dr inż. Jerzy Nowicki
Politechnika Poznańska
Instytut Pojazdów Szynowych „TABOR"

Problemy hamowania pociągów dużej prędkości

W opracowaniu zawarto ocenę istniejącego stanu techniki hamowania pociągów dużej prędkości oraz analizę wybranych kierunków prac polepszających skuteczność hamowania. Uwzględniono również niektóre prace własne.

1. WSTĘP

Podstawowym i powszechnie obowiązującym w ruchu międzynarodowym w Europie jest liczący już ponad sto lat pneumatyczny, jedno przewodowy, ciśnieniowy system hamulcowy według pomysłu G. Westinghouse'a.

Kolejne, liczne rozwiązania opracowane według tego schematu różnią się między sobą wieloma cechami, w tym szczególnie sprawnością i precyzją działania, wrażliwością na zmiany parametrów sterujących oraz niezawodnością, a ponadto licznymi udoskonaleniami np. przyspieszającymi hamowanie lub luzowanie, w wyniku czego osiąga się wyrównanie przebiegów hamowania w poszczególnych częściach pociągów zwłaszcza długich.

Działania obejmują również wprowadzenie do eksploatacji nowych urządzeń stanowiących zespoły wykonawcze pneumatycznych układów hamulcowych, opracowywanie elektronicznych systemów sterowania tymi układami, stosowanie doskonalszych materiałów ciernych na zespoły wykonawcze, dążność do poprawy przyczepności kół do szyn podczas hamowania, lub prace nad hamulcami działającymi niezależnie od przyczepności.

Zakres działań jest bardzo szeroki, wymuszony wzrostem prędkości i masy pociągów, a jednocześnie ma związek z koniecznością zapewnienia bezpieczeństwa jazdy pociągów.

Spośród licznych przedsięwzięć, w niniejszym opracowaniu z konieczności przeanalizowano tylko niektóre i to w ograniczonym zakresie.

Warunkiem stosowania nowych rozwiązań jest dobra skuteczność ich pracy. Jej oceny można dokonać poprzez badania eksperymentalne, lub matematyczny opis pracy urządzeń i obliczenia symulacyjne. Prowadzenie badań jest na ogół kosztowne i możliwe dopiero po wykonaniu prototypu urządzenia. Wyniki obliczeń symulacyjnych mogą natomiast być wykorzystane do oceny skuteczności urządzeń, systemów hamulcowych, lub par ciernych już na etapie projektowania pojazdów szynowych.

W wyniku wieloletnich prac zrealizowanych w Zakładzie Pojazdów Szynowych Politechniki Poznańskiej opracowano model matematyczny pracy urządzeń i pneumatycznych układów hamulcowych pojazdów szynowych i pociągu, stanowiący podstawę modelu komputerowego [11], [12], [13], [14].

Umożliwiło to opracowanie programów na emc do obliczeń symulacyjnych procesów hamowania pociągów.

2. KIERUNKI PRAC

Znaczne postępy osiągnięto, w wyniku prowadzonych w szerokim zakresie badań, w doskonaleniu systemu przetwarzania energii powstającej w procesie hamowania oraz sterowania tymi procesami .

Przedmiot zainteresowania badaczy i projektantów stanowią: - klocki hamulcowe żeliwne, z tworzyw sztucznych oraz spieków metali współpracujących z kołami jezdnymi, - hamulce tarczowe, - elektromagnetyczne hamulce szynowe, - liniowe i rotacyjne hamulce wiroprądowe, - hamulce elektrodynamiczne i hamulce hydrodynamiczne.

2.1. Hamulcowe materiały cierne

Dla hamulców klockowych w pociągach pasażerskich, stanowiących klasyczne rozwiązanie układu hamulcowego niemalże od początku istnienia kolejnictwa, granicę stosowania stanowi prędkość około 160 km/h [9].

Przy większych prędkościach jazdy hamulce klockowe stosuje się w zupełnie innym rozwiązaniu niż tradycyjne, jako hamulce wspomagające inne systemy i dlatego kontynuowane są prace badawcze zmierzające do ich doskonalenia. Dotyczą one przede wszystkim nowych materiałów na wstawki, jak również nowych rozwiązań konstrukcyjnych wstawek.

W ramach Międzynarodowego Związku Kolei (UIC) znormalizowane są wstawki żeliwne z materiałów P6, P10 i P14, różniące się zawartością fosforu.

Rozwiązaniem przyszłościowym wydają się też być klocki żeliwne segmentowe, gdyż ich własności cierne są bardziej stabilne, mniej zależne np. od stopnia zużycia i obciążenia cieplnego.

Stosowanie wstawek z tworzyw sztucznych, poprzedzone wieloletnimi badaniami w licznych krajach, jest korzystne pod wieloma względami. Cechuje je stabilność przebiegu współczynnika tarcia w funkcji prędkości jazdy i nacisków na okładziny oraz znacznie wyższa odporność na zużycie, niż wstawek żeliwnych (nawet pięciokrotna).

Wadą wstawek z tworzyw sztucznych jest mała przewodność cieplna, powodująca słabe rozpraszanie przez nie wydzielanego w czasie hamowania ciepła, bo zaledwie 5%, podczas gdy wstawki żeliwne rozpraszają 12 - 15% .

Jak wykazują badania [9] temperatury kół przy hamowaniu nagłym i szybkościach początkowych 150-250 km/h, są w tym przypadku około dwukrotnie wyższe, niż przy wstawkach żeliwnych.

Wydaje się, że dopiero rozwój wstawek ze spieków proszków metali umożliwi uniknięcia kłopotów związanych z zastosowaniem tworzyw sztucznych, przy jednoczesnym zachowaniu wszystkich korzyści [17].

Jednym ze znanych już w Europie jest spiek metalowy na bazie żelaza MIX 308 niemieckiej Firmy ABEX - RAIL, eksploatowany próbnie na elektrowozach DB, na wagonach motorowych Fiat, a także próbnie na dwóch polskich zespołach elektrycznych EN57 [2].

W wyniku eksploatacji stwierdzono następujące zalety wstawek wykonanych z tego spieku :

- charakteryzuje się 14 - 20 krotnie większą trwałością niż wstawki z żeliw szarych,
- nie przyspiesza zużycia obręczy kół, jak również nie tworzy na nich nalep i nie poleruje ich powierzchni, a tym samym nie pogarsza przyczepności kół do szyn,
- nie jest podatny na wpływy wilgoci, nie zmienia się pod jej wpływem jego charakterystyka tarciowa,
- wykazuje o 50% wyższą przewodność cieplną w porównaniu z żeliwem, co zmniejsza obciążenie cieplne obręczy.

Nowoczesne pojazdy, przystosowane do wysokich prędkości wyposażone są w kilka pracujących niezależnie od siebie układów hamulcowych [21][19]. Jednym z nich jest hamulec tarczowy.

W europejskim ruchu międzynarodowym hamulec tarczowy wagonów pasażerskich jest zunifikowany i składa się z dwóch tarcz, mocowanych w części środkowej osi zestawu kołowego.

Średnice tarcz zależą od średnic kół jezdnych i skrajni taboru i w wagonach pasażerskich wykonywane są o wymiarach 590 do 640 mm i jednakowej szerokości 110mm.

Zunifikowane okładziny cierne z tworzyw sztucznych (zwane okładzinami organicznymi), zgodnie z kartą UIC 541-3, występują o powierzchni ciernej 175cm^2 - dla tarcz o średnicy 590 mm i 200 cm^2 - dla średnicy 610 mm.

Wymiary tarczy hamulcowych i związane z tym wymiary okładziny mają zasadniczy wpływ na trwałość hamulca.

Upowszechnienie hamulca tarczowego i zwiększenie prędkości jazdy w ruchu pasażerskim powodują ujawnienie licznych niedoskonałości tego rozwiązania dla uzyskania właściwych mocy hamowania przy prędkościach rzędu 300km/h.

W związku z powyższym od kilku lat prowadzone są intensywne prace badawcze [3], [5], [22], [8], [16], [1], w wyniku których w eksploatacji pociągów szybkich stosuje się nowe rozwiązania konstrukcyjne, zwłaszcza tarcz hamulcowych oraz wprowadza nowe materiały na tarcze i okładziny cierne. Dzięki tym pracom, we wszystkich szybkich pociągach nie tylko europejskich, hamulce tarczowe spełniają zasadniczą rolę w procesie hamowania mimo, że jeszcze do niedawna stawiano tym hamulcom wyraźne ograniczenia.

Na kierunek poszukiwań wpływ mają zaostrzone wymagania w stosunku do hamulców ciernych w związku ze wzrostem prędkości pociągów pasażerskich.

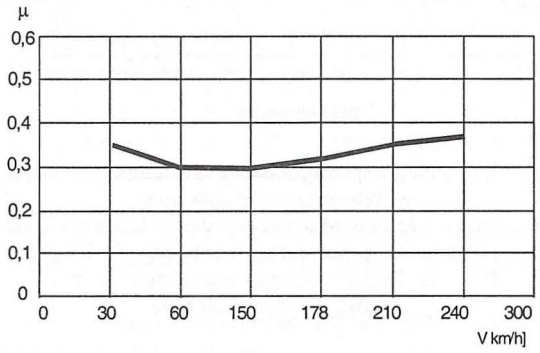
Do ważniejszych z nich należą:

- przetwarzanie znacznie większych energii,
- poprawa odporności na wpływ wilgoci i warunki zimowe,
- poprawa odporności termicznej,
- poprawa komfortu jazdy przez stosowanie okładzin hamulcowych pracujących cicho.

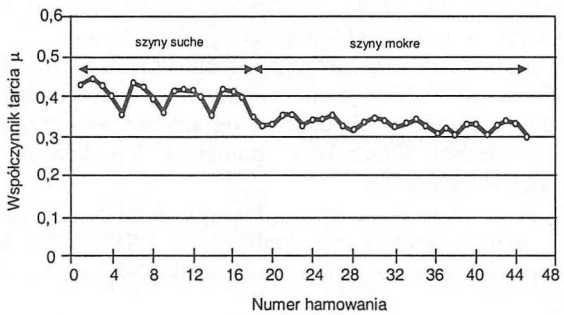
Spełnienie tych wymagań jest bardzo trudne i możliwe jedynie poprzez obszerne prace badawcze i rozwojowe. Przoduje w tym względzie niemiecka firma Becorit, która jako pierwszy producent hamulcowych okładzin ciernych spełnia wymagania normy ISO 9001, spełnienie których w niedalekiej przyszłości będzie warunkiem dopuszczenia tych materiałów do eksploatacji

Wzrost wartości energii , którą należy wytracić podczas hamowania wynika przede wszystkim ze wzrostu prędkości jazdy. Dla zahamowania wagonu w pociągu IC z prędkości 200 km/h, wyposażonego w dwie tarcze hamulcowe na każdy zestaw kołowy, należy przekształcić, a następnie wytracić energię o wartości 11,5 MJ. Natomiast dla zahamowania piętrowego wagonu pociągu TGV z prędkości 320 km/h należy przejąć energię 22MJ, co przekracza możliwości tworzyw organicznych. Okładziny odporne na wysokie temperatury mogą przejąć energię 13 do 14 MJ na wagon. Ponieważ nie można już zwiększać ilości tarcz hamulcowych na jednym zestawie kołowym ponad aktualnie stosowane cztery, podejmuje się próby stosowania na okładziny hamulcowe spieków metali, mimo że sama prędkość rzędu 300 km/h nie jest przeszkodą w stosowaniu okładzin organicznych. Średnia wartość współczynnika tarcia dla Becoritu 925-84 w całym zakresie badanej prędkości, od 300 km/h począwszy, wykazuje wymaganą wartość i dobrą stabilność (rys. 2.1) [16].

Warunkiem dopuszczenia do eksploatacji przez UIC okładzin ciernych, są pozytywne wyniki badań wpływu wody na charakterystyki cierno - zużyciowe podczas hamowania z prędkości maksymalnej 200 km/h. Takie pozytywne wyniki uzyskuje się dla tworzywa Becorit 923, co dokumentuje wykres na rys. 2.2 oraz w szczególnie trudnych warunkach - dla tworzywa Becorit 930-8K, które jest materiałem opracowanym specjalnie dla spełnienia tych wymagań.



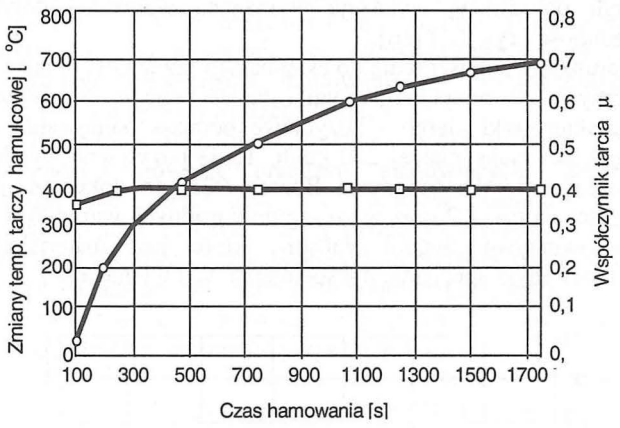
Rys.2.1. Przebieg średniej wartości współczynnika tarcia w funkcji prędkości. Materiał okładziny : Becorit 925-84.



Rys.2.2. Przebieg współczynnika tarcia w wyniku badań „na mokro" wg programu UIC z prędkości 200 km/h. Materiał okładziny : Becorit 923.

Kolejny problem jaki występuje przy wzrastających prędkościach jazdy, a tym samym mocach hamowania, to wysokie temperatury na powierzchniach elementów trących. Eksploatacja pojazdów szynowych szczególnie w górach - podczas jazdy na długotrwałych spadkach (np. przełęcz Gottharda w Szwajcarii) wymaga stosowania tworzyw, które wykazują odporność na temperatury powyżej 500°C w czasie długiego jej występowania. Takie własności wykazuje tworzywo Becorit G8, które poddane działaniu tak wysokich temperatur nie dymi i nie wydziela substancji zapachowych, a ponadto charakteryzuje się stabilnym przebiegiem współczynnika tarcia, oraz Becorit 929 (G2), na powierzchni którego, podczas badań na stanowisku BSI przy współpracy z żeliwną tarczą hamulcową, temperatura osiągnęła wartość 700°C (rys. 2.3) [16].

Najnowsze badania dotyczą optymalnego doboru materiałów na okładziny cierne, we współpracy z tarczami ze stopów aluminium. Są one prowadzone w kilku krajach, a pierwsze pozytywne wyniki wykazuje tworzywo Becorit 928, co potwierdza przebieg współczynnika tarcia uzyskany z badań na stanowisku według programu nr 2 zgodnie z kartą UIC 541-3.



Rys.2.3. Przebieg współczynnika tarcia i temperatury tarczy w funkcji czasu hamowania.
Materiał tarczy: żeliwo. Materiał okładziny: Becorit 929 (G2).
Parametry badań: obciążenie zestawu kołowego 11,25t prędkość: 80 km/h, długość odcinka badawczego: 38 km, nachylenie torów: 20,6 ‰

Od pewnego czasu szczególną grupę materiałów ciernych stanowią spieki. Ich preferencje uzasadnione są wyjątkowo szerokim zakresem zmian ich własności osiąganych poprzez odpowiedni dobór składu chemicznego i właściwe sterowanie parametrami procesu technologicznego wytwarzania.

Zasięg obszaru różnicowania samego składu chemicznego spieków wynika z faktu, że nie napotyka się tutaj teoretycznie na żadne trudności pochodzące z ograniczeń we wzajemnej rozpuszczalności składników, ponieważ ich konsolidacja przebiega w fazie stałej.

Spiekane materiały cierne są kompozytami zawierającymi szereg metalicznych i niemetalicznych składników, które stanowią metale tworzące osnowę, dodatki ślizgowe i dodatki cierne.

Osnowa, a ściśle jej struktura i własności fizyko - mechaniczne, warunkują wytrzymałość oraz charakterystykę cierną materiału. Jej udział objętościowy wahać się może w szerokich granicach 50-90%. Wymaganiom jakie osnowa winna spełniać w zakresie mechanicznego łączenia występujących w spieku składników niemetalowych, jak również odporności na obciążenia cieplne, odpowiadają metale, wśród których najbardziej rozpowszechnionymi są żelazo i miedź oraz ich stopy.

Ze względu na duże zróżnicowanie warunków, w jakich eksploatowane są konkretne pary cierne, nie jest możliwe wytypowanie jednego uniwersalnego dodatku stopowego. Znane są spieki w których do osnowy Fe wprowadzane są oprócz grafitu i miedzi także Sn, Zn, Si, Cr, P, B, W, Ti, V. natomiast do osnowy Cu - Ni, Fe, Ti, Mo, W, przy czym maksymalna ilość tych dodatków nie przekracza zwykle 30% [18].

Prace nad zastosowaniem wstawek ciernych ze spieków trwają już kilkanaście lat, ale przyspieszenie badań nastąpiło po decyzji SNCF o wyposażeniu hamulców TGV - Atlantique we wstawki z tych materiałów. Problemy wystąpiły jednak przy dużych prędkościach jazdy. Hamowaniu z tych prędkości towarzyszyły smugi ognia i iskier.

W wyniku intensywnych badań Firma Becorit opracowała okładzinę cierną segmentową ze spieku BM 40. Nowość w rozwiązaniu stanowi to, że właściwy materiał cierny ze spieków uformowany w postaci krążków łączony jest z płytą nośną specjalnym stopem lutowniczym.

Rozwiązanie to gwarantuje bardziej równomierny rozkład nacisków między okładziną a tarczą hamulcową, ponadto przestrzenie między krążkami spieku intensyfikują wentylację (ochładzanie) pary ciernej, a jednocześnie stanowią objętości dla doraźnego pomieszczenia produktów zużycia.

Spiek BM40 spełnia oczekiwania - charakteryzuje się stabilnym przebiegiem współczynnika tarcia, a jednocześnie nie jest agresywny względem partnera - tarczy hamulcowej. Wykorzystanie tych okładzin przy rozpraszaniu ciepła powstałego podczas hamowania wymagającego pracy 22MJ nie stanowi granicy możliwości tych materiałów. Spełnia on więc w pełni wymagania i może być stosowany w najtrudniejszych warunkach, tam gdzie okładziny z tworzyw organicznych ulegają destrukcji.

Aktualnie prowadzi się również badania nad nowymi spiekami metalicznymi w Instytucie Pojazdów Szynowych „TABOR" w Poznaniu przy współpracy z Firmą Specjalistyczną Materiały i Okładziny Cierne FRENOPLAST, w ramach projektu badawczego Komitetu Badań Naukowych.

Uzyskane dotychczas wyniki prac rokują nadzieje na opracowanie krajowego spieku na okładziny cierne hamulca tarczowego.

Ponadto nowością, sprzyjającą prawidłowemu usytuowaniu się okładziny względem tarczy hamulcowej jest jej sprężyste zamocowanie w szczęce hamulcowej. Jest to najnowsze rozwiązanie wśród sposobów mocowania okładzin hamulcowych w hamulcach tarczowych.

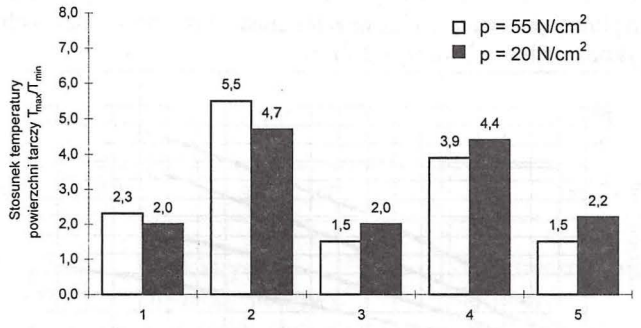
Firma Knorr – Bremse opracowała i wdrożyła do eksploatacji okładziny hamulcowe typu ISOBAR (równomierny nacisk) zakładając osiągnięcie następujących rezultatów:

- polepszenie skuteczności hamulców tarczowych dzięki bardziej równomiernemu rozkładowi nacisków pomiędzy tarczą a okładziną,

• zmniejszenie hałasu generowanego w czasie pracy hamulców tarczowych,
• łatwiejszą wymianę elementów okładzin ciernych, a tym samym zmniejszenie kosztów obsługi hamulców ,
• wykorzystanie dotychczas stosowanych materiałów.

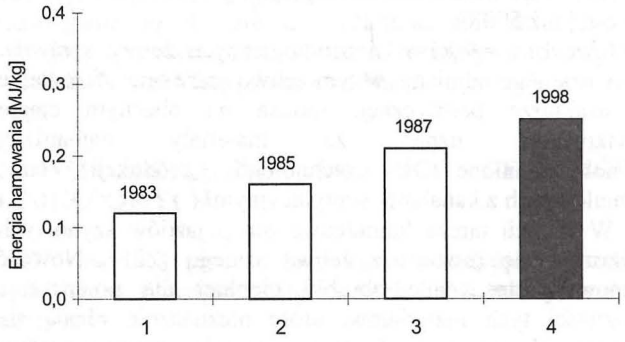
Każda okładzina w tym rozwiązaniu składa się z 18 pojedynczych części połączonych za pośrednictwem specjalnych elementów i kulistych panewek. Taki sposób przeniesienia siły normalnej na elementy wykonawcze zapewnia równomierny rozkład nacisków jednostkowych na powierzchniach ciernych i jednocześnie – dzięki sprężystości składu mocującego – minimalizuje drgania samowzbudne, charakterystyczne dla tarcia suchego (hałas).
Ponadto powiększają się obszary stałych temperatur i jednocześnie zmniejszają naprężenia cieplne w pierścieniach ciernych, tarcz hamulcowych.

Termograficzny obraz rozkładu temperatur zarejestrowany podczas całego procesu hamowania wykazał około dwukrotne zmniejszenie stosunku temperatury maksymalnej do minimalnej na powierzchni tarczy hamulcowej, przy zastosowaniu okładziny typu ISOBAR ze spiekami metali i ponad trzykrotnie dla okładzin organicznych o dużej twardości, w porównaniu z rozwiązaniem tradycyjnym (rys. 2.4), a temperatury maksymalne zmniejszyły się z 900° do 600° C.
Stworzyło to możliwość stosowania trzykrotnie większych nacisków przy wykorzystaniu tego typu okładziny [25].



Rys. 2.4. Wpływ rodzaju okładzin hamulcowych na rozkład temperatury na powierzchni tarczy hamulcowej 1 okładzina organiczna (HB 40), 2 okładzina organiczna (HB 160 przy wysokich temperaturach), 3 okładzina organiczna (rozwiązanie ISOBAR), 4 okładzina spiek metalowy, 5 okładzina spiek metalowy (rozwiązanie SOBAR).

Przy obciążeniu 14 ton na oś i prędkości 330 km/h, tarcze hamulcowe podczas hamowania nagłego muszą wytracić energię kinetyczną około 60 KJ na oś. Przy konwencjonalnych szczękach hamulcowych i okładzinach ze spieków metali należałoby zastosować po trzy tarcze hamulcowe ze stali wysokostopowej, natomiast z rozwiązaniem ISOBAR – wystarczą po dwie.
Ocena różnych wyników badań prowadzi do wniosku, że dla maksymalnej temperatury na powierzchni tarczy ok. 600° C, moc hamowania wzrasta o około 50%, a jednocześnie ilość uszkodzeń okładzin stanowi zaledwie 10% uszkodzeń jakie mogły by wystąpić dla okładzin standardowych z tego samego spieku metali.



Rys. 2.5. Wpływ nowych materiałów tarczy hamulcowych i okładzin ciernych na pojemność energetyczną tarczy hamulcowej. 1 tarcza żeliwo szare + okładzina organiczna, 2 tarcza stalowa + okładzina organiczna, 3 tarcza stop aluminium + okładzina organiczna, 4 tarcza stalowa + okładzina organiczna (ISOBAR).

Rys. 2.5. obrazuje zmianę obciążenia energetycznego przypadającego na kilogram masy tarczy hamulcowej dla różnych materiałów par ciernych.

Różnorodność wymagań stawianych elementom ciernym sprawia, że spełnienie ich jest trudne, jeśli wogóle możliwe. Niemożliwe jest wytypowanie tworzywa optymalnego, które spełniało by oczekiwania użytkownika w każdych warunkach pracy hamulca tarczowego [25]

2.2. Tarcze hamulcowe – nowe rozwiązania i materiały

O cechach użytkowych hamulca tarczowego decydują właściwości pary ciernej: tarcza hamulcowa - okładzina. Dobór materiału na te elementy wymaga unikalnej analizy procesów tarcia zachodzących w tym węźle , w wyniku której można sprecyzować wymagania jakie powinny one spełniać [10], [6], [4], [22], [20].

W pracy [5] przeprowadzono analizę materiałów stosowanych na tarcze hamulcowe przez znaną firmę europejską Knorr-Bremse, dla wyselekcjonowania grupy materiałów najbardziej odpowiednich.

Okazało się, że najbardziej odpowiednim materiałem na pierścienie cierne tarcz hamulcowych jest żeliwo szare. Materiał ten charakteryzuje się jednak niewystarczającą ciągliwością. W związku z tym uważa się [10], że dla uniknięcia wstrząsu termicznego średnia temperatura tarczy wykonanych z żeliwa szarego nie powinna przekraczać 300ş-350ş C .

Poszerzając analizę o wyniki badań nad materiałami na tarcze hamulcowe stosowanymi przez inne firmy niemieckie [24] można stwierdzić, że na pierścienie cierne tarcz hamulcowych stosuje się następujące materiały:

- żeliwo szare z grafitem płatkowym w osnowie perlitycznej,
- żeliwo sferoidalne z grafitem kulkowym w osnowie ferrytycznej, ferrytyczno-perlitycznej i perlitycznej,
- staliwo węglowe zwykłe,
- staliwo węglowe niskostopowe.

Dobre wyniki w eksploatacji tarcz hamulcowych osiągnięto stosując pierścienie cierne z żeliwa szarego z grafitem płatkowym w osnowie perlitycznej. Trwałość tego materiału umożliwia wykonanie tarcz o średnicach do 650 mm i pracujących do 1500 obr/min., obciążonych siłą

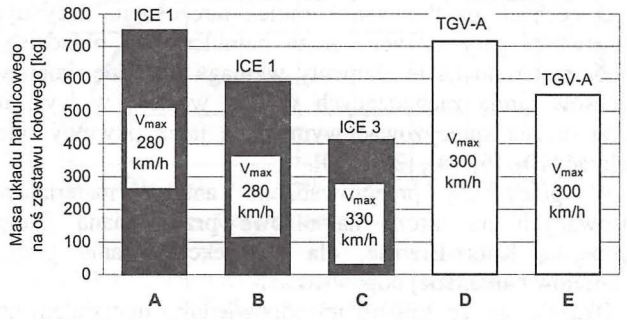
odśrodkową i momentem hamującym, przy temperaturze nie wyższej niż 500°C.

Specyfika właściwości tribologicznych żeliwa sprawiła, że pewne jego odmiany, w tym żeliwo szare oraz sferoidalne o strukturze perlitycznej, można na obecnym etapie użytkowania uznać za materiały najbardziej rozpowszechnione w technologii produkcji tarcz hamulcowych z kanałami wentylacyjnymi.

W Japonii tarcze hamulcowe dla pojazdów szynowych wykonuje się również z żeliwa szarego [22] . Nowość stanowi zastosowanie obróbki cieplnej dla polepszenia własności tych materiałów, które nieznacznie różnią się składem chemicznym. Zasadnicze różnice dotyczą postaci wydzieleń grafitu. Badaniom poddano żeliwa z grafitem płatkowym (FC25), żeliwa z grafitem robaczkowym zagęszczonym (FCCV) i grafitem kulistym (FCD) po hartowaniu i odpuszczaniu [22].

Uzyskane wyniki badań wykazały, że najbardziej odpowiednim materiałem na tarcze hamulcowe jest żeliwo o strukturze perlitycznej z grafitem płatkowym. W wyniku obróbki cieplnej polepszyły się jego własności mechaniczne oraz charakterystyki cierne.

W pociągach pasażerskich dużych prędkości poza koniecznością stosowania hamulców o coraz lepszej skuteczności, dąży się do zmniejszenia masy nieusprężynowanej tych pojazdów tj. masy zestawów kołowych i związanej z nimi części układu hamulcowego. Jest to zadanie trudne dla projektantów i producentów wózków kolejowych, w których zestawy kołowe i hamulce stanowiły dotychczas więcej niż połowę całkowitej ich masy.



Rys. 2.6. Zmniejszanie masy pary ciernej hamulca tarczowego w pociągach wysokiej prędkości
A. ICE 1 1991 rok 4, tarcze z żeliwa sferoidalnego, okładzina organiczna; B. ICE 1 199, rok pociąg doświadczalny, 4 tarcze ze stopów aluminium, okładzina organiczna; C. ICE 3 1998 rok, 2 tarcze staliwne, okładzina ISOBAR ze spieku metalowego; D. TVG-A 1997 rok, 4 tarcze staliwne, okładzina ze spieku metalowego zgodna z wymaganiami UIC; E. TVG-A, proponowany układ 3 tarcze staliwne, okładzina ISOBAR ze spieku metalowego.

Diagram na rys. 2.6. przedstawia zmiany mas hamulców tarczowych przypadających na jedną oś zestawu kołowego dla niektórych pociągów na duże prędkości, z różnymi materiałami i rozwiązaniami konstrukcyjnymi par ciernych. Widoczna jest znaczna przewaga systemu ISOBAR z wstawkami ze spieku metalowego [25].

W pierwszej generacji zespołów trakcyjnych ICE1 i ICE2, cztery tarcze hamulcowe przypadające na każdą oś, ważyły wraz z nią prawie 0,5 tony [6].

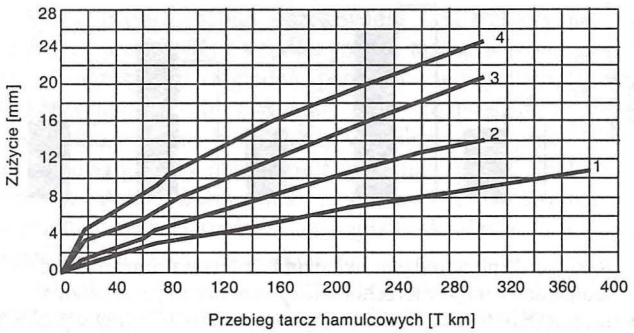
Bardzo znaczne zmniejszenie masy tarczy nastąpiło nie tylko w wyniku zastosowania nowego materiału, jakim są stopy aluminium wzbogacone drobnymi cząstkami ceramicznymi, ale również jako skutek rozwiązań konstrukcyjnych. Według publikacji Wirth'a [23] prawdopodobnie najlepszym rozwiązaniem będą tarcze hamulcowe firmy Knorr .

Na kolejach DB próby z pojazdami wyposażonymi w aluminiowe tarcze hamulcowe rozpoczęto już około 8 lat temu. Odbywa się to poprzez zastępowanie dotychczas stosowanych tarcz żeliwnych tarczami aluminiowymi. Np. na osiach dwóch środkowych wagonów (nienapędnych) pociągu ICE1, w miejsce poprzednio stosowanych seryjnie produkowanych tarcz z żeliwa sferoidalnego o wymiarach 640 x 80mm, zamontowano 4 tarcze aluminiowe o wymiarach 640x100 . Nowe tarcze są produkcji firm Knorr Bremse i BSI.

Równolegle z rozwojem i próbami fabrycznymi aluminiowych tarcz hamulcowych, przemysł prowadzi prace nad odpowiednimi do nich okładzinami ciernymi. Aktualnie problem został już rozwiązany i w końcu 1996 roku wyposażono cały skład pociągu ICE1 w hamulce z tarczami aluminiowymi i odpowiednimi do nich organicznymi wstawkami ciernymi.

Doskonałe właściwości przewodzenia ciepła tarczy o wymiarach 610x180mm pozwalają na ciągłe pełne hamowanie dużo wyższymi mocami, niż z zastosowaniem tarczy hamulcowych równoważnych, wykonanych z żeliwa szarego. Do tak dobrych rezultatów przyczyniła się także nowa konstrukcja żeber chłodzących.

Dotychczasowe wyniki prób z hamulcami o tarczach aluminiowych wskazują na znacznie dłuższy czas eksploatacji tarcz, jak i nakładek, niż przy tarczach wykonanych z żeliwa (rys.2.7) [6].



Rys.2.7. Porównanie zużycia tarcz hamulcowych aluminiowych oraz tarcz z żeliwa szarego.
1 - stop aluminium A1 - tworzywo Flertex 664HD,
2- stop aluminium A2 - tworzywo jak p.1, 3 - żeliwo szare GGG - tworzywo Jurid 877, 4 - żeliwo jak p. 3 - tworzywo Becorit 918.

Badania procesu hamowania z prędkości powyżej 329 km/h potwierdziły fakt, że tarcze aluminiowe mogą sprawdzić się równie dobrze przy wysokich prędkościach. Dobra przewodność cieplna stopów aluminium powoduje, że tarcze wykonane z tego materiału wykazują mniejsze skłonności do lokalnego przegrzania (do powstania tzw. gorących miejsc). Badania nad doskonaleniem tarcz hamulcowych prowadzą również inne firmy m.in. firma Bergische Stahlindustrie Remscheid (BSI).

Kolejną nowością w poszukiwaniu nowych materiałów na elementy hamulca tarczowego są próby stosowania włókien węglowych [7]. Pierwsze pozytywne wyniki uzyskano w hamulcach samolotowych i hamulcach samochodów wyścigowych. W pojazdach tych należy zamienić na ciepło w czasie hamowania olbrzymie ilości energii kinetycznej, a

same hamulce muszą być małe i lekkie. Firma Knorr Bremse, przy poparciu rządu niemieckiego, rozpoczęła już prace nad zastosowaniem włókien węglowych w pojazdach szynowych. Prototyp takiego hamulca został opracowany i wykonany w 1995 roku i zainstalowany na jednym z wózków tocznych pociągu ICE1. Przeprowadzono pierwsze próby hamowania na torze przy prędkości 250km/h, oraz stanowiskowe przy prędkości 400 km/h, podczas których przejął on energię o wartości 100MJ.

Ważnym kryterium doboru tarcz w hamulcu tarczowym, zwłaszcza przy wysokich prędkościach jazdy, jest moc tracona na ich obroty podczas biegu pociągu. W przypadku powszechnie stosowanego radialnego użebrowania łopatkowego, przy dużych prędkościach traci się około 3kW na każdą tarczę hamulcową. Dlatego coraz częściej stosuje się nowy sposób użebrowania za pomocą sworzni o przekroju okrągłym, rozłożonych równolegle do osi obrotu tarczy pomiędzy jej roboczymi płaszczyznami. Pozwala to na obniżenie straty mocy o 40%, nie zmniejszając efektywności chłodzenia.

Najnowszym w tym względzie rozwiązaniem są najczęściej zwielokrotnione tarcze z wysokogatunkowej stali (3 ewentualnie 4 na jednej osi) bez kanałów wentylacyjnych [4],[19], [17]). Wyposażona w takie tarcze jest nowa generacja szybkich pojazdów takich jak TGV, ICE. Rozwiązanie to umożliwia wyeliminowanie strat mocy trakcyjnej, pochodzących od oporu przepływu powietrza przez kanały wentylacyjne oraz uniknięcie pęknięć w pobliżu żeber.

3. WSPÓŁDZIAŁANIE RÓŻNYCH SYSTEMÓW HAMULCOWYCH.

Dla realizacji procesu hamowania pociągów o dużych prędkościach aktualnie stosuje się kilka różnych systemów hamowania.

Z systemów tych tworzy się różne kombinacje i wykorzystuje w procesie hamowania w zależności od potrzeb i optymalnych zakresów ich pracy.

Proces współpracy wszystkich systemów jest tak sterowany, by zapewnić równomierny przebieg procesu hamowania w całym zakresie prędkości oraz pełne wykorzystanie możliwości każdego hamulca.

Rodzaje systemów hamulcowych, stosowanych w szybkich pociągach znanych w Europie zestawiono w tablicy 3.1.

Tablica 3.1.

Rodzaje hamulców stosowanych w szybkich pociągach europejskich [3], [21].

Pociąg	ICE-V	ICE	TGV Paryż - Płd. Wschód	TGV Atlantyk
V_{max} [km/h]	300 - 350	280 -300	280	300
Wagon silnikowy	- Elektryczny hamulec sieciowy, - Hamulec tarczowy; po 3 tarcze stalowe pełne niewentylowane na oś okładziny ze spieków; - 4 hamulce magnetyczne wiroprądowe	- Elektryczny hamulec sieciowy; - Hamulec tarczowy; po 2 tarcze stalowe pełne, niewentylowane na oś, okładziny ze spieków	- Elektryczny hamulec oporowy; - Hamulec klockowy	- Elektryczny hamulec oporowy; - Hamulec tarczowy, tarcze hamulcowe na kołach
Wagon doczepny środkowy	- Hamulec tarczowy; po 2 tarcze stalowe, niewentylowane na osi, okładziny ze spieków; - 4 hamulce magnetyczne wiroprądowe.	- Hamulec tarczowy; po 4 tarcze żeliwne z kanałami wentylacyjnymi na oś, okładziny ze spieków; - 4 hamulce szynowe elektromagnetyczne	- Hamulec tarczowy; po 4 tarcze żeliwne z kanałami wentylacyjnymi na oś, okładziny z tworzyw sztucznych. - Hamulec klockowy	Hamulec tarczowy; po 4 tarcze stalowe pełne niewentylowane na oś, okładziny ze spieków.

Wyposażenie hamulca pociągów grupy ICE obejmuje:

- hamulec elektrodynamiczny z odzyskiem energii przekazywanej do sieci;
- hamulec tarczowy w następujących wersjach : po dwie tarcze stalowe pełne bez kanałów wentylacyjnych mocowane na każdej osi wózków napędnych (pociąg ICE), lub po trzy tarcze (pociąg ICE-V); po cztery tarcze żeliwne z kanałami wentylacyjnymi (ICE), lub po dwie tarcze stalowe pełne (ICE-V) na każdej osi wózków wagonów doczepnych. We wszystkich wersjach hamulca tarczowego zastosowano okładziny ze spieków metali;
- hamulec szynowy elektromagnetyczny: cztery hamulce w każdym wagonie doczepnym (pociąg ICE);
- hamulce magnetyczne wiroprądowe : po cztery hamulce na każdym wagonie motorowym i doczepnym (pociąg ICE-V).

Rozwiązanie techniczne hamulców elektromagnetycznego szynowego i wiroprądowego umożliwia instalację jednego z nich bez dodatkowych przygotowań wózków i zmian w sterowaniu hamulcami.

Naczelna zasada hamowania pociągów rodziny ICE polega na maksymalnym wykorzystaniu hamulców, w których nie ma trących elementów wykonawczych. Są to hamulce elektrodynamiczne odzyskowe oraz magnetyczne, wiroprądowe. Hamulce te są wspomagane hamulcami tarczowymi wagonów motorowych i doczepnych. Pełnią więc one rolę hamulców dopełniających pozostałe systemy w niezbędną moc hamowania, dla uzyskania właściwego opóźnienia gwarantującego zatrzymanie pociągu na założonej drodze hamowania, a jednocześnie stanowią hamulce bezpieczeństwa.

Mimo, że jednostki napędowe pociągów ICE wyposażone są w hamulce elektrodynamiczne z odzyskiem energii wyjątkowo dużej mocy (na każdej jednostce napędowej hamulec o mocy 4MW), to wymagają zabezpieczenia innymi systemami hamulcowymi na wypadek awarii w zasilaniu w energię elektryczną.

Dlatego obliczenia projektowe hamulców tarczowych oparte są o założenie, że muszą one zrealizować proces hamowania, aż do zatrzymania pociągu, przy wyłączonych hamulcach elektrodynamicznych.

W wersji pociągu ICE w wagonach silnikowych zastosowano po dwie tarcze hamulcowe pełne na każdej osi, zamiast trzech jak w pociągu ICE-V. Było to możliwe ze względu na zwiększenie liczby wagonów doczepnych w składzie pociągu, wspomagających proces hamowania, a ponadto stosowanie trzech tarcz na osiach napędnych stwarzało trudności konstrukcyjne ze względu na szczupłość miejsca oraz dodatkowo dociążało wózek.

W pociągu ICE-V tak na wagonach silnikowych, jak i doczepnych zastosowano wyłącznie tarcze pełne, bez kanałów wentylacyjnych ze staliwa stopowego, współpracujące z okładzinami ze spieków metali. Jest to najnowsze rozwiązanie firmy Knorr Bremse AG pracujące niezawodnie w pociągach ICE-V, jak również TGV-Atlantyk.

Alternatywne rozwiązanie stosuje się w pociągu ICE, w którym na każdej osi wagonów doczepnych zamontowane są po cztery tarcze żeliwne wentylowane, o grubości 80mm.

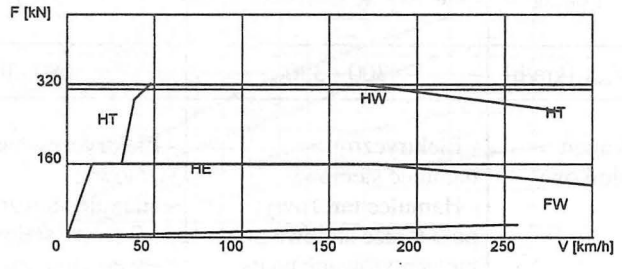
Pociąg ICE jest wyposażony w elektroniczny system sterowania hamowaniem, który zapewnia:

- regulację siły hamowania dla osiągnięcia założonego celu,
- automatyczne sterowanie prędkością,
- płynny przebieg procesu hamowania w całym zakresie prędkości,
- możliwość automatycznego włączania i wyłączania różnych systemów hamulcowych w trakcie trwania hamowania, dla zoptymalizowania tego procesu,
- integrację systemu sterowania hamulcem z komputerowym systemem diagnostycznym pociągu, dla umożliwienia przeprowadzenia testów hamowania.

System elektroniczny jest zainstalowany w jednostce napędowej i podłączony do centralnej tablicy sterowania, do której również podłączony jest przewód światłowodowy przekazujący z pociągu dane o przebiegu jazdy i hamowania, centralny komputer diagnostyczny pociągu oraz układ sterowania ruchem pociągu.

W wagonie centralnym (doczepnym) zespół elektroniczny zawiera procesor sterowania hamulcem szynowym magnetycznym, lub wiroprądowym i sterowania urządzeniami przeciwpoślizgowymi oraz układy diagnozujące hamulce. Zespół elektroniczny ponadto steruje układami klimatyzacji pociągu i funkcjonowania drzwi. Jest połączony z komputerem diagnostycznym.

Układ sterowania hamowaniem ma zapewnić uzyskanie koniecznej mocy hamowania dla zmniejszenia prędkości jazdy, lub zatrzymania pociągu na zadanej drodze. W związku z tym włącza i wyłącza w odpowiedniej kolejności poszczególne systemy hamulcowe, kontroluje przebieg procesu hamowania dla utrzymania właściwych parametrów. Wykorzystanie wszystkich systemów hamulcowych podczas hamowania nagłego przedstawiono na rys. 3.1 [26].



Rys. 3.1. Udział różnych systemów hamulcowych w hamowaniu nagłym pociągu ICE-V. F siła hamowania, V prędkość jazdy, FW opory jazdy, HE hamulec elektrodynamiczny, HW hamulec wiroprądowy, HT hamulec tarczowy.

W procesie tym włącza się jednocześnie wszystkie systemy hamulcowe, przy czym hamulec tarczowy bierze udział w hamowaniu od prędkości maksymalnej do takiej jej wartości, przy której hamulec elektrodynamiczny osiąga maksymalną moc (od 300 km/h do około 160 km/h). Ponownie zostaje włączony przy prędkości np. 50 km/h, od której wyłączony jest już hamulec wiroprądowy, a od np. 30 km/h – hamulec elektrodynamiczny.

Podczas hamowania służbowego w pierwszej kolejności włącza się hamulec elektrodynamiczny z odzyskiem energii. Jeżeli siła hamowania nim wywołana nie wystarcza dla uzyskania założonych parametrów, włączony zostaje hamulec wiroprądowy. Hamulec tarczowy przy tym rodzaju hamowania zostaje włączony dopiero od około 50 km/h i pracuje aż do zatrzymania pociągu, zwiększając stopniowo

swój udział, aż do 100% mocy hamowania realizowanej w pociągu przy tych prędkościach.

W pociągach rodziny TGV stosuje się następujące systemy hamulcowe [3]:

- hamulce elektrodynamiczne oporowe w wagonach silnikowych pociągów TGV – Paryż (TGV- P) i TGV – Atlantyk (TGV-A),
- hamulce tarczowe z tarczami na kołach w wagonach silnikowych pociągów TGV-A i hamulce z tarczami na osiach (po 4 na oś) w obu typach pociągów, przy czym w pociągach TGV-A tarcze pełne bez użebrowań wentylacyjnych, a w pociągach TGV-P – tarcze żeliwne wentylowane,
- hamulce klockowe w formie bloków hamulcowych we wszystkich wagonach pociągów TGV-P.

Z porównania układów hamulcowych pociągów TGV-P i TGV-A wynikają istotne różnice spowodowane wzrostem prędkości pociągu TGV-A do 300 km/h oraz jego masy do 485t. Zaprzestano stosowania tarcz żeliwnych na korzyść wykonanych ze stali stopowej oraz zmiany materiału okładzin hamulcowych z tworzyw sztucznych na spieki metali.

W pierwszych wersjach pociągów TGV-A, obok hamulców elektrodynamicznych oporowych na wózkach napędnych, stosowano hamulce klockowe w formie bloków hamulcowych. W najnowszych rozwiązaniach tego pociągu stosuje się hamulce tarczowe współpracujące z elektronicznymi urządzeniami przeciwpoślizgowymi, które uwzględniają również działanie na osie napędne hamulców elektrycznych.

Nowa koncepcja systemu hamowania pociągów TGV-A objęła realizację dwóch zadań: optymalizację rozdziału sił hamowania, która ma znaczący wpływ na osiągnięcie wysokiej skuteczności hamowania oraz obniżenie kosztów eksploatacji. Pierwszy cel osiągnięto poprzez komputerowy system sterowania hamulcami, drugi zaś w wyniku podniesienia mocy hamowania wszystkich systemów oraz przyjęcie podczas hamowania służbowego zasady pierszeństwa dla hamulca elektrodynamicznego oporowego.

Kompleks podjętych działań spowodował udoskonalenie charakterystyk hamowania pociąguTGV-A w porównaniu z pociągiem TGV-P, a ponadto przyjęty elektroniczny system sterowania pozwala także na samodiagnozowanie układów hamulcowych. Sprawdzianem jakości systemów hamowania tych pociągów jest niezależna regulacja intensywności hamowania na każdym wózku oraz automatyzacja tego procesu.

Z porównania układów hamulcowych pociągów ICE i TGV wynika, że w pociągach TGV nie stosuje się żadnych hamulców współdziałających z szyną (szynowych magnetycznych ani wiroprądowych) natomiast w pociągach ICE od pewnego czasu (od np. 2 lat) zrezygnowano z hamulców klockowych.

4. PODSUMOWANIE

Podstawowym problemem hamowania pojazdów szynowych o dużych prędkościach jazdy jest zamiana energii kinetycznej na inny rodzaj energii np. energię cieplną i jej wytracenie oraz zagadnienie przyczepności między kołem a szyną.

Z analizy skuteczności hamulców pneumatycznych ciernych, zwłaszcza klockowych w zakresie wysokich prędkości wynika, że dobór granicznych wartości docisku par ciernych, zależy oprócz przyczepności, od wartości współczynnika tarcia poślizgowego oraz od dopuszczalnych temperatur ich nagrzania. W związku z tym wartości mocy hamowania jednego zestawu kołowego nie powinny przekraczać 160 kW. Wzrost zawartości fosforu w żeliwie i wzbogacenie dodatkami stopowymi wpływa na poprawę warunków rozproszenia ciepła, dzięki czemu graniczna wartość mocy hamowania może być wyższa. Wstawki z tworzyw sztucznych charakteryzują się wyższą wartością współczynnika tarcia, lecz na ogół wykazują małą przewodność cieplną, w wyniku czego znacznie gorzej odprowadzają ciepło.

Najkorzystniejsze cechy pod tym względem wykazują hamulce tarczowe z okładzinami z tworzyw sztucznych, a ostatnio coraz częściej ze spieków metali. Wzrost temperatury nagrzania pary ciernej nie wpływa praktycznie na prawie stałe – w dużym zakresie prędkości – wartości współczynnika tarcia. Hamulce te jednak wykazują mniejszą stabilność działania od hamulców klockowych, zwłaszcza w złych warunkach atmosferycznych, a szczególnie zimą. Przy braku oczyszczania powierzchni tocznych kół (co ma miejsce w hamulcach klockowych), hamulce tarczowe często nie wykorzystują w pełni swoich możliwości w realizacji mocy hamowania ze względu na spadek przyczepności.

Dlatego hamowanie pociągów, o dużych prędkościach wymaga stosowania kilku odpowiednio dobranych systemów, w tym systemów pracujących niezależnie od sił przyczepności kół do szyn, współdziałających między sobą według optymalnego programu.

W pociągach o prędkościach wyższych od 250 km/h stosuje się trzy systemy – elektrodynamiczny tarczowy, szynowy magnetyczny lub wiroprądowy, a czasem również klockowy.

Poprawne współdziałanie różnych systemów hamulcowych dla optymalnego ich wykorzystania wymaga mikroprocesorowych układów sterowania, dzięki którym uzyskuje się płynny przebieg hamowania. Systemy takie pracują już w szybkich pociągach nie tylko europejskich. Analiza tych zagadnień wymaga bardziej szczegółowych opracowań, wykraczających poza ramy tej publikacji.

Literatura

[1] *Becker L.: The Three – in – One Brake. Materiały firmy KNORR – REMSE, 1996.*

[2] *Błaszczyk E., Nowak S., Kus E. : Zamierzenia PAFAWAGU w konstrukcji pojazdów szynowych w latach 1994-95. Materiały X Konferencji Naukowej „Pojazdy Szynowe", Wrocław 1994.*

[3] *Boiteux M., Christious B. : Tormoznoje oborudowanije pojezdow TGV – Atlantique, Żeleznyje Dorogi Mira nr 9, 1988.*

[4] *Braun A.: Bremsen für Hochgeschwindigkeitszüge. ETR nr 11, 1986.*

[5] *Braun A. : Erfahrungen mit Reibungsbremsen des Inter City Express. ZEV – Glassers Annalen nr 11, 1993.*

[6] *Dellmann T. : Leichtbau als Herausforderung für die Bremsausrüstung im Fahrzeugbau. ZEV Glassers Annalen, nr 11/12, 1995.*

[7] *Dieter W., Credner M. : DB studies higher levels of braking power. International Railway Jurnal, nr 8, 1996.*

[8] *Hirose F., Nakamura H. : Sowierszenstwowanije tormoznych diskow. Żeleznyje Dorogi Mira, nr 7, 1987.*

[9] *Jaenichen D., Gielke P. : Bremswirkung klotz – und scheibengebremster Reisezüge bei Schnellbremsung. Schiennenfahrzeuge, nr 6, 1987.*

[10] *Nowicki J. : Badania materiałów ciernych dla hamulca tarczowego pojazdów szynowych. Zagadnienia Eksploatacji Maszyn, PAN, Zeszyt 2-3, 1990.*

[11] *Nowicki J., Piechowak T.: Metoda symulacji pracy pneumatycznego układu hamulcowego pociągu. Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej, seria Maszyny Robocze i Pojazdy, nr 31, 1988.*

[12] *Nowicki J., Piechowiak T.: Modelowanie pracy pneumatycznego układu hamulca pociągu podczas hamowania. Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej, seria Maszyny Robocze i Pojazdy, nr 37, 1992.*

[13] *Nowicki J., Piechowiak T.: Simulation Computations of Pneumatic Braking System of Railway Vehicles. Archives of Transport Polish Academy of Sciences. Vil. 2 , issue 2, 1990.*

[14] *Nowicki J.: Analiza niektórych czynników decydujących o skuteczności hamowania pojazdów szynowych. Materiały IX Konferencji Naukowej „Pojazdy Szynowe", Wrocław, 1992.*

[15] *Nowicki J., Piechowiak T., i inni : Symulacja procesów hamowania pociągów dla opracowania metod i racjonalizacji urządzeń hamulcowych. Politechnika Poznańska. Temat 03.09 w centralnym Programie Badań Podstawowych 02.19, 1986-1990.*

[16] *Otto A. W. : Stand der Entwicklung von Bremswerskstoffen für Schienenfahrzeuge. ZEV – Glassers Annalen nr 11/12, 1995.*

[17] *Osuch K.: Tendencje światowe w rozwoju urzadzeń hamulcowych do wagonów kolejowych. Trakcja i Wagony nr 7, 1990.*

[18] *Prejgerzon J.J., Genkin W.A., Kownackij W.S.: Frikcionnyje metalloceramiczeskije materiały. Izd. INTJP, Mińsk. 1985.*

[19] *Saumweber E. : Auslegung und Leistungsgrenzen von Scheibenbremsem. ZEV – Glassers Annalen nr 4, 1988.*

[20] *Sorochtej M. : Kształtowanie jakości zespołu ciernego hamulca tarczowego. Przegląd Kolejowy nr 1, 1994.*

[21] *Tormoza wysokoskopoctnowo ekspressa ICE. Żeleznyje Dorogi Mira nr 5, 1989, Eisenbahntechnische Rundschen, nr 1/2, 1988.*

[22] *Tsujimura T., Manabe S. : Tiermoobrabotnyj czugun dla tormoznych diskow. Żeleznyje Dorogi Mira nr 2, 1991, Quarterly Reports of RTRI nr 4, 1989.*

[23] *Wirth X. : Ceramic alloys offer weight and cost gains. Railway Gazette International, nr 6, 1995.*

[24] *Zeuner H. : Materials for brake disc of rail vehicles. International Conference of York, London, 1979.*

[25] *Wirth X. : Improving the Performance of Disc Brakes on High – speed Rail Vehicles with a Novel Type of Brake Pad : ISOBAR. RTR nr 1, 1998*

Hendrichs W. : Bremstechnische Versuche mit dem
26] ICE-V aus hohen Geschwindigkeiten. ETR nr 37,1988.