

Stanisław NOSAL*, **Tomasz ORŁOWSKI****

USTALANIE RECEPTURY KOMPOZYTOWEGO CIERNEGO MATERIAŁU HAMULCOWEGO

BUILDING A FORMULA FOR A COMPOSITE FRICTION MATERIAL FOR BRAKES

Słowa kluczowe:

materiał cierny, składniki, projektowanie

Key words:

friction material, ingredients, planning

Streszczenie

Stosowane obecnie kompozytowe materiały cierne zawierają ponad 20 składników. Wyeliminowano z nich azbest i ołów. W nowych recepturach nie używa się też rtęci, kadmu, antymonu i chromu VI. Materiały cierne projektowane są w oparciu o wymagania klienta lub wymagania rynku. W artykule omówiono procedurę projektowania kompozytowego materiału ciernego na nakładki hamulcowe.

* Politechnika Poznańska, Instytut Maszyn Roboczych i Pojazdów Samochodowych, ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań, e-mail: stanislaw.nosal@put.poznan.pl, tel.: (61) 6475852.

** Lumag Sp. z o.o., 64-840 Budzyń, e-mail: t.orlowski@lumag.pl, tel.: (67) 2844827.

WPROWADZENIE

Wybór materiału ciernego jest bardzo ważnym czynnikiem decydującym o skuteczności hamowania pojazdu w każdych warunkach. Dlatego materiał cierny musi być tak zaprojektowany, aby spełniał te wymagania. Wiele wymagań stawianych tym materiałom, a wynikających z warunków użytkowania układów hamulcowych, jest często przeciwstawnych. Powoduje to, że receptura materiału ciernego jest zawsze kompromisem pomiędzy oczekiwaniami a możliwościami technicznymi i kosztami. Materiały cierne w zależności od zastosowania zawierają od kilkunastu do ponad 20 składników. Oprócz składu bardzo ważny jest również proces technologiczny ich wytwarzania (parametry: mieszania, prasowania oraz wygrzewania), gdyż wiele istotnych cech wyrobów jest kształtowanych w procesie produkcji.

Podczas opracowywania receptur nowych materiałów ciernych należy uwzględnić następujące kryteria [L. 1]:

- a) bezpieczeństwa – odpowiednia skuteczność hamowania w określonym przedziale temperatur, niepalność, ściśliwość, wytrzymałość mechaniczna,
- b) komfortu jazdy – odgłosy, odczucia przenoszone na pedał, dymienie, zapach, zanieczyszczenie kół,
- c) ekonomiczne – zużycie materiału ciernego i bieżni hamulca, ciężar, koszty produkcji,
- d) ekologiczne – szkodliwe oddziaływanie na ludzi i środowisko naturalne.

WYMAGANIA EKOLOGICZNE

Jednym z ważnych składników kompozytowych materiałów ciernych, stosowanym przez wiele lat, był azbest. Stwierdzono jednak, że wskutek zużycia okładzin ciernych i przedostawania się go do środowiska w postaci pyłu, stanowi on substancję działającą rakotwórczo na ludzi. Dlatego wprowadzono prawny zakaz jego stosowania. To zmusiło producentów materiałów ciernych do poszukiwania innych materiałów włóknistych. Azbest, ze względu na bardzo dobre własności swoich włókien, niską cenę i dostępność jest trudny do zastąpienia. Oprócz azbestu także inne substancje, względnie ich klasy, są podejrzewane o szkodliwe działanie na człowieka. Szczególnie są to nieorganiczne i organiczne włókna, które są używane jako substytut azbestu. Ważną rolę ogrywa tu ich zdol-

ność do przenikania do pęcherzyków płucnych i rozpuszczalność włókien w środowisku płucnym. Ponieważ w medycynie trwają dyskusje nad różnymi metodami testowymi do oceny tych właściwości włókien, poniżej przedstawiono dwa podejścia:

- 1) Podejście WHO uwzględnia jedynie stosunek długości do grubości włókien, jak również grubość (d) i długość (l) samych łądźek. Nie uwzględniono innych właściwości włókien. Jako krytyczne funkcjonują poniższe wartości:

$$l : d > 3 : 1 \quad d < 3 \mu\text{m} \quad l > 5 \mu\text{m}$$

- 2) Azbest mieści się w tej kwalifikacji. Ponieważ jednocześnie jest nierozpuszczalny w środowisku płucnym, może powodować raka wskutek długotrwałego mechanicznego drażnienia tkanki.

Oprócz zasad WHO stosuje się dzisiaj także inne sposoby klasyfikacji. Jedną z nich jest ocena rozpuszczalności włókien w środowisku płucnym (rozpuszczalność biologiczna). Nawet jeśli biologicznie rozpuszczalne włókna mogą dostać się do płuc, ich skład chemiczny jest tak ustalony, że włókna te rozpuszczają się w panującym w płucach wodnym środowisku, rozkładają się i w ten sposób nie powodują długotrwałego podrażnienia. Biologicznie nierozpuszczalne włókna w klasycznym rozumieniu, to nieorganiczne włókna mineralne, do których zaliczają się włókna bazaltowe, wełny skalne i żuźlowe, rozpylone włókna ceramiczne, ale także whiskersy (monokryształowe włókna mineralne), takie jak włókno tytanianu potasu [**L. 2**]. Ekologiczną klasyfikację materiałów ciernych zawiera **Tabela 1**.

Tabela 1. Ekologiczna klasyfikacja materiałów ciernych [2]

Table 1. Ecological classification of raw materials

Stopień ekologiczności	Materiał cierny wolny od:
1	– ołowiu i związków ołowiu (resztkowa zawartość ołowiu < 1000 ppm), – kadmu ≤ 2 ppm,
2	– ołowiu i związków ołowiu (resztkowa zawartość ołowiu < 1000 ppm), – kadmu ≤ 2 ppm, – antymonu i związków antymonu,
3	– ołowiu i związków ołowiu (resztkowa zawartość ołowiu < 1000 ppm) – kadmu ≤ 2 ppm, – antymonu i związków antymonu, – toksykologicznie niebezpiecznych włókien,

4	<ul style="list-style-type: none"> - ołowiu i związków ołowiu (resztkowa zawartość ołowiu < 1000 ppm), - kadmu ≤ 2 ppm, - antymonu i związków antymonu, - toksykologicznie niebezpiecznych włókien, - miedzi i stopów miedzi.
---	---

Kolejną grupą eliminowanych składników są metale ciężkie. Ołów był używany jako proszek oraz jako siarczek. Wymaga się, aby składniki używane w materiałach ciernych były wolne od kadmu, rtęci, chromu VI i ich związków. Jedną z wielu funkcji azbestu przejęły wprowadzone do materiałów bezazbestowych dodatki odpowiednich smarów stałych, gwarantujących trwale smarującą warstwę, m.in. trójsiarczek antymonu. Ten składnik może być również odpowiedzialny za powstawanie raka i inne szkodliwe oddziaływania na ludzi. Mimo braku prawnego zakazu nowo projektowane materiały są wolne od antymonu. W USA prowadzi się też dyskusję na temat redukcji miedzi i jej stopów z materiałów ciernych, gdyż podejrzewa się je o zagrożenie dla niektórych mchów, porostów i glonów.

PODZIAŁ MATERIAŁÓW CIERNYCH I CHARAKTERYSTYKA ICH SKŁADNIKÓW

Podział materiałów ciernych

Ze względu na oczekiwania rynkowe, przyzwyczajenia klientów, wymagania techniczne oraz wymagania prawne, po wyeliminowaniu azbestu (materiały azbestowe są ciągle używane w niektórych krajach Ameryki Południowej i Afryki) podział materiałów ciernych wygląda następująco [L. 2]:

- 1) Materiały półmetaliczne (semimetallic) zawierają ponad 50% wełny stalowej i proszku żelaza. Stosowane są głównie w USA. Współczynnik tarcia wynosi najczęściej poniżej 0,40. Materiały te charakteryzują się dobrymi własnościami akustycznymi, komfortem użytkowania oraz małym zużyciem, w tym również tarczy. Są mniej stabilne termicznie niż materiały azbestowe. To powoduje, że nie nadają się do hamowania z wysokich prędkości oraz do używania ich w samochodach ciężarowych powyżej 6 t, gdyż wówczas ich skuteczność hamowania spada drastycznie i rośnie zużycie.
- 2) Materiały o niskiej zawartości stali (low steel) zawierają jej do 30% wagowych. Jako zamiennik azbestu stosuje się w nich różne włókna organiczne i nieorganiczne. Niektóre z używanych włókien również podejrzewane są o efekt rakotwórczy. Materiały te używane są głów-

nie w Europie. Współczynnik tarcia wynosi od 0,35 do 0,5. Mają gorsze własności akustyczne i powodują większe zużycie tarczy niż w przypadku materiałów półmetalicznych, ale mają zdecydowanie większą odporność termiczną, wysoką skuteczność hamowania w szerokim zakresie temperatur, prędkości i obciążeń. Dlatego są stosowane do samochodów osobowych i ciężarowych.

- 3) Materiały NAO (Non Asbestos Organic) nie zawierają stali ani twardej frakcji składników ciernych. Stosowane są głównie w Japonii. Współczynnik tarcia wynosi od 0,3–0,4. Materiały te mają bardzo dobre własności akustyczne, dobrą charakterystykę zużycia, nie nadają się jednak do pojazdów osiągających wysokie prędkości oraz jeżdżących z dużym obciążeniem.
- 4) Materiały niezawierające metali (Nonmetallic) – podobnie jak NAO nie zawierają stali oraz dodatkowo nie zawierają metali nieżelaznych, jak miedź, brąz i mosiądz. Te materiały ze względu na niską przewodność cieplną praktycznie są rzadko spotykane w hamulcach tarczowych do pojazdów osobowych i ciężarowych.
- 5) Materiały hybrydowe zawierają kombinację charakterystyk materiałów NAO i o niskiej zawartości stali.
- 6) Materiały spiekane – są przeznaczone do zastosowań specjalnych, np. w urządzeniach przemysłowych, pojazdach szynowych, motocyklach.
- 7) Materiały cierne do tarcz ceramicznych. Obecnie najczęściej stosuje się organicznie wiązane materiały o niskiej zawartości stali. Są to jednak inne materiały do tarcz żeliwnych, stalowych i aluminiowych.
- 8) Międzywarstwa – cienka warstwa (2–3 mm grubości) specjalnego materiału znajdująca się między płytką nośną klocka a właściwym materiałem ciernym. Jej głównym zadaniem jest zwiększenie przyczepności między blachą nośną a materiałem ciernym. Dodatkowo również jest izolatorem termicznym oraz poprawia własności akustyczne klocka hamulcowego.
- 9) Kompozyty węglowe C-C i pokrewne, stosowane np. w hamulcach samolotów.

Składniki

Materiały cierne składają się z kilku grup składników:

- składniki wiążące: żywica fenolowa, melaminowa, kauczuk – główna ich funkcja to wiązanie matrycy kompozytu oraz poprawa komfortu użytkownika,

- włókna: chemiczne, np. PAN, aramidowe, węglowe, szklane, naturalne, wełna mineralna – zwiększają wytrzymałość mechaniczną oraz poprawiają homogeniczność mieszanki ciernej,
- smary stałe: grafit, koks naftowy, siarczki metali, fluorek wapnia – głównie używa ich się w celu ograniczenia zużycia materiału ciernego i bieżni hamulca oraz jako składniki antyfadujące,
- metale: wełna stalowa, proszki i wióry cynku, miedzi, mosiądzu, brązu – stosuje się je w celu odprowadzenia ciepła przez przewodzenie i chwilowe pochłanianie, zwiększają wytrzymałość mechaniczną oraz poprawiają odporność na zużycie,
- napełniacze: tlenek glinu, baryt, kreda, piasek cyrkonowy, kaolin, talk, magnezyt, krzemian wapnia, tlenek żelaza, tlenek chromu, węgiel krzemu – odpowiedzialne są za charakterystykę tarciowo-zużyciową w funkcji temperatury, prędkości i nacisku.

PROCEDURA PROJEKTOWANIA MATERIAŁU CIERNEGO

Optymalny dla danych warunków eksploatacji materiał cierny to taki, który:

- zawiera wymagane składniki w odpowiedniej ilości i postaci,
- jest wytworzony przy najkorzystniejszych parametrach procesu technologicznego,
- ma akceptowalny koszt wytworzenia,
- ma własności użytkowe zbliżone do wymaganych.

W procesie tworzenia nowego materiału ciernego można wyróżnić kilka etapów, a mianowicie:

- opracowanie receptury,
- ustalenie optymalnych parametrów procesu technologicznego,
- badanie własności: mechanicznych, fizycznych, chemicznych i użytkowych.

Sposoby opracowywania receptury

Metoda dodawania kolejnych składników

Metodę tę można też określić mianem postępowania „krok po kroku”. Kolejne kroki w tej metodzie to: dobór składu żywicy A, ustalenie optymalnej zawartości żywicy do zawartości azbestu A/B (układ dwuskładnikowy A+B), utworzenie układu trójskładnikowego z napełniaczem C_1 – (A+B+C₁), do-

dawanie kolejnych napełniaczy do mieszanin trój-, cztero- i więcej składnikowych ($A+B+C_1+C_2$, $A+B+C_1+C_2+C_3$, itd.) z jednoczesną redukcją zawartości jednego ze składników, np. C_1 . Ostateczny skład jakościowy i ilościowy osiągnano więc drogą kolejnych „wariantowań”, polegających na sporządzaniu i badaniu własności wielu materiałów ciernych, poczynawszy od optymalnego układu dwuskładnikowego przez kolejne wprowadzanie nowych napełniaczy i optymalizację układów trój-, cztero- i więcej składnikowych. Tę metodę ustalania składu zastosował m.in. S. Zawalski [L. 3]. Później zaczęto również używać analizy termograwimetrycznej, umożliwiającej eliminując składników mało stabilnych termicznie [L. 4, 5, 6].

Metoda modyfikacji już stosowanego materiału ciernego

W tej metodzie redukuje się w materiale wyjściowym udział jednego z komponentów i jednocześnie zwiększa udział drugiego. Wykorzystuje się znany efekt synergiczny, np. wełny stalowej z koksem naftowym, wełny mineralnej z barytem. Metodę wykorzystywano do opracowania pierwszych materiałów bezazbestowych. Bazę wyjściową stanowił materiał azbestowy, w którym azbest zastępowano innym włóknem lub mieszaniną włókien z dodatkami napełniaczy wzmacniających [L. 7, 8].

Metoda modyfikacji receptury bazowej, spełniającej określone wymagania rynku lub klienta

Te spełnione wymagania to mogą być wymagania ekologiczne, skuteczności hamowania lub przynależności do określonej grupy materiałów ciernych (np. NAO – non asbestos organic, semimetalic, low steel). W dalszym etapie dobiera się poszczególne składniki sprawdzając współczynnik tarcia oraz skuteczność hamowania. Przykład częściowy takiego postępowania jest opisany w artykule [L. 9]. Do materiału bazowego dodaje się badany składnik, np. w ilościach 2, 4, 6, 8 i 10% wagowych. Następnie te materiały poddaje się testom i ocenia się jaka zawartość badanego składnika jest optymalna. Dalszy sposób postępowania z kolejnymi składnikami jest podobny.

Metody oparte na modelach

Modele mikromechaniczne wiążą wewnętrzne własności oraz udział procentowy każdego składnika z własnościami użytkowymi kompozytu

[L. 8, 10]. Po opracowaniu tych modeli (w postaci odpowiedniego układu równań) łączy się je z algorytmami optymalizacyjnymi w celu znalezienia najlepszego kompozytu [L. 10]. Problem optymalizacji receptury polega na ustaleniu takiego względnego udziału objętościowego odpowiedniej liczby składników, który umożliwi uzyskanie materiału ciernego o założonych własnościach użytkowych.

Metodę optymalizacji składu materiału ciernego przedstawiono również w publikacji [L. 11]. Dla układu czteroskładnikowego oznaczono graniczne przedziały zawartości w kompozycie. Wykonano i przebadano 15 różnych materiałów. Na podstawie analizy wyników wyznaczono równania regresji i optymalny skład. Kato [wg L. 8] rozwinął genetyczny algorytm połączony z wielokrotną analizą regresji, by dobrać składniki.

Metody modelowania uwzględniają interakcję pomiędzy dwoma składnikami, jednak nie są w stanie przewidzieć takiego działania dla wielu składników. Inny ważny czynnik, zanedbywany w modelach, to przenoszenie składników bieżni hamulca na powierzchnię materiału ciernego i tworzenie tzw. third body layer [L. 8].

Mimo wielu prób stworzenia modeli teoretycznych, najbardziej popularną metodą rozwoju materiałów ciernych w przemyśle jest eksperyment, wykorzystujący wiedzę z wielu wcześniejszych projektów o znanych i opisanych efektach synergicznych składników.

Procedura badawcza

Procedurę badawczą materiałów ciernych zawiera m.in. norma ISO 15484:2008 [L. 12]. Opisuje ona sposób postępowania w siedmiu fazach, od koncepcji i zaawansowanego planowania, przez stworzenie prototypów, walidację, do produkcji seryjnej. Produkty zostały podzielone na cztery grupy, do hamulców tarczowych do samochodów osobowych, bębnowych do samochodów osobowych, bębnowych do samochodów ciężarowych, tarczowych do samochodów ciężarowych.

Do każdej grupy określone są rodzaje testów uwzględniające specyfikę hamulca i ilość powtórzeń. Pierwsze badania rozpoznawcze wykonuje się na małych próbkach na urządzeniach laboratoryjnych, następnie wykonuje się prototypy, które testuje się na rzeczywistych układach hamulcowych na stanowiskach bezwładnościowych i/lub na pojazdach. Końcowym etapem jest walidacja na pojazdach, przeprowadzana w ekstremalnych warunkach, od mroźnych warunków zimowych po gorące

zjazdy górskie. Oprócz własności ogólnych, fizykomechanicznych, chemicznych wymagane jest przeprowadzenie testów na stanowisku bezwładnościowym: skuteczności hamowania np. wg normy ISO 26865 (minimum 8 powtórzeń) i testu zużyciowego np. wg normy ISO 26866 (minimum 4 powtórzenia). Test skuteczności hamowania trwa średnio około 20 godzin, a test zużyciowy 120 godzin. Jedna godzina pracy takiego stanowiska kosztuje około 100 EUR. Wynika z tego, że cykl badawczy według ww. normy jest bardzo drogi.

PODSUMOWANIE

W artykule przeanalizowano metody projektowania kompozytowego materiału ciernego na nakładki hamulcowe, spełniającego założone wymagania oraz przedstawiono wiele ważnych informacji niezbędnych technologowi przy opracowaniu nowych materiałów ciernych. Ze względu na ograniczoną objętość artykułu pominięto technologię wytwarzania materiałów ciernych w procesach mieszania, prasowania i wygrzewania.

LITERATURA

1. Nosal S., Orłowski T.: Wpływ miedzi i jej stopów wprowadzonych do ciernego materiału hamulcowego na jego właściwości tribologiczne, X Jubileuszowy Kongres Eksploatacji Urządzeń Technicznych, Stare Jabłonki 2005, 401–410.
2. Breuer B., Bill K.H., Brake Technology Handbook, SAE International, Warrendale 2007.
3. Zawalski S., Badania nad optymalizacją tworzywa na nakładki hamulców tarczowych. Praca doktorska. WMRI P, Poznań 1973.
4. Janecki J., Prowotorow A., Szumniak J.: Kształtowanie właściwości ciernych według kryterium energii powierzchniowej składników, Wybrane Problemy Tribologii, PWN, Warszawa 1983, 509–516.
5. Janecki J.: Zużycie części samochodowych wykonanych z tworzyw sztucznych, WKŁ, Warszawa 1982, 174–192.
6. Banaszekiewicz S.: Wpływ wybranych napełniaczy na własności użytkowe nakładek hamulcowych ciężkich pojazdów terenowych, praca doktorska, Kraków 1980.
7. Banaszekiewicz S., Szumniak J., Krysiak-Kotlarska G., Wpływ niektórych napełniaczy na stabilność cieplną tarcia i zużycia bezazbestowych kompozytów ciernych, VII Seminarium Tworzywa Sztuczne w Budowie Maszyn, Kraków 1994, 21–28.

8. Lu Y.: A combinatorial approach for automotive friction materials: Effects of ingredients on friction performance, *Composites Science and Technology*, nr 66 2006, 591–598.
9. Myalski J., Hyla I.: Kształtowanie odporności cieplnej materiałów na elementy cierne, *Inżynieria Materiałowa*, nr 3–4 1999, 132–137.
10. Grzegorzek W., Kempa A., Ścieszka S., Żołnierz M.: Hamulce cierne – współczesne problemy badawcze i konstrukcyjne, *Prace Naukowe Instytutu Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechniki Wrocławskiej*, konferencje Vol. 87, Nr 27, Wrocław 2002, 99–105.
11. Hyla I., Myalski J., Wieczorek J., Grosz A.: Projektowanie właściwości tribologicznych wielofazowych kompozytów ciernych, *Nowe technologie i materiały w metalurgii i inżynierii materiałowej. VI Seminarium naukowe*, Katowice 1998, 216–219.
12. Norma ISO 15481:2008 Road vehicles – Brake lining friction materials – Product definition and quality assurance.

Recenzent:
Witold PIEKOSZEWSKI

Summary

Composite friction materials used today contain over 20 components. Asbestos and lead has been eliminated from their contents. New formulas contain no mercury, cadmium, antimony, and chrome VI. Friction materials are designed based on the customers' or the market's requirements. The article elaborates the designing procedure for composite friction material for brake linings.