 4 – dla temperatury $T = 300^\circ C$.

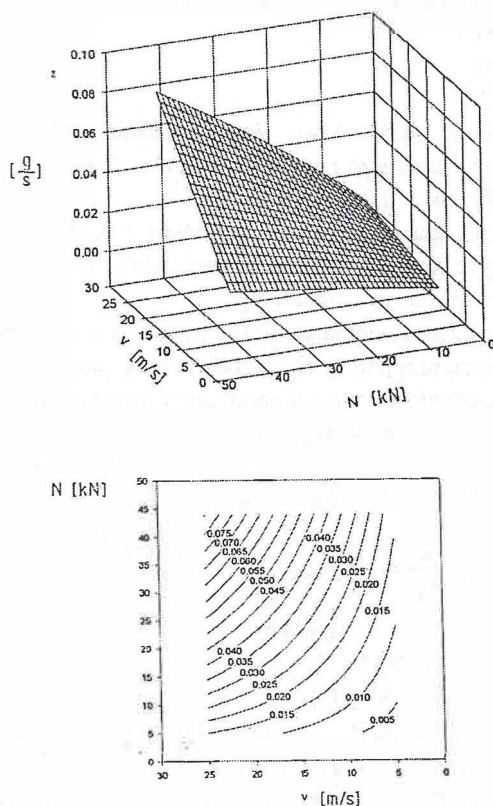
5. Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń można stwierdzić, że:

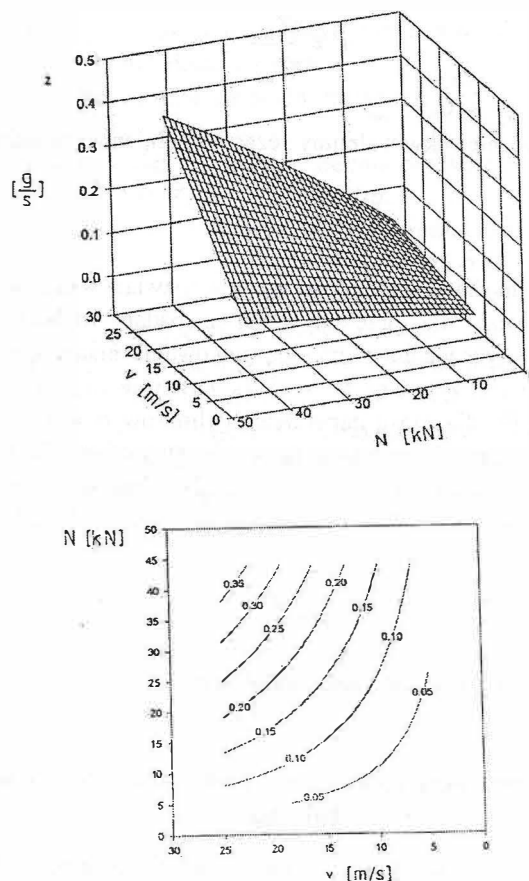
- wyniki przeprowadzonych badań identyfikacyjnych okładziny FR20H.2 w pełni potwierdziły hipotezę przedstawioną równaniem regresji (5) (szczególnie dla hamowań nie wywołujących destrukcji materiału okładziny),
- dla bardzo dużych obciążeń cieplnych (szczególnie dla prędkości 200km/h) występuje większe zużycie niż w całym pozostałym zakresie parametrów hamowania, które jest gorzej opisywalne zaproponowaną zależnością (np. wykładnik c może zmieniać się w funkcji temperatury).

Inny mechanizm zużycia dla dużych prędkości jazdy spowodowany jest prawdopodobnie przekroczeniem pewnej krytycznej temperatury dla okładziny, powyżej której, ze względu na destrukcję materiału okładziny, zużycie jej katastrofalnie rośnie. Temperaturą tą jest taka temperatura powierzchni tarcia, która podczas hamowań z prędkości 200km/h dla przyjętego w badaniach systemu osadzania termopar w tarczy i ich rodzaju (bezwładności), wywołuje pojawienie się temperatury 250–300°C w punktach pomiarowych.

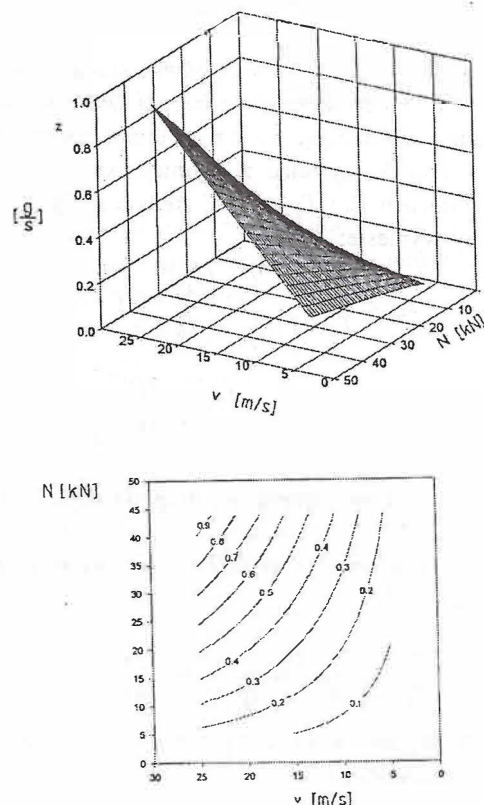
Przedstawiony sposób opracowania wyników z prób identyfikujących parametry eksploatacyjne okładziny doprowadził do opracowania zależności (18) opisującej szybkość zużycia badanych okładzin. Zależność ta umożliwi ocenę zużycia okładzin już na etapie projektowania dowolnych pojazdów szynowych. Umożliwi to w przyszłości również ocenę



Rys. 2. Przebieg szybkości zużycia okładziny FR20H.2 w funkcji nacisku okładziny i prędkości poślizgu dla temperatury tarczy 100°C.



Rys. 3. Przebieg szybkości zużycia okładziny FR20H.2 w funkcji nacisku okładziny i prędkości poślizgu dla temperatury tarczy 200°C.



Rys. 4. Przebieg szybkości zużycia okładziny FR20H.2 w funkcji nacisku okładziny i prędkości poślizgu dla temperatury tarczy 300°C.

ekonomiczności przyjętych układów hamulcowych i ich optymalizację na etapie projektowania pojazdu.

Wyznaczanie wykładników a , b i c w zależności (18) dla różnych typów okładzin zapewni właściwe porównanie ich między sobą z punktu widzenia odporności na zużycie oraz umożliwi właściwą ocenę dla jakich parametrów ruchowo–eksploatacyjnych pojazdów należy daną okładzinę stosować.

Literatura

[1] Gąsowski W.: *Wagony kolejowe – konstrukcja i badania*. WKŁ, Warszawa 1988.

[2] *Hamulec tarczowy i okładziny hamulcowe. Warunki ogólne dla prób na stanowisku badawczym. Karta UIC 541–3VE. 4-te wydanie, 01.07.1993.*

[3] Gąsowski W., Kaluba M.: *Trybologiczne badania okładziny czarnej hamulca tarczowego pojazdów szynowych. Pojazdy szynowe nr 1/1999.*

[4] Kaluba M.: *Wpływ wybranych czynników na powstawanie zjawiska tarcia płynnego w hamulcach tarczowych pojazdów szynowych. Rozprawa doktorska, 1999.*

[5] Otto A.W.: *Stand der Entwicklung von Bremswerkstoffen für Schienenfahrzeuge. ZEV+DET Glasers Annalen 119 (1995) nr 11/12.*