

Dariusz M. Bieliński^{1,2},
Otmar Dobrowolski¹,
Grzegorz Nyszkowski³,
Maria Rajkiewicz²

Zastosowanie termowizji w badaniach trybologicznych materiałów polimerowych*

W pracy przedstawiono wstępne wyniki badań dotyczących zastosowania kamery termowizyjnej do oceny rozkładu temperatury w węźle ciernym, w którym jednym z elementów jest materiał polimerowy. Jako obiekty badań wybrano kompozyty cierne okładzin hamulcowych i gumę na bieżniki opon samochodowych. Przeanalizowano wpływ składnika polimerowego kompozytów oraz rodzaju sadzy użytej jako napelnacza gumy na temperaturę w warstwie wierzchniej oraz jej rozkład w głąb od powierzchni kontaktu badanych materiałów. Stwierdzono istotne różnice między kompozytem ciernym, który nagrzewa się od powierzchni, a gumą, w której temperatura narasta w wyniku deformacji wewnętrznych. Analiza termowizyjna, w powiązaniu z badaniami trybologicznymi, umożliwia optymalizację składu materiałów polimerowych z punktu widzenia ich eksploatacji.

Słowa kluczowe: materiał polimerowy, tarcie, termowizja

Application of thermovision in tribological investigations of polymer materials

The paper demonstrates the results of preliminary studies on the application of thermovision camera for estimation of temperature distribution in the friction pair containing a polymer material. Friction composites for braking pads and rubber used for tyre treads have been chosen as the objects of investigations. The influence of polymer matrix in the case of composites and the kind of carbon black used as a filler in rubber on temperature in the surface layer as well as its distribution from the contact surface to the bulk of material, has been analyzed. Significant difference between friction composite, which warms up from the surface, and rubber, which temperature increases due to internal deformations, has been detected. Thermovision analysis, together with tribological investigations, makes possible compositional optimization of polymer materials from their exploitation point of view.

Key words: polymer material, friction, thermovision

* Wcześniejsza wersja artykułu ukazała się w czasopiśmie „Tribologia” nr 2/2007. Przedruk za zgodą Redakcji i Autorów

¹ Politechnika Łódzka, Instytut Technologii Polimerów i Barwników, Łódź

² Instytut Przemysłu Gumowego „Stomil”, Piastów

³ Wojskowy Instytut Chemii i Radiometrii, Warszawa

1. Wprowadzenie

W węźle tarcia generowane jest ciepło, które może mieć zasadniczy wpływ na przebieg procesów trybologicznych. Jest to szczególnie istotne w przypadku, gdy jednym z elementów pary cierniej jest materiał polimerowy. Istotne zmiany w przebiegu jego charakterystyki termomechanicznej mają miejsce nawet poniżej 100 °C [1]. Z powodu ograniczonej przewodności cieplnej w warstwie wierzchniej materiału wzrasta temperatura, która wraz z generowanymi podczas tarcia naprężeniami ścinającymi katalizuje procesy utleniania polimeru [2]. W zależności od budowy makrocząsteczek prowadzi to albo do degradacji, albo do ich usieciowania, decydując o charakterze tarcia, wielkości współczynnika tarcia i zużycia ściernego [3]. Zdegradowany polimer tworzy na powierzchni małowiązany film, który może przejawiać właściwości smarne, podczas gdy następstwem znacznego stopnia usieciowania jest silne zużycie ściernego materiału. W przypadku elasto-

merów, których makrocząsteczki są mniej sztywne od makrocząsteczek termoplastów, często dochodzi do wtórnej reakcji pomiędzy produktami zużycia, które „zlepiają się” w postaci wałeczków, obniżając współczynnik tarcia [4]. Znajomość rozkładu temperatury w węźle tarcia oraz jej gradientu w warstwie wierzchniej elementów pary cierniej pozwala na optymalny dobór materiałów, szczególnie polimerowych, oraz warunków ich pracy.

2. Część doświadczalna

Materiały

Obiekt badań stanowiły polimerowe materiały kompozytowe okładzin ciernych przeznaczone dla kolejnictwa oraz wulkanizaty siarkowe kauczuku butadienowo-styrenowego (SBR) napelnione sadzą o różnej aktywności, stosowane na bieżniki opon samochodowych. W celu porównania wpływu sadzy na rozkład

temperatury w węźle tarcia badaniom poddano również nienapełnione wulkanizaty SBR. Oznaczenia próbek wraz z ich krótkim opisem przedstawiono w tabeli 1.

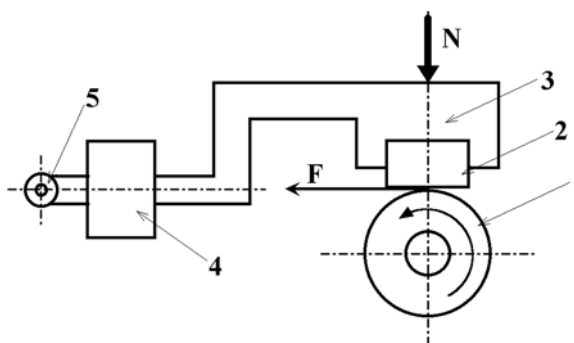
Tabela 1. *Obiekty badań wraz z krótkim opisem*
Table 1. *The objects of studies together with their short description*

L.p.	Symbol próbki	Opis próbki
1	PR — próbka referencyjna	wg receptury firmy FRENOPLAST
2	I E	modyfikacje polegające na zmianie polimeru bazowego kompozytu
3	II E	
4	III E	
5	E2+Fe	kompozyt o zmodyfikowanej matrycy, z dodatkiem włókna stalowego
6	E2	kompozyt niezawierający włókna stalowego
7	N1	Kompozyt kauczuku NBR
8	SBR/N 110	siarkowe wulkanizaty kauczuku butadienowo-styrenowego (SBR, Ker 1500, Dwory S.A. (Polska) napełnione 50 cz. wag. sadzy (N lub FW)/100 cz. wag. SBR
9	SBR/N 234	
10	SBR/N 772	
11	SBR/N 990	
12	SBR/FW 200	

Metodyka badań

Trybometr

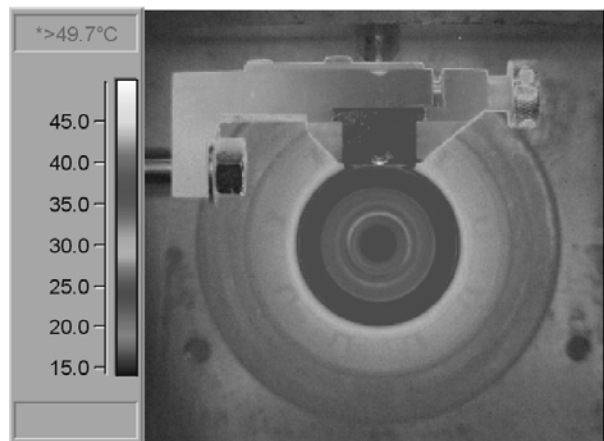
Badania trybologiczne prowadzono za pomocą aparatu T-05 (Instytut Technologii Eksploatacji-PIB, Polska) o skojarzeniu ciernym rolka (kompozyt cierny lub guma) – klocek (stal 3H13 po azotowaniu do twar-



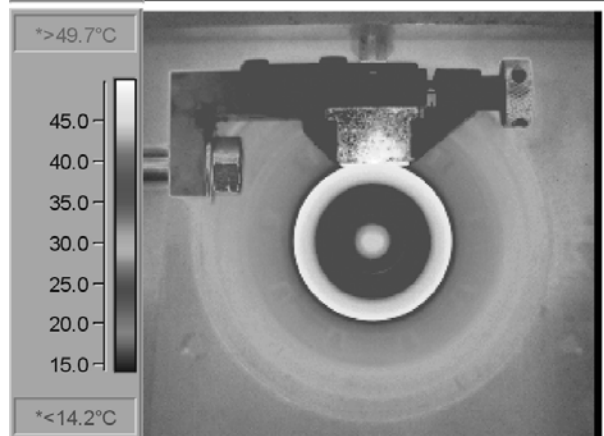
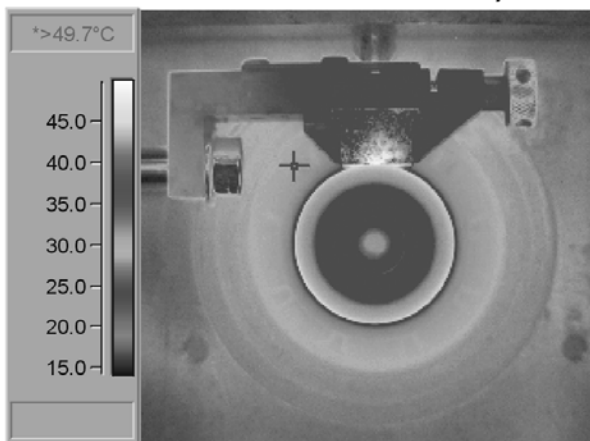
Rys. 1. *Schemat trybometru T-05: 1 – rolka $\phi=35$ mm (kompozyt cierny lub guma), 2 – przeciwpróbka stalowa (klocek), 3 – ramię z uchwytem, 4 – czujnik siły, 5 – przegub*

Fig. 1. *Scheme of a T-05 tribometer: 1 – ring $\phi=35$ mm (friction composite or rubber), 2 – steel counterface (block), 3 – lever holder, 4 – force sensor, 5 – articulated joint*

A) 5 min



B) 10 min



C) 15 min

Rys. 2. *Obrazy rozkładu temperatury w próbce referencyjnej (PR) po: 5, 10 i 15 min tarcia*

Fig. 2. *The pictures of temperature distribution for the reference sample (PR) after: 5, 10 and 15 min from the beginning of friction*

dości 800 HV), który współpracował z systemem do akwizycji i obróbki danych eksperymentalnych SPIDER 8 (Hottinger Messtechnik, Niemcy). Schemat aparatu oraz geometrię węzła tarcia przedstawia rysunek 1.

Badania prowadzono przez 60 min przy prędkości obrotowej i obciążeniu normalnym, dobranych eksperymentalnie na podstawie badań wstępnych, a mianowicie:

- 520 obr./min i 81,4 N, w przypadku kompozytów okładzin hamulcowych oraz
- 60 obr./min i 20 N, dla próbek wykonanych z gumy,

rejestrując „on-line” przebieg siły tarcia. Analizę uzyskanych w ten sposób charakterystyk trybologicznych przeprowadzono według opisanej wcześniej procedury [5].

W przypadku materiału okładzin hamulcowych istotne zmiany w wielkości siły tarcia w czasie można uzyskać jedynie przy wysokich prędkościach i dużych obciążeniach. Natomiast formułując warunki tarcia gumy posłużono się wcześniejszymi doświadczeniami [6].

Kamera termowizyjna

W badaniach wykorzystano kamerę termowizyjną Thermovision 900 LW (AGEMA, Szwecja). Akwizycja danych odbywała się co 1 min przez 15 min – co jak ustalono eksperymentalnie – było czasem wystarczającym do stabilizacji cieplnej pary cieiernej – rysunek 2.

Analizowano zmiany wartości temperatury wzdłuż promienia próbki badanego materiału polimerowego, prostopadle do powierzchni przeciwpróbki stalowej.

3. Wyniki badań i dyskusja

Materiały kompozytowe na okładziny hamulcowe

Temperatura badanych ciernych materiałów kompozytowych rośnie bardzo szybko. Już po upływie 1 min od rozpoczęcia eksperymentu wzrasta aż o kilkadziesiąt stopni. Podobnie przedstawia się sprawa w przypadku gradientu temperatury od powierzchni tarcia w głąb materiału. Takie zachowanie umożliwia porównanie badanych materiałów – tabele 2 i 3.

Najmniej nagrzewają się materiały próbek E2+Fe i N1, które również charakteryzuje mały gradient temperatury od zewnętrznej powierzchni roboczej do nieobciążonej powierzchni wewnętrznej. Najgorzej wypada próbka referencyjna (PR) oraz materiały III E i E2, które rozgrzewają się najsilniej (temperatura pracy ich warstwy wierzchniej przekracza 100 °C). Próbka III E odznacza się znacznym gradientem temperatury, który może być następstwem ograniczonej (mniejszej niż pozostałych badanych materiałów) przewodności cieplnej i korzystnie wpływać na trwałość eksploatacyjną kompozytów.

Tabela 2. Zmiana temperatury (ΔT) powierzchni polimerowych kompozytów ciernych w czasie

Table 2. Temperature change (ΔT) of the surface layer of friction polymer composites in time

L.p.	Symbol próbki	ΔT , °C					
		1 min	3 min	5 min	8 min	10 min	15 min
1	PR – próbka referencyjna	23	45	50	63	66	69
2	I E	25	32	40	40	41	43
3	II E	23	41	46	50	50	53
4	III E	19	33	35	45	46	50
5	E2+Fe	19	36	40	47	47	48
6	E2	20	38	45	57	62	65
7	N1	19	36	42	44	46	47

Tabela 3. Zmiana gradientu temperatury zachodząca w polimerowych kompozytach ciernych

Table 3. Change to the temperature gradient in friction polymer composites

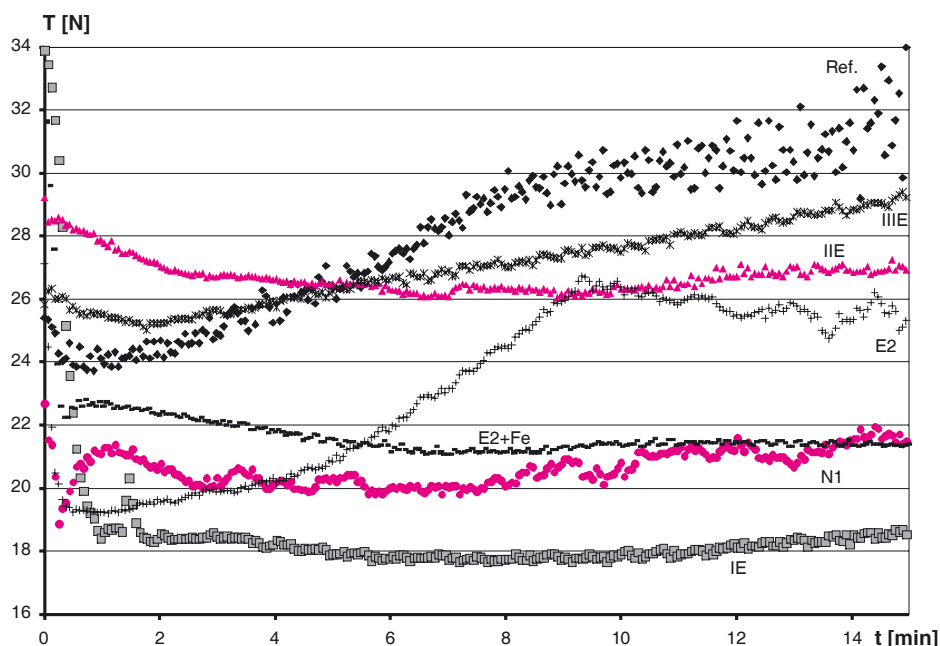
L.p.	Symbol próbki	Gradient temperatury, °C					
		1 min	3 min	5 min	8 min	10 min	15 min
1	PR – próbka referencyjna	5	12	8	14	10	9
2	I E	11	8	10	8	9	7
3	II E	10	6	5	8	8	6
4	III E	23	13	11	16	20	18
5	E2+Fe	8	10	4	5	5	6
6	E2	5	6	5	6	8	5
7	N1	10	7	8	10	6	8

Materiał III E wykazuje również stabilną i wysoką (porównywalną do próbki referencyjnej) wartość siły tarcia. W odróżnieniu od materiału referencyjnego, ten kompozyt zachowuje się stabilnie, natomiast siła tarcia w przypadku PR wyraźnie zmienia się w czasie, osiągając maksimum wartości dopiero po około 8 min – rysunek 3.

Guma przeznaczona na bieżniki opon samochodowych

W odróżnieniu od materiałów ciernych guma nie wykazuje znaczących zmian temperatury w warstwie wierzchniej próbki. Pewne różnice można jednak zaobserwować, jeśli do napełnienia kauczuku butadienowostyrenowego (SBR) użyje się sadzy o różnej aktywności – rysunek 4.

Wskutek słabej przewodności cieplnej materiału, o kilka rzędów wielkości mniejszej niż przeciwpróbki



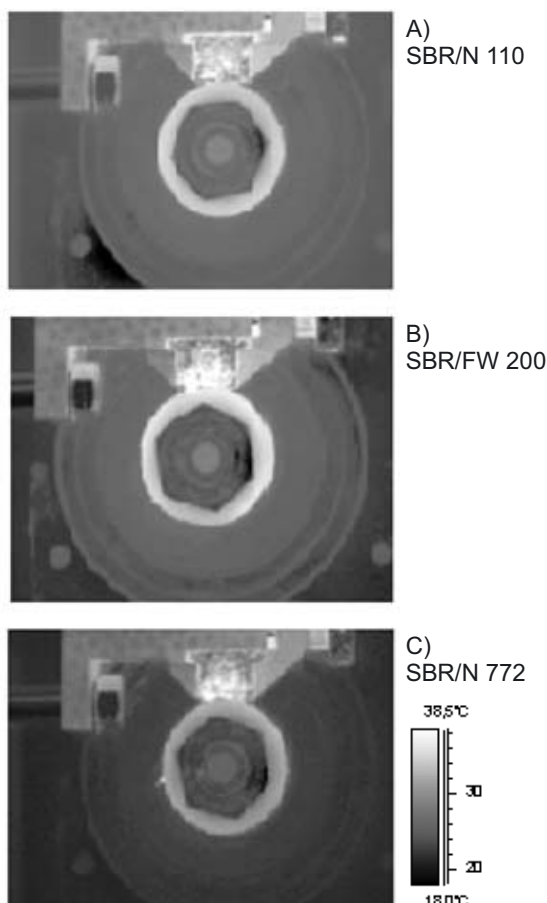
Rys. 3. Przebieg siły tarcia w czasie dla badanych kompozytów ciernych
 Fig. 3. The function graph of friction force in time for the friction composites studied

stalowej, ta ostatnia nagrzewa się bardzo szybko. Ta sama przyczyna leży u podstaw braku przepływu ciepła między wnętrzem próbki gumowej a przeciwpróbką. Konsekwencją jest wzrost temperatury wewnątrz gumy, który powinien być tym większy, im większa jest zdolność napelnacza do tworzenia własnej sieci przestrzennej – tzw. struktury – w ośrodku kauczukowym [7, 8]. Z tego m.in. powodu nie stosuje się krzemionki w mieszankach oponowych. Praca w warunkach dynamicznych umożliwia porównanie badanych materiałów – tabela 4.

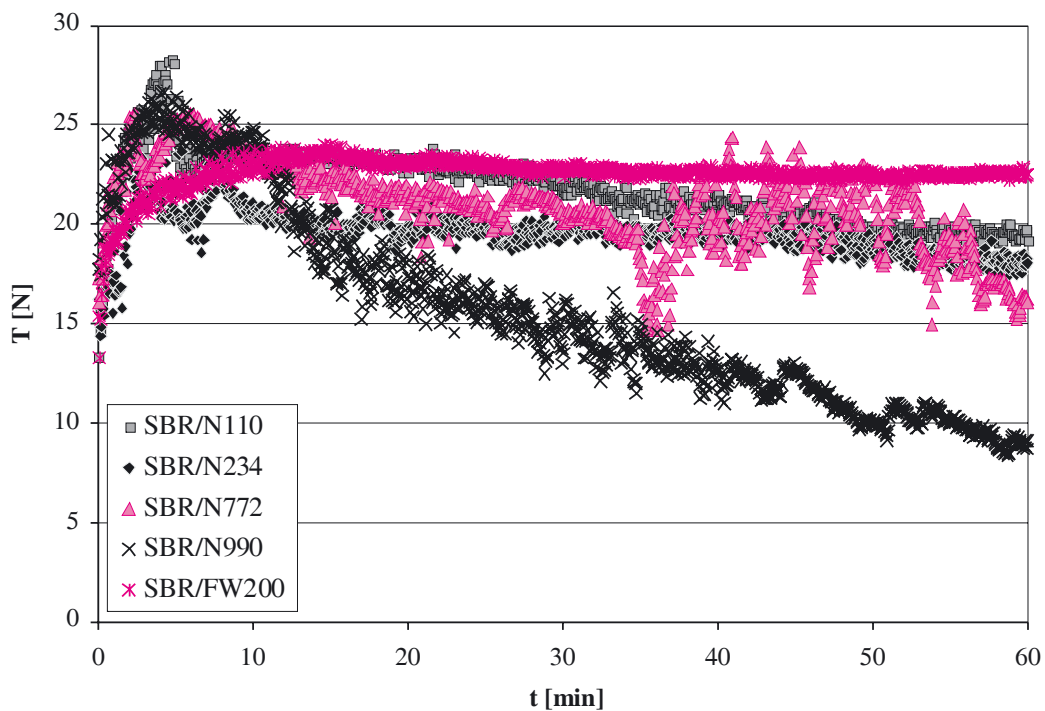
Tabela 4. Zmiana temperatury (ΔT) powierzchni badanych próbek gumy w czasie
 Table 4. Temperature change (ΔT) to the surface layer of the rubber samples studied in time

L.p.	Symbol próbki	$\Delta T, ^\circ C$					
		1 min	3 min	5 min	8 min	10 min	15 min
1	SBR/N 110	1	1	6	7	8	8
2	SBR/N 234	1	2	3	3	4	5
3	SBR/N 772	0	3	4	6	7	7
4	SBR/N 990	2	5	6	9	8	8
5	SBR/FW 200	0	1	2	4	4	3

Jednak uzyskane wyniki potwierdzają zasadniczą różnicę jedynie między sadzą FW 200, o wyraźnym „kwaśnym” charakterze chemicznym powierzchni czyniącym ją niekompatybilną z niepolarnym kauczukiem, a pozostałymi gatunkami sadzy. Wyraźna różnica w zdolności do tworzenia własnej struktury pomiędzy sadzami N 110 i N 990 nie przekłada się na końcowy



Rys. 4. Obrazy rozkładu temperatury w próbkach gumy SBR napelnionych różnymi gatunkami sadzy: A) N 110, B) FW 200 i C) N 772, zarejestrowane po 15 min tarcia
 Fig. 4. Pictures of temperature distribution for SBR samples filled with the various kinds of carbon black: A) N 110, B) FW 200 i C) N 772, registered after 15 min from the beginning of friction



Rys. 5. Przebieg siły tarcia w czasie dla badanych próbek gumy
 Fig. 5. The function graph of friction force in time for the rubber samples studied

przyrost temperatury w warstwie wierzchniej wulkanizatów w wyniku tarcia. Pewnych różnic można się jednak dopatrzeć w kinetyce „rozgrzewania się” materiału. Wynik uzyskany w odniesieniu do sadzy N 234 – tzw. improved, świadczy o możliwości optymalizacji struktury materiału i potwierdza zasadność powszechnego stosowania tej sadzy w przemyśle oponiarskim.

4. Wnioski

- ◆ Stabilizacja warunków cieplnych i siły tarcia w badanych parach ciernych stal–materiał polimerowy zachodzi już po upływie 15 min.

- ◆ Pomiary wykonane za pomocą kamery termowizyjnej przy większym obciążeniu i większej prędkości obrotowej są korzystniejsze z punktu widzenia możliwości zaobserwowania różnic w zachowaniu się próbek materiału. W przypadku próbek gumy ograniczenie stanowi zużycie ściernego materiału.

- ◆ Gradient temperatury wykazywanej podczas tarcia przez próbki modyfikowanych kompozytów jest w większości przypadków zbliżony do wartości uzyskanych w badaniach referencyjnej próbki okładziny czarnej (PR). Wyjątek stanowi kompozyt III E. Nowy materiał lepiej odprowadza ciepło w porównaniu z PR i na tle pozostałych odznacza się stabilnym przebiegiem siły tarcia w czasie. Konsekwencją jest jego wolniejsze rozgrzewanie się w porównaniu z innymi materiałami, w tym materiału referencyjnego, i brak oscylacji na krzywych eksperymentalnych przebiegu siły tarcia.

- ◆ Na podstawie przeprowadzonych badań trybologicznych i analizy termowizyjnej za najbardziej obie-

cujący materiał kompozytowy na okładziny cierne hamulców należy uznać kompozyt III E. Parametry pracy tego materiału nie są gorsze, a nawet pod pewnymi względami przewyższają parametry materiału referencyjnego. Celowym byłoby zweryfikowanie uzyskanych wyników badań laboratoryjnych w testach stanowiących na hamowni.

- ◆ Próbkę gumy nagrzewają się w wyniku tarcia nie od powierzchni kontaktu a od wnętrza materiału. W wyniku małej przewodności cieplnej w jego wnętrzu dochodzi do kumulacji ciepła, co jest jednak najbardziej widoczne w przypadku gumy, w której napełniacz jest silnie związany z kauczukiem. Mniej istotne jest, czy tworzy on własną, wewnątrzcząsteczkową sieć przestrzenną. Pomimo licznych ścieżek perkolacji sprzyjających przepływowi ciepła, dominujący wpływ mają opory wewnętrzne towarzyszące deformacji materiału.

- ◆ Najmniejszy przyrost temperatury zanotowano w próbce SBR napełnionej sadzą FW 200, której powierzchnia jest najmniej kompatybilna z makrocząsteczkami kauczuku (słabe oddziaływania na granicy faz). Wulkanizaty SBR napełnione sadzą N 234 – tzw. „improved”, o ograniczonej zdolności do tworzenia przestrzennej sieci wewnątrzcząsteczkowej – tzn. strukturze, ułatwiającej odprowadzenie ciepła z materiału, wskazują na kierunek modyfikacji napełniacza przeznaczonego do gumy pracującej w warunkach dynamicznych.

Literatura

1. Łączyński B.: Tworzywa wielkocząsteczkowe. WNT, Warszawa 1982

2. Rymuza Z.: *Trybologia polimerów ślizgowych*. WNT, Warszawa 1986
3. Płaza S.: *Fizykochemia procesów tribologicznych*. Wyd. Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź 1997
4. Zhang S.W.: *State-of-the-art of polymer tribology*. *Tribology Int.* 1998, 31 (1-3), 49
5. Bieliński D., Dobrowolski O., Głąb P., Ślusarski L.: *Wpływ stopnia dyspersji i dystrybucji sadzy na właściwości mechaniczne i tribologiczne gumy*. *Tribologia* 2004, 197 (5), 31
6. Bieliński D., Ślusarski L., Głąb P., Dobrowolski O.: *Dispersion of fillers and its effect on properties of rubber*. *Elastomery* 2005, 2 (Wyd. Specjalne), 42
7. Bieliński D., Ślusarski L., Dobrowolski O., Głąb P., Dryzek E.: *Studies of Filler Agglomeration by AFM and PAS. Part I: Silica filled compounds*. *Kautsch. Gummi Kunstst.* 2004, 57 (11), 579
8. Bieliński D., Ślusarski L., Dobrowolski O., Głąb P., Dryzek E.: *Studies of Filler Agglomeration by AFM and PAS. Part II: Carbon black mixes*. *Kautsch. Gummi Kunstst.* 2005, 58 (5), 239

Instytut Przemysłu Gumowego „Stomil” oferuje nowe monografie:

• TLENEK CYNKU W MIESZANKACH GUMOWYCH

Autorzy:

Leszek Pyskło, Wanda Parasiewicz, Piotr Pawłowski, Karol Niciński –
Instytut Przemysłu Gumowego „Stomil”

cena monografii – 49 zł

• ELASTOMERY I PRZEMYSŁ GUMOWY

Praca zbiorowa pod redakcją

Wandy Parasiewicz – Instytut Przemysłu Gumowego „Stomil”

i Władysława M. Rzymskiego – Politechnika Łódzka

cena monografii – 80 zł

• NAPEŁNIACZE WĘGLOWE WE WZMACNIANIU ELASTOMERÓW

Autorzy:

Jacek Magryta, Cezary Dębek, Krzysztof Potocki, Kinga Makuła –
Instytut Przemysłu Gumowego „Stomil”

cena monografii – 42 zł