

Wojciech WIELEBA^{*}, Anna DOBROWOLSKA^{*}

OPORY TARCIA WYBRANYCH MATERIAŁÓW POLIMEROWYCH PODCZAS ŚLIZGANIA PO LODZIE

**FRICITIONAL RESISTANCE OF POLYMER MATERIALS
DURING SLIDING ON ICE**

Słowa kluczowe:

materiały polimerowe, tarcie, lód

Key words:

polymer materials, friction, ice

Streszczenie

Specyficzne właściwości wody znajdującej się w fazie stałej (lodu) umożliwiają ślizganie się po niej innych ciał stałych przy niewielkim współczynniku tarcia. Podczas ślizgania materiału polimerowego po powierzchni lodu zachodzi wiele różnych zjawisk, które wpływają na opory tarcia. Autorzy przedstawili wyniki badań wpływu temperatury otocze-

^{*} Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczny, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław.

nia w zakresie od -30 do -5°C na wartość współczynnika tarcia (statycznego i kinetycznego) wybranych tworzyw sztucznych (termoplastycznych: PTFE, POM PE-HD oraz elastomerów: NBR, PUR, SI) po lodzie. Badania przeprowadzono na stanowisku typu pin-on-disk, które umieszczono w komorze klimatycznej. Umożliwiło to kontrolowanie warunków otoczenia. Uzyskane wyniki wykazały, że współczynnik tarcia badanych materiałów maleje wraz ze wzrostem temperatury. Wyjątkiem były materiały elastomerowe (NBR, PUR), dla których zaobserwowano obniżenie współczynnika tarcia w temperaturze poniżej -20°C . Przyczyniła się do tego zmiana elastyczności (sztywności) tych materiałów wraz z obniżeniem temperatury.

WPROWADZENIE

Specyficzne właściwości wody znajdującej się w fazie stałej (lodu) umożliwiają ślizganie się po niej innych ciał stałych przy niewielkich oporach tarcia. Uważa się powszechnie, że jest to możliwe dzięki cienkiej warstewce wody, która powstaje pomiędzy powierzchnią materiału a lodem. Koncepcja istnienia takiej warstewki nie jest nowa, jednak przez wiele lat nie wiedziano, skąd się ona bierze i w zasadzie do tej pory nie ma jednoznacznego wyjaśnienia przyczyny tego zjawiska. Bowden i Hughes w 1939 r. wykazali, że w temperaturach niższych od temperatury topnienia lodu występuje tarcie pomiędzy rozpatrywanym materiałem a lodem powodujące powstawanie warstewki wody. Wytwarza się wówczas ich zdaniem dostatecznie dużo ciepła, by na powierzchni lodu powstała cienka warstwa wody. Mimo to nie potrafili oni wyjaśnić, dlaczego tak trudno jest ustać na łyżwach, kiedy tarcie kinetyczne nie występuje i w związku z tym nie jest generowane ciepło pomiędzy łyżwą a lodem. Późniejsze badania przeprowadzone w 1981 r. przez Roberta [L. 8] z wykorzystaniem termografii dotyczyły tarcia nart po śniegu. Prezentowane wyniki dotyczyły wprawdzie badań wstępnych i nie miały zbyt dużej dokładności, to jednak zarejestrowany przyrost temperatury rzędu jednego Kelwina nie uzasadnia przyjęcia tezy o tworzeniu warstwy wody na powierzchni śniegu jedynie w wyniku rozgrzewania tarcowego.

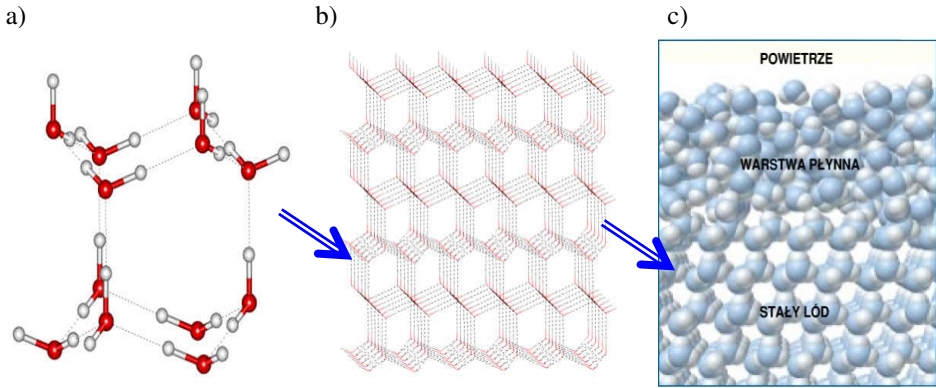
Wyjaśnienie powstawania warstewki wody na powierzchni lodu można uzyskać, wykorzystując do opisu zjawisko znane jako topnienie powierzchniowe [L. 1, 2, 6, 9, 11]. Zagadnienie to zostało dokładniej poznane dopiero w ciągu ostatnich kilkunastu lat. Jego fizykalnych podstaw należy szukać w budowie kryształu lodu. Cząsteczki wody znajdu-

jące się w jego wnętrzu układają się w stały i powtarzający się wzór, tworząc sztywną sieć heksagonalną (**Rys. 1a, b**). W pobliżu powierzchni kryształu sieć ta jest zniekształcona, ponieważ cząsteczki znajdujące się na skraju dotykają otaczającego je bezkształtnego środowiska, jakim jest powietrze. Oznacza to, że cząsteczki te mają mniej wiązań chemicznych, które utrzymują je w określonym miejscu. W miarę podwyższania temperatury drgają one znacznie gwałtowniej niż cząsteczki znajdujące się wewnątrz kryształu. Przy dostatecznie wysokiej temperaturze, lecz wciąż poniżej normalnej temperatury topnienia, zaczynają płynąć, tworząc warstwę podobną do cieczy (**Rys. 1c**). Ta quasi-płynna warstewka wykazuje pewne cechy strukturalne znajdującego się tuż pod nią ciała stałego, ale ma ruchliwość cieczy. Jej grubość zależy od wielu czynników, między innymi od temperatury lodu [**L. 2, 6, 10**], chropowatości jego powierzchni [**L. 1**] oraz dodatkowych oddziaływań międzycząsteczkowych powstających pomiędzy współpracującymi powierzchniami materiału polimerowego lub metalicznego oraz lodu. Podsumowując, podczas ślizgania materiału polimerowego po powierzchni lodu zachodzi wiele różnych zjawisk, które wpływają na opory tarcia. Opory te wynikają przede wszystkim z:

- deformacji powierzchni lodu pod wpływem obciążenia normalnego,
- ścinania warstewki wody (lepkość),
- oddziaływań adhezyjnych pomiędzy materiałem polimerowym a powierzchnią lodu wynikających z sił międzycząsteczkowych oraz pola elektrostatycznego powstającego w wyniku tarcia materiału po lodzie.

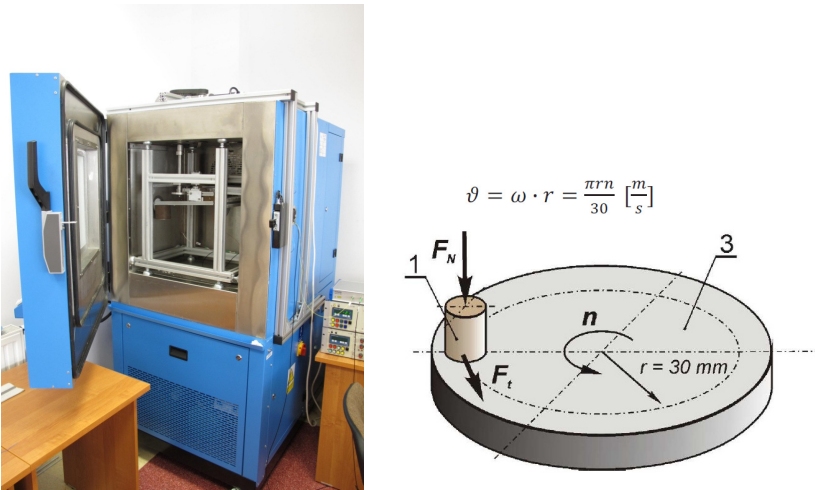
BADANIA WSPÓŁCZYNNIKA TARCIA PO LODZIE

Badania tarcia statycznego przeprowadzono na stanowisku badawczym typu „pin-on-disk”, które umieszczono w komorze klimatycznej (**Rys. 2**). Umożliwiło to prowadzenie badań w ustalonej temperaturze otoczenia. Podczas badań polimerowa próbka współpracowała ślizgowo z powierzchnią lodu, który wytworzono przed pomiarami w odpowiednio przygotowanym naczyniu (tarczy) zamontowanym na stanowisku. Do badań wybrano materiały polimerowe termoplastyczne i elastomerowe najczęściej wykorzystywane do wytworzenia ślizgowych elementów maszyn (łożyska, uszczelnienia), które pracują w różnych warunkach klimatycznych, w tym zimowych. Spośród polimerów termoplastycznych



Rys. 1. Budowa kryształu lodu w warunkach normalnych: a) podstawowa komórka sieciowa (heksagonalna) lodu [L. 3], b) sieć krystaliczna (heksagonalna) lodu [L. 3], c) budowa warstwy wierzchniej lodu [L. 11]

Fig. 1. Structure of ice in normal conditions: a) hexagonal ice crystal [L. 3], b) ice lattice (hexagonal) [L. 3], c) structure of surface layer of ice [L. 11]



Rys. 2. Komora klimatyczna z zamontowanym tribotesterem (a) oraz schemat pary ślizgowej (b) (1 – polimerowa próbka, 3 – przeciwielement wykonany z lodu)

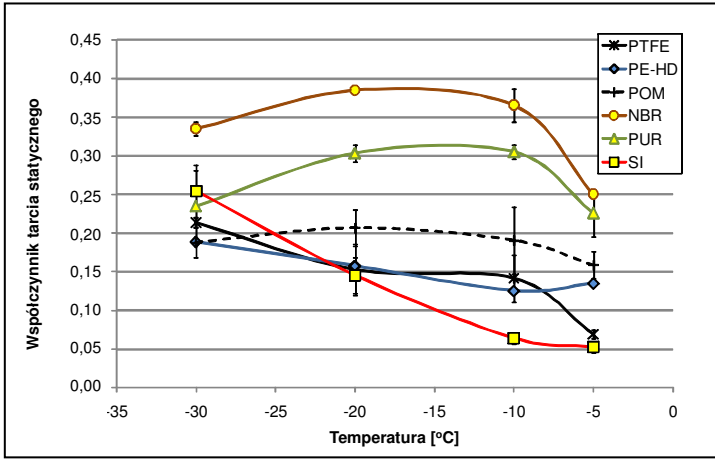
Fig. 2. Climatic chamber with tribotester (a) and scheme of the sliding couple (b) (1 – polymer sample, 3 – counterface made of ice)

wybrano: politetrafluoroetylen (PTFE), polietylen dużej gęstości (PE-HD), poliacetal (POM) natomiast spośród materiałów elastomerowych: gumę na bazie kauczuku butadienowo-akrylonitrylowego (NBR) o twardości 65°Sh, poliuretan (PUR) i kauczuk silikonowy (Si). Z materiałów tych wykonano próbki w kształcie sworzni o średnicy 8 mm, które ślizgały się płaską powierzchnią po lodzie. Doświadczenia przeprowadzono przy średnim nacisku jednostkowym $p = 2$ MPa, w różnej temperaturze otoczenia ($T_o = -30, -20, -10, -5^{\circ}\text{C}$). Podczas badań rejestrowano siłę tarcia statycznego oraz tarcia kinetycznego podczas pierwszych kilku obrotów, aby uniknąć rozgrzewania powierzchni lodu w wyniku tarcia. Wyniki w postaci średnich wartości współczynników tarcia oraz wyznaczonych (na poziomie ufności $\alpha = 0,05$) przedziałów ufności przedstawiono w **Tabeli 1** oraz na wykresach (**Rys. 3, 4**).

Tabela 1. Wartości współczynnika tarcia statycznego i kinetycznego wybranych materiałów polimerowych po lodzie

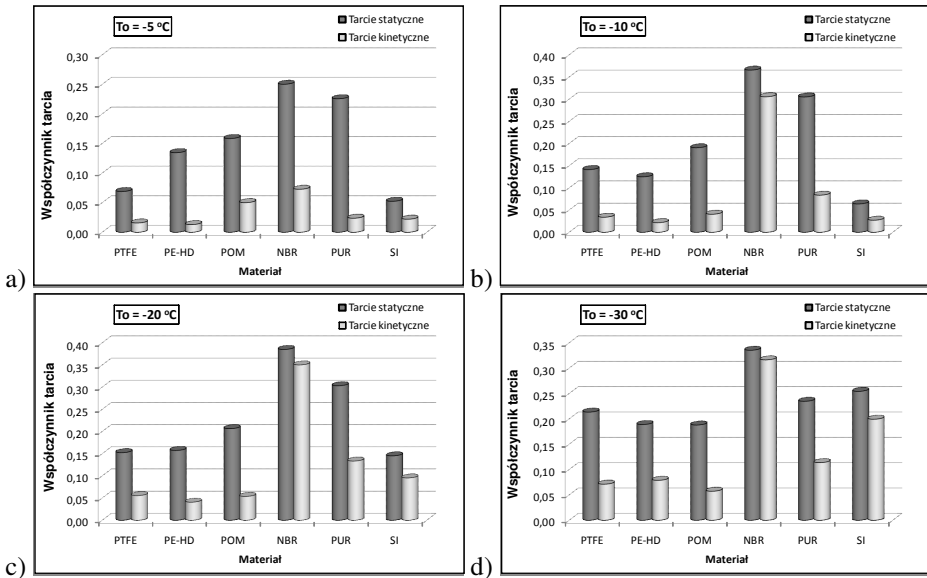
Table 1. Coefficients of static and kinetic friction of selected polymer materials sliding on ice

Tarcie statyczne					
Lp.	Oznaczenie materiału	Temperatura [$^{\circ}\text{C}$]			
		-5	-10	-20	-30
1	PTFE	0,069 \pm 0,006	0,141 \pm 0,031	0,152 \pm 0,033	0,213 \pm 0,007
2	PE-HD	0,135 \pm 0,030	0,125 \pm 0,024	0,157 \pm 0,032	0,189 \pm 0,022
3	POM	0,158 \pm 0,017	0,190 \pm 0,043	0,206 \pm 0,024	0,188 \pm 0,019
4	NBR	0,250 \pm 0,002	0,366 \pm 0,021	0,385 \pm 0,004	0,335 \pm 0,009
5	PUR	0,226 \pm 0,030	0,305 \pm 0,009	0,303 \pm 0,011	0,235 \pm 0,046
6	SI	0,052 \pm 0,007	0,064 \pm 0,008	0,145 \pm 0,023	0,254 \pm 0,034
Tarcie kinetyczne					
7	PTFE	0,016 \pm 0,001	0,034 \pm 0,005	0,056 \pm 0,005	0,071 \pm 0,000
8	PE-HD	0,013 \pm 0,004	0,022 \pm 0,003	0,041 \pm 0,005	0,079 \pm 0,004
9	POM	0,050 \pm 0,015	0,041 \pm 0,010	0,054 \pm 0,006	0,057 \pm 0,003
10	NBR	0,073 \pm 0,008	0,305 \pm 0,034	0,350 \pm 0,016	0,316 \pm 0,009
11	PUR	0,024 \pm 0,002	0,084 \pm 0,015	0,133 \pm 0,009	0,114 \pm 0,014
12	SI	0,022 \pm 0,006	0,027 \pm 0,002	0,095 \pm 0,030	0,199 \pm 0,009



Rys. 3. Współczynnik tarcia statycznego wybranych materiałów po lodzie w zależności od temperatury otoczenia

Fig. 3. Coefficient of static friction of selected polymer materials sliding on ice depended on ambient temperature



Rys. 4. Porównanie wartości współczynnika tarcia statycznego i kinetycznego dla wybranych materiałów polimerowych podczas ślizgania po lodzie w różnej temperaturze otoczenia

Fig. 4. Comparison of coefficient of static and kinetic friction for the selected polymeric materials during sliding on the ice at different ambient temperature

PODSUMOWANIE

Uzyskane wyniki pomiarów potwierdziły istotny wpływ temperatury na wartość współczynnika tarcia statycznego i kinetycznego podczas ślizgania badanych materiałów polimerowych po lodzie. Podobnie jak w badaniach przedstawionych w literaturze [L. 2, 5, 7] zaobserwowano obniżenie wartości współczynnika tarcia wraz ze wzrostem temperatury przede wszystkim dla materiałów termoplastycznych oraz kauczuku silikonowego. Wynika to między innymi ze zwiększenia grubości warstewki wody [L. 2, 10] na powierzchni lodu oraz słabej zwilżalności powierzchni polimerów przez wodę, co jest widoczne zwłaszcza w przypadku PTFE oraz kauczuku silikonowego. Oba te materiały są hydrofobowe i wykazują mniejsze opory tarcia w obecności warstewki wody niż pozostałe materiały. Odmiennie zachowują się badane materiały elastomerowe (z wyjątkiem wymienionego wcześniej kauczuku silikonowego). W przypadku gumy na bazie kauczuku NBR oraz poliuretanu w temperaturze poniżej -20°C zaobserwowano również obniżenie wartości współczynnika tarcia. Główną przyczyną są prawdopodobnie zmiany własności fizycznych (elastyczności) tych materiałów wraz z obniżeniem temperatury. W temperaturze -30°C materiały te stają się sztywne i zachowują się podobnie do innych badanych materiałów polimerowych (termoplastów).

LITERATURA

1. Alvorado F.L.C., Pineda M.C., Rutkowski J.H., Wojtczak L.: Roughness influence on surface melting. *Surface Review and Letters*, Vol. 8, No. 6, 2001, s. 599–608.
2. Butt H.J.: The surface of ice. (20.02.2002)
<http://www.mpip-mainz.mpg.de/documents/akbu/astrid/eis/eis.html>.
3. Chaplin M. Water structure and science.
<http://www.martin.chaplin.btinternet.co.uk/index2.html> (16.02.2011).
4. Ducreta S., Zahouania H., Midola A., Lanterib P., Mathia T.G.: Friction and abrasive wear of UHMWPE sliding on ice. *Wear*, 258, 2005, p. 26–31.
5. Jiang J., Ulbrich H.: Derivation of coefficient of friction at high sliding speeds from energy conservation over the frictional interface. *Wear*, 247, 2000, s. 66–75.
6. Li Y., Somorjai G.A.: Surface premelting of ice. *J. Phys. Chem. C*, 2007, 111 (27), p. 9631–9637.

7. Oksanen P., Keinonen J.: The mechanism of friction of ice. *Wear*, 78, 1982, s. 315–324.
8. Roberts Ch.C.: Infrared thermographic analysis of snow ski tracks. *SPIE Proceedings*, Vol.1467, Paper 1467–24, Orlando (USA), 3–5.04.1991.
9. Rejmer K.: Słów kilka na temat narciarstwa. *Delta*, Nr 04/1998.
10. Strausky H., Krenn J.R., Leitner A., Aussenegg F.R.: Sliding plastics on ice: fluorescence spectroscopic studies on interfacial water layers in the μm thickness regime. *Applied Physics B* 66, 1998, s. 599–602.
11. Wettlaufer J. S., Dash J. G.: Topnienie poniżej zera. *Świat Nauki*, nr 4, 2000, s. 52–55.

Recenzent:

Monika GIERZYŃSKA-DOLNA

Summary

Specific properties of the water in the solid state (ice) allow sliding other solids on ice with low friction. There are some different phenomena that affect the friction during sliding polymer materials on ice. The authors present the results of the influence of ambient temperature (from -30 to -5°C) on the friction coefficient (static and kinetic) of selected plastics (thermoplastics: PTFE, POM PE-HD and elastomers: NBR, PUR, SI) during sliding on ice.

Tribological investigations were carried out on the rig “pin-on-disk” which was placed in a climatic chamber. It enabled us to control the environment conditions. The results showed that the frictional coefficients of investigated materials decreases with temperature increase. The exceptions were the elastomeric materials (NBR, PUR), for which the reduction in the frictional coefficient was observed at temperatures below -20°C . The reason was the change in the elasticity (stiffness) of these materials together with the temperature decrease.