

Dymitry CAPANIDIS*, Andrzej TAŃSKI*

BADANIA ODPORNOŚCI NA ZUŻYCIE ŚCIERNE WYBRANYCH POLIMERÓW INŻYNIERYJNYCH

INVESTIGATIONS OF RESISTANCE TO ABRASIVE WEAR OF SELECTED ENGINEERING POLYMERS

Słowa kluczowe:

zużycie ścierne, PA6, PEEK, PEI, PET, PSU, mikrotwardość

Key words:

abrasive wear, PA6, PEEK, PEI, PET, PSU, microhardness

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki tribologicznych badań porównawczych odporności na zużywanie ścierne wybranych polimerów inżynierskich: PA6, PEEK, PEI, PET, PSU. Do badań wykorzystano stanowisko badawcze Tester T-07. Badania prowadzono w obecności luźnego ścierniwa, którym był elektrokorund F90, przy zachowaniu jednakowych warunków tarcia dla wszystkich badanych materiałów. W celu wyjaśnienia przyczyn różnej odporności na zużycie ścierne badanych polimerów przeprowadzono badania mikrotwardości ich powierzchni trących przed i po procesie ścierania oraz dokonano próby powiązania odporności na zużywanie ścierne poszczególnych polimerów z ich podstawowymi własnościami wytrzymałościowymi.

* Politechnika Wroclawska, Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn, ul. Ignacego Lukaszewicza 7/9, 50-371 Wroclaw.

WPROWADZENIE

Polimery inżynierskie stosowane są na różne elementy konstrukcyjne maszyn i urządzeń takie, jak: koła zębate, koła pasowe, koła łańcuchowe i łańcuchy, elementy łożysk ślizgowych i łożysk tocznych, rolki prowadzące czy rolki i koła jezdne, a także na korpusy i obudowy. W szczególnych przypadkach mogą one podlegać intensywnemu zużyciu spowodowanemu zbyt dużą chropowatością powierzchni trącej bardziej twardego metalicznego przeciwelementu lub obecnością twardych cząstek zanieczyszczeń w obszarze tarcia [L. 4]. Zużycie ścierne wynika wówczas z ubytku materiału polimerowego w warstwie wierzchniej, który jest spowodowany oddzielaniem jego cząstek wskutek mikro-skrąwania, rysowania lub bruzdowania [L. 8]. Odporność na zużywanie ścierne w wielu przypadkach jest więc wyznacznikiem doboru odpowiedniego materiału polimerowego na takie elementy, który będzie zapewniał ich odpowiednią trwałość i niezawodność eksploatacyjną. Dotąd nie udało się jednoznacznie ustalić, od jakich właściwości materiałowych zależy odporność na zużywanie ścierne materiałów polimerowych.

Budinski [L. 1] wykazał, że tworzywa sztuczne, które się łatwiej odkształcają podczas oddziaływania luźnych cząstek ściernych (np. krzemionka), są mniej skłonne do tworzenia produktów zużycia materiału przez zarysowanie i wykazują większą odporność na zużywanie ścierne. Zachowanie to łączy z energią potrzebną do odkształcenia plastycznego materiału polimerowego.

Rajesh, Bijwe i Tewari [L. 6] wykazali, że wartości zużycia ściernego badanych odmian poliamidów wykazały dość dobrą korelację z różnymi właściwościami mechanicznymi, takimi jak: współczynnik plastyczności, naprężenia inicjujące pęknięcia, energia powierzchniowa pęknięcia, krytyczna długość pęknięcia, moduł sprężystości przy rozciąganiu, prędkość pęknięcia itp. Jednak pełnej liniowej korelacji nie zaobserwowano, ponieważ inne właściwości fizyczne takie jak stopień krystaliczności, masa cząsteczkowa, mikrostruktura itp. również mają wpływ na właściwości mechaniczne. Stwierdzono również, że zużycie ścierne poliamidów nie jest zależne tylko od jednej własności materiałowej.

W pracy [L. 3] wykazano, że polimery o większej plastyczności, jak PE czy PP, są bardziej odporne na ścieranie niż polimery o większej sztywności jak PS. Tłumaczy się to tym, że podczas tarcia luźne cząstki ścierniwa powodują w polimerach o większej sztywności wykruszanie materiału warstwy wierzchniej, natomiast w polimerach o większej plastyczności zachodzą odkształcenia sprężysto-plastyczne niepowodujące wykruszania materiału tworzywa. Ponadto zaobserwowano, że wzrost wielkości ziaren ścierniwa wpływa na zmniejszenie odporności na zużywanie ścierne badanych polimerów.

BADANE MATERIAŁY

Do tribologicznych badań porównawczych odporności na zużywanie ściernie wybrano handlowe gatunki polimerów inżynierskich, mające szerokie wykorzystanie w budowie maszyn i urządzeń, którymi są:

- PA6 – poliamid 6,
- PEI – polieteroimid,
- PEEK – polieteroeteroketon,
- PET – poli(tereftalan etylenu),
- PSU – polisulfon.

Próbki o kształcie krążków o średnicy $\phi 30$ mm i grubości 3 mm wycinano z handlowych wytłaczanych prętów polimerowych, których powierzchnie przeznaczone do badań zużywania ściernego uzyskano przez toczenie czołowe.

Podstawowe własności mechaniczne badanych polimerów, pozyskane z danych literaturowych, przedstawiono w **Tabeli 1**.

Tabela 1. Wybrane właściwości mechaniczne badanych polimerów

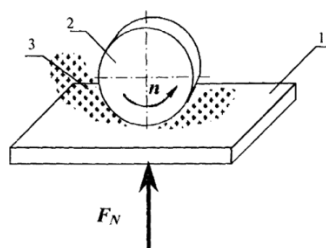
Table 1. Selected mechanical properties of tested polymers

Własność \ Polimer	PET	PA6 suchy	PEEK	PEI	PSU
Gęstość ^{*)} g/cm ³	1,33– –1,35	1,12– –1,14	1,3	1,27	1,24– –1,25
Moduł sprężystości przy rozciąganiu ^{*)} N/mm ²	2100– –2400	2600– –3200	4000	2900– –3000	2500– –2700
Napężenie na granicy plastyczności ^{*)} N/mm ²	55	70-90	105– –110	85	70–80
Wydłużenie na granicy plastyczności ^{*)} %	4	4,0–5,0	6	6,0–7,0	5,5–6,5
Wytrzymałość na rozciąganie ^{**)} N/mm ²	47	70-85	90	105	50-100
Wydłużenie przy zerwaniu ^{**)} %	50–300	200– –300	50	60	25–30
Twardość kulkowa DIN EN ISO 2039-1 ^{***)} N/mm ²	170	170	230	220	155
Twardość Shore DIN 53505 ^{***)} Skala „D”	84	82	88	86	85

^{*)} – na podstawie [L. 7], ^{**)} – na podstawie [L. 5], ^{***)} – na podstawie [L. 9]

METODYKA BADAŃ TRIBOLOGICZNYCH

Badania tribologiczne odporności polimerów na ścieranie prowadzono w na stanowisku badawczym Tester T-07. Schemat metody badawczej procesu ścierania materiałów, o styku trących elementów typu walec–płaszczyzna [L. 2], przedstawiono na **Rys. 1**.



Rys. 1. Schemat metody wykorzystanej do badania odporności na zużywanie ścierne: 1 – próbka z badanego materiału, 2 – rolka gumowa, 3 – ścierniwo [L. 3]

Fig. 1. Scheme of the method used for examination the resistance to abrasive wear: 1 – sample of studied material, 2 – rubber roll, 3 – abrasive [L. 3]

Metoda ta jest zgodna z zaleceniami rosyjskiej normy GOST 23.208-79, która zawiera wytyczne do badania odporności na zużywanie ścierne materiałów oraz powłok chroniących przed zużyciem ściernym. Próbka badanego materiału (1) podczas badań jest dociskana z siłą $F_N = 44,4$ N do obracającego się ze stałą prędkością obrotową $n = 60$ obr/min krążka gumowego (2) o średnicy $d = 50$ mm. Pomiędzy obracający się krążek i nieruchomą próbkę dostarczane jest w ciągły sposób luźne ścierniwo (3) powodujące ścieranie próbki. Zalecany w tej metodzie ścierniwem jest elektrokorund F90 (wg PN ISO 8486:1998), natomiast próbka wzorcowa powinna być wykonana ze stali C45 w stanie znormalizowanym, o twardości ok. 200 HB.

W badaniach określane jest wagowe zużycie próbki Z_{wb} , jakie wystąpiło po określonej liczbie $N_b = 150$ obrotów gumowej rolki przyjmowanej dla badanych materiałów o twardości mniejszej niż 400 HV. W przypadku stalowej próbki wzorcowej $N_w = 600$ obrotów, jaką przyjmuje się dla materiałów o twardości równej lub większej niż 400 HV. Na podstawie pomiarów zużycia wagowego wyznaczono dla badanych materiałów wskaźnik odporności na ścieranie K_b , który ze względu na różne gęstości badanych materiałów określany jest jako stosunek objętościowego zużycia próbki wzorcowej Z_{Vw} do objętościowego zużycia badanych materiałów Z_{Vb} uzyskanych w takich samych warunkach badań. Wskaźnik ten oblicza się, korzystając z następującego wzoru:

$$K_b = \frac{Z_{Vw} / N_w}{Z_{Vb} / N_b} = \frac{Z_{ww} \cdot \rho_b \cdot N_b}{\rho_w \cdot Z_{wb} \cdot N_w} \quad (1)$$

gdzie: Z_{ww} – zużycie wagowe podczas badania próbki wzorcowej (stali C45), Z_{wb} – zużycie wagowe podczas badania badanego materiału, ρ_w – gęstość materiału próbki wzorcowej, ρ_b – gęstość materiału próbki badanej, N_w – liczba obrotów drogi tarcia próbki wzorcowej, N_b – liczba obrotów drogi tarcia próbki badanej.

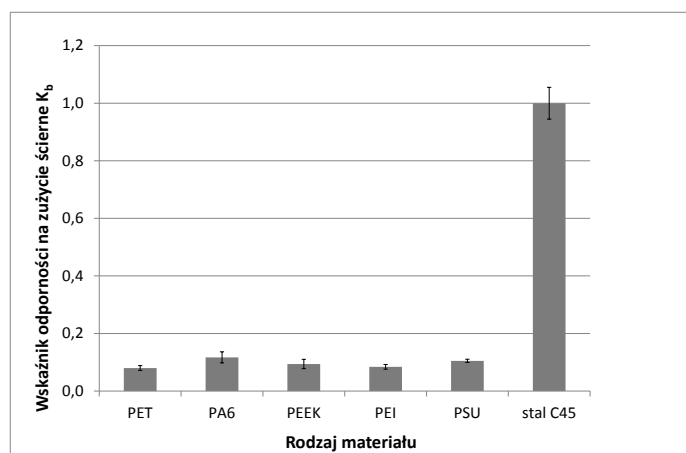
WYNIKI BADAŃ TRIBOLOGICZNYCH

Wyniki badań wagowego zużycia ściernego Z_{wb} , jak również doświadczalnie określone wartości gęstości ρ_b badanych polimerów, obliczone jako wartości średnie z 6 pomiarów dla każdego materiału, przedstawiono w **Tabeli 2**. W tej samej tabeli zamieszczono także obliczone ze wzoru (1) wartości średnie wskaźników odporności na ścieranie K_b badanych polimerów i ich przedziały ufności określone na podstawie rozkładu t-Studenta przy poziomie istotności $\alpha = 0,05$. Wskaźniki odporności na ścieranie poszczególnych polimerów dodatkowo przedstawiono w postaci wykresu na **Rys. 2**.

Tabela 2. Wyniki badań tribologicznych wybranych polimerów

Table 2. The results of tribological tests of some polymers

Nazwa polimeru	Zużycie wagowe Z_{wb} [g]	Gęstość ρ_b [g/cm ³]	Współczynnik odporności na ścieranie K_b	Przedział ufności dla K_b
PET	0,040	1,33	0,080	$\pm 0,0083$
PA6	0,023	1,12	0,117	$\pm 0,0192$
PEEK	0,033	1,30	0,094	$\pm 0,0162$
PEI	0,036	1,27	0,085	$\pm 0,0082$
PSU	0,028	1,24	0,105	$\pm 0,0057$
Stal C45	0,074	7,86	1,000	$\pm 0,0553$



Rys. 2. Wskaźnik odporności na zużycie ścierne K_b badanych polimerów

Fig. 2. Rate of abrasive wear resistance K_b of investigated polymers

Przedstawione wyniki badań tribologicznych wskazują, że badane polimery, czego należało się spodziewać, charakteryzują się dużo mniejszą odpornością na zużywanie ścierne w porównaniu z próbką wzorcową ze stali C45. Spośród badanych polimerów największy wskaźnik odporności na ścieranie $K_b = 0,117$, a więc charakteryzujący się największą odpornością na zużywanie

ścierne, ma poliamid (PA6). Natomiast najmniejszą odporność na zużywanie ścierne miał PET, dla którego wskaźnik odporności na ścieranie $K_b = 0,08$.

BADANIA MIKROTWARDOŚCI

Porównując wyniki badań tribologicznych i cechy wytrzymałościowe badanych polimerów zawarte w **Tabeli 1**, nie można wskazać między nimi jednoznacznej zależności, dlatego zdecydowano się na przeprowadzenie dodatkowych badań mikrotwardości warstwy wierzchniej polimerów przed i po procesie ścierania.

Badania mikrotwardości przeprowadzono na twardościomierzu Shimadzu Micro HVM-2T metodą Vickersa przy obciążeniu wynoszącym 0,5 N oraz czasie utrzymania obciążenia $t = 120$ s (określone doświadczalnie, aby ślad odcisku był wyraźny) i liczbie pomiarów wynoszącej 10. Wyniki badań zamieszczono w **Tabeli 3**, natomiast na **Rys. 3** przedstawiono fotografie śladów odcisków w badaniach mikrotwardości poszczególnych polimerów.

Tabela 3. Wyniki badań mikrotwardości wybranych polimerów

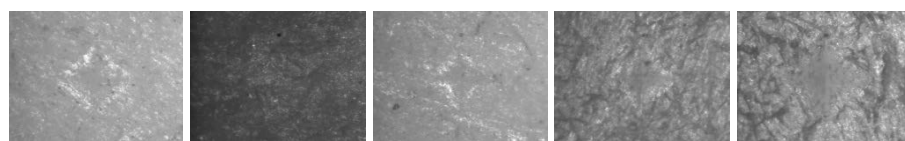
Table 3. The results of tests of microhardness of some polymers

Nazwa polimeru	Przed procesem ścierania		Po procesie ścierania		Przyrost mikrotwardości po procesie ścierania [%]
	Mikrotwardość $\mu\text{HV}_{0,5}$	Odchylenie standardowe	Mikrotwardość $\mu\text{HV}_{0,5}$	Odchylenie standardowe	
PET	27,9	$\pm 11,37$	32,4	$\pm 6,40$	16,06%
PA 6	9,1	$\pm 3,38$	16,9	$\pm 6,95$	85,07%
PEEK	31,2	$\pm 8,88$	49,8	$\pm 7,63$	59,84%
PEI	32,7	$\pm 10,08$	62,4	$\pm 29,98$	90,79%
PSU	26,8	$\pm 13,59$	37,7	$\pm 18,70$	40,64%

przed procesem ścierania (before the process of abrasion)



po procesie ścierania (after the process of abrasion)



PET

PA6

PEEK

PEI

PSU

Rys. 3. Fotografie z pomiarów mikrotwardości badanych polimerów, 40×

Fig. 3. Photographs of the microhardness of tested polymers, 40×

Poliamid PA6 ma najmniejszą mikrotwardość oraz jeden z największych jej względnych wzrostów po procesie tarcia wynoszący ok. 85% oraz jednocześnie wykazał największą odporność na zużycie ściernie. Bardzo podobną zależność można zaobserwować w przypadku PSU, przy czym wzrost mikrotwardości po procesie tarcia nie był już tak duży, bo wyniósł ok. 40%. Natomiast PET mający także niedużą mikrotwardość (mniejszą od PEEK i od PEI) wykazał się najmniejszym jej wzrostem po procesie tarcia, wynoszącym zaledwie 16%, i charakteryzował się najmniejszą odpornością na zużycie ściernie. Z analizy tej wynika, że nie tyle wartość mikrotwardości przed procesem tarcia ma decydujący wpływ na odporność na zużywanie ściernie, co wzrost jej wartości po procesie tarcia będący miarą umocnienia polimeru w warstwie wierzchniej (w następstwie zmian jej budowy). Zależność taką dobrze potwierdza przykład PEI, który miał największą mikrotwardość przed procesem tarcia (większą od PET), to jednak wykazał największy wzrost mikrotwardości wynoszący ponad 90% i uzyskał większą od PET odporność na zużywanie ściernie.

WNIOSKI

1. Jakkolwiek nie można ustalić jednoznacznej zależności między wynikami badań tribologicznych odporności na zużywanie ściernie i wynikami badań mikrotwardości warstwy wierzchniej oraz własnościami wytrzymałościowymi (dane literaturowe) badanych polimerów inżynierskich, to jednak można było sformułować poniższe wnioski.
2. Wyniki badań mikrotwardości wykazały, że podczas procesu ścierania następuje zwiększenie mikrotwardości wszystkich badanych polimerów, co wskazuje na zmiany zachodzące w budowie warstwy wierzchniej polimerów prowadzące do ich umocnienia.
3. Za miarę stopnia umocnienia warstwy wierzchniej badanych polimerów i jej znaczenia dla odporności na zużywanie ściernie można uznać względny wzrost mikrotwardości zachodzący podczas procesu tarcia.
4. Największą odpornością na zużycie ściernie wykazał się PA6 oraz PSU charakteryzujące się stosunkowo małą mikrotwardością, ale dużym jej względnym wzrostem podczas procesu tarcia, natomiast największym zużyciem ściernym charakteryzował się PET, który nie miał dużej mikrotwardości, ale jej względny wzrost podczas tarcia był najmniejszy.
5. Nie ustalono wyraźnej korelacji między odpornością na zużycie ściernie a własnościami wytrzymałościowymi, co może wskazywać na istotną rolę budowy polimeru i jej modyfikacji zachodzącej podczas procesu tarcia, na co również wskazuje się w pracy [L. 6].
6. Szersze wyjaśnienie zależności między własnościami wytrzymałościowymi a odpornością na zużywanie ściernie polimerów wymaga dalszych badań dotyczących także wpływu budowy polimerów i jej modyfikacji w warstwie wierzchniej zachodzącej podczas procesu ścierania.

LITERATURA

1. Budinski K.G.: Resistance to particle abrasion of selected plastics. *Wear* 203–204, (1997), s. 302–309.
2. Capanidis D.: Selected aspects of the methodology of tribological investigations of polymer materials. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2007, vol. 7, nr 4, s. 39–55.
3. Capanidis D. Wieleba W.: Badania odporności na ścieranie materiałów polimerowych stosowanych na opakowania transportowe. *Czasopismo Techniczne. Mechanika*, 2009, R. 106, z. 1-M, s. 51–55.
4. Czichos H.: *Tribology*. Elsevier, 1978.
5. Dobrzański L.A. *Materiały inżynierskie i projektowanie materiałowe*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2006.
6. Rajesh J. John, Bijwe J., Tewari U.S.: Abrasive wear performance of various polyamides. *Wear* 252, (2002), s. 769–776.
7. Saechtling H.: *Tworzywa sztuczne. Poradnik*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2000.
8. Wieleba W.: The mechanism of tribological wear of thermoplastic materials. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2007 vol. 7, nr 4, s. 185–199.
9. Katalog tworzyw sztucznych www.plastics.pl/content/zdjecia/file/katalog_tworzywa_techiczne_108_121.pdf [01.08.2012]

Summary

The paper presents the results of comparative studies of abrasive wear resistance of selected engineering polymers: PA6, PEEK, PEI, PET, PSU. The study used a research position Tester T-07. The research testing stand Tester T-07 was used for a study. The study was conducted in the presence of loose abrasive, which was the F90 corundum, while maintaining the same friction conditions for all tested materials. In order to clarify the causes of various abrasive wear resistance of investigated polymers, the testing of microhardness of friction surfaces before and after abrasion was conducted, and the attempt to link abrasive wear resistance of various polymers with their fundamental strength properties was also done.