

Konrad Kwiatkowski*¹, Paweł Michalski*

Właściwości trybologiczne elastomerów uretanowych – porównanie dwóch metod oceny zużycia ściernego

Celem przedstawionej pracy było zbadanie i porównanie zużycia ściernego elastomerów uretanowych (PUR), zarówno produkowanych komercyjnie, jak i syntezowanych we własnym zakresie. Poliuretany, różniące się składem i udziałem segmentów giętkich, były syntezowane jednoetapowo lub dwuetapowo. Odporność na zużycie ściernie jako ubytek objętości podczas ścierania określono niezależnie na dwóch najpopularniejszych aparatach: Grasselliego i Schoppera. Opisano metodykę pomiarów oraz dokonano analizy porównawczej otrzymanych wyników.

Słowa kluczowe: zużycie ściernie, elastomery uretanowe, aparat Grasselliego, aparat Schoppera

Tribological properties of polyurethane elastomers – comparison of two abrasive test methods

The aim of the study was to investigate the abrasive wear of polyurethane elastomers (PUR), both commercial and laboratory made. Polyurethane elastomers have been synthesized in one -step or two-steps reaction. An abrasive wear resistance was determined with a Grasselli and Schopper methods. The methodology of measurement and comparative analysis of the results were explained.

Key words: abrasive wear, polyurethane elastomers, Grasselli method, Schopper method

Dr inż. Konrad Kwiatkowski

W 2000 roku ukończył studia na Wydziale Mechanicznym Politechniki Szczecińskiej na kierunku Inżynieria Materiałowa. W 2006 roku obronił doktorat na Wydziale Mechanicznym Politechniki Szczecińskiej i uzyskał stopień doktora nauk technicznych w dyscyplinie budowa i eksploatacja maszyn ze specjalnością przetwórstwo tworzyw sztucznych. W latach 2007–2009 odbył staż w Philips Applied Technologies (Eindhoven, Holandia). Jest adiunktem w Instytucie Inżynierii Materiałowej Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie. Specjalność – synteza i badania tworzyw polimerowych, zwłaszcza termoplastycznych elastomerów estrowych i uretanowych, a także przetwórstwo wtryskowe i projektowanie form wtryskowych.



Mgr inż. Paweł Michalski

W 2010 roku ukończył studia inżynierskie (I stopnia) na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki – kierunek: Inżynieria Materiałowa. Pracę dyplomową inżynierską realizował w Instytucie Inżynierii Materiałowej. W 2011 roku ukończył studia wyższe II stopnia na kierunku Inżynieria Materiałowa, uzyskując tytuł magistra inżyniera. Od 2011 roku jest słuchaczem Studium Doktoranckiego na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki. Specjalność: trybologia materiałów polimerowych, elastomery uretanowe.



*Instytut Inżynierii Materiałowej Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

¹ Autor do korespondencji:

Konrad Kwiatkowski ZUT, al. Piastów 19, 70–310 Szczecin, e-mail: konrad.kwiatkowski@zut.edu.pl

1. Wprowadzenie

1.1. Zużycie ścierne elastomerów

Zużyciem ściernym nazywamy postępujący w czasie ubytek materiału (lub zmianę geometrii jego warstwy wierzchniej), który związany z kontaktem próbki z innym materiałem, jest na ogół cząstkami twardszymi. Oznacza to, że cecha materiałowa, jaką jest odporność na ścieranie, zależy od kilku czynników, z których najważniejszymi są: materiał przeciwpróbki i jej chropowatość, geometria kontaktu, siła nacisku i prędkość poruszania się materiałów względem siebie [1].

Zużycie trybologiczne spowodowane tarcieniem przejawia się, oprócz ubytku masy, zmianami struktury i właściwości fizycznych. Ubytek materiału w warstwie wierzchniej podczas ścierania jest związany m.in. z: bruzdowaniem (odkształceniem plastycznym obszarów styku i spęcznieniem materiału z obu stron bruzdy), mikroskrawaniem, powstawaniem rys.

Z danych literaturowych wynika, że odporność elastomeru na zużycie ścierne zależy od jego – często związanych ze sobą – właściwości i cech, takich jak: twardość, wytrzymałość na rozdzielanie, wytrzymałość na rozciąganie, moduł sprężystości, masa cząsteczkowa, temperatura mięknięcia, stopień krystaliczności oraz morfologia [2–6]. Na podstawie pracy [7] można stwierdzić, że twarde i kruche polimery, takie jak poliwęglan i polisulfon, w kontakcie z twardym ścierniwem zużywają się szybciej niż miękki polietylen wysokiej gęstości i poliamid 66. Zarówno w wyżej cytowanej pracy [7], jak i w np. [8], za najbardziej odporne na zużycie ścierne są uważane elastomery uretanowe.

Ta sama para danego typu materiałów, poddana próbom trybologicznym na różnych stanowiskach badawczych, może wykazać się odwrotnymi zależnościami zużycia ściernego w funkcji tych samych parametrów, np. twardości. W pracy [9] przedstawiono dane, które świadczą o tym, że można wyciągnąć sprzeczne wnioski, porównując ścieralność na różnych podłożach: w cytowanym badaniu laminat fenolowo-formaldehydowy wykazywał na papierze korundowym dwukrotnie większą ścieralność w porównaniu z poli(metakrylanem metylu), natomiast na siatce stalowej sześciokrotnie mniejszą. Takie odwrócenie zależności występuje także w przypadku elastomerów uretanowych [10, 11].

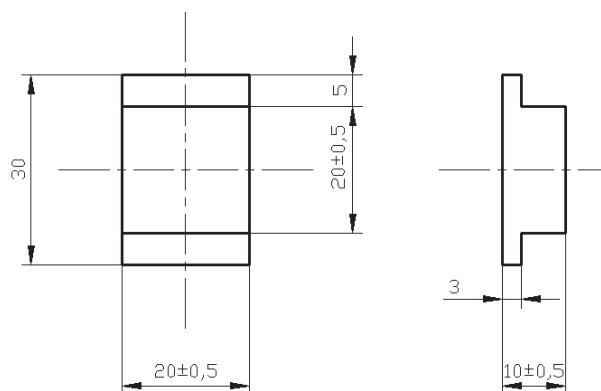
Mnogość czynników warunkujących odporność na ścieranie oraz nakładanie się różnych mechanizmów zużycia skłaniają ku dokładniejszemu przyjrzeniu się temu zagadnieniu. Wybrana metoda badawcza

charakteryzująca materiał pod względem odporności na zużycie ścierne powinna odzwierciedlać warunki tarcia panujące w rzeczywistym skojarzeniu trących materiałów, w przeciwnym wypadku, na podstawie prawidłowo i rzetelnie przeprowadzonych prób, można wysnuć nieprawidłowe wnioski, a co za tym idzie, popełnić błąd w doborze materiału do konkretnego zastosowania.

1.2. Metoda Grasselliego

Metoda Grasselliego należy do popularnych sposobów określania poziomu zużycia ściernego elastomerów. Pierwszy aparat oparty na tej metodzie wprowadziła firma Du Pont, a zasady pomiaru zostały opisane w normie ASTM D394. Polska wersja tej normy (PN-57/C-04233) zaczęła obowiązywać od 1 kwietnia 1958 r. Norma PN-80/C-4233, zgodnie z którą wykonano nasze badania, jest obecnie wycofana i nie została zastąpiona inną*, opisującą tę metodę. Zasada badania w metodzie Grasselliego polega na ścieraniu jednocześnie dwóch próbek gumy przyciśniętych z określoną siłą do wirującej tarczy ścierniej i oznaczaniu zmiany objętości tych próbek oraz pracy użytej na ścieranie.

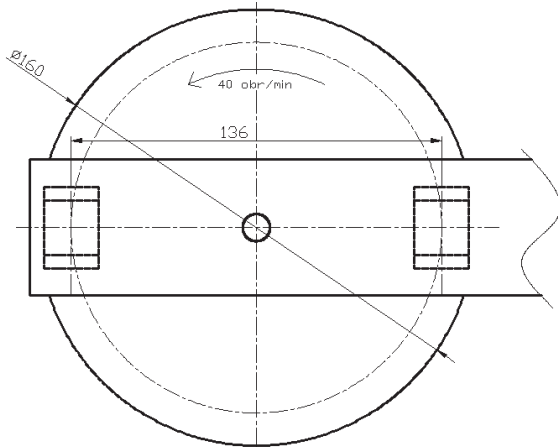
Próbki do badań (Rys. 1) są przyciskane do korundowego papieru ściernego masą 4,25 kg. W aparacie Grasselliego prędkość obrotowa tarczy ścierającej jest niezmienna i wynosi 40 obr./min (Rys. 2). Średnia prędkość środka ciężkości powierzchni trącej próbek względem papieru wynosi 0,28 m/s. W zależności od miejsca próbki prędkość ta wynosi 0,24–0,33 m/s.



Rys. 1. Wymiary próbek do oznaczania ścieralności za pomocą aparatu Grasselliego

Fig. 1. The dimensions of the samples for determination of abrasion with the Grasselli method

* Normy wycofane utraciły uznanie jako reguła techniczna lub zawierają rozwiązania mniej nowoczesne, nie oznacza to jednak zakazu ich stosowania. Nie ma przeszkód stosowania takiej wycofanej normy do kontroli dostaw między wykonawcą a odbiorcą, np. jeśli geometria rzeczywistego układu trybologicznego jest tam lepiej odwzorowana.



Rys. 2. Schemat rozmieszczenia próbek na dźwigni aparatu
Fig. 2. Setting the samples on the lever

Wstępnie dotarte próbki z wyrównaną powierzchnią (w celu uzyskania ścisłego przylegania do powierzchni ściernej) waży się z dokładnością do 1 mg, a następnie montuje w dźwigni przyrządu. W czasie badania, za pomocą szalki z ciężarkami, należy równoważyć dźwignię w poziomie, co pozwala wyznaczyć pracę tarcia; można również wyznaczyć współczynnik tarcia, ale norma już tego nie przewiduje. Po wykonaniu określonej liczby obrotów, przeważnie 200, próbki oczyszcza się z postrzępionej fałdy oraz pyłu i ponownie waży. Różnica między masą próbek przed ścieraniem i po ścieraniu stanowi ubytek masy, a po uwzględnienie gęstości materiału wyznacza się ubytek objętości. Ostatecznym wynikiem badania jest wskaźnik ścieralności, definiowany jako stosunek ubytku objętości materiału w czasie ścierania do pracy zużytej na to ścieranie.

W niniejszej pracy nie wyznaczano pracy ścierania, a parametrem porównawczym oznaczeń metodą Grasselliego był tylko ubytek objętości.

1.3. Metoda Schoppera

Metoda Schoppera jest w tej chwili najszerzej rozpowszechnioną formą oznaczenia zużycia ściernego elastomerów. W Polsce opisuje ją norma PN-ISO 4649:2007, obowiązująca z licznymi zmianami od 1957 roku. Oznaczenie wykonuje się na aparacie z obracającym się bębniem cylindrycznym na arkuszu papieru ściernego, przeważnie korundowego, o wymiarach 50 cm × 50 cm. Przed przystąpieniem do badań arkusz papieru dociera się próbką stalową. Tak przygotowany papier w warunkach badania powinien charakteryzować się zdolnością ścierania uprzednio przygotowanej gumy wzorcowej na poziomie 180–220 mg. Próbka do badań ma kształt walca o średnicy 16 mm i wysokości 12–16 mm i jest dociskana do papieru ściernego z siłą 10 N. Bęben,

którego średnica wynosi 150 mm, wykonuje w czasie minuty 40 obrotów. Za pomocą śruby pociągowej próbka przesuwana jest wzdłuż bębna o 4,2 mm na każdy obrót cylindra, co sprawia, że ścieranie odbywa się cały czas po świeżym fragmencie papieru. Dodatkowo próbka obraca się wokół własnej osi, wykonując pełen obrót w czasie 36 obrotów cylindra. W ten sposób jest zapewniona zmiana kierunku tarcia w sposób ciągły. Pomiar kończy się, gdy próbka przebędzie drogę ścierania równą 40 m. Ścieralność oblicza się jako ubytek objętości materiału ΔV wg wzoru:

$$\Delta V = \frac{\Delta m \cdot 0,2}{\rho \cdot \Delta m_w} \cdot 1000 \quad [\text{mm}^3]$$

gdzie: Δm – ubytek masy badanej próbki [g], 0,2 – wymagany ubytek masy gumy wzorcowej [g], Δm_w – ubytek masy gumy wzorcowej [g], ρ – gęstość badanej próbki [g/cm^3].

1.3. Elastomery uretanowe

Elastomery uretanowe (PUR) to powstające w wyniku poliaddycji kopolimery multiblokowe odznaczające się dużą wytrzymałością na rozdieranie i odpornością na zużycie ścierne – największą wśród elastomerów [12–14]. Poliuretany mają strukturę heterofazową, składającą się z faz: miękkiej i twardej, z których można wyodrębnić segmenty giętkie i sztywne. Segmenty giętkie budują przeważnie oligomeryczne diole zawierające w cząsteczce grupy funkcyjne: estrowe, eterowe i węglanowe. Często spotykaną praktyką jest mieszanie oligoestrodiole z oligoeterodiolami, w wyniku czego otrzymuje się elastomery o pośredniej gęstości, wytrzymałości mechanicznej i odporności na hydrolizę. Segment sztywny budują izocyjaniany i przedłużacze łańcucha – diole bądź diaminy. W wyniku reakcji grupy izocyjanianowej (–NCO) z grupą wodorotlenową powstają ugrupowania uretanowe, w przypadku reakcji grupy –NCO z grupą aminową (–NH₂) – powstają ugrupowania mocznikowe o wysokiej energii kohezji. Jednym z najpopularniejszych diizocyjanianów jest diizocyjanian difenylometanu (MDI). W przemyśle i laboratoriach są używane różne jego formy. Oczyszczony, dwufunkcyjny izomer 4,4'-MDI (monomeryczny MDI, m-MDI) jest krystalicznym, białym ciałem stałym, służącym do otrzymywania się termoplastycznych elastomerów uretanowych o doskonałych właściwościach. Nieoczyszczony, ciekły, polimeryczny MDI (p-MDI) zawiera, w zależności od producenta, około 50 % izomeru 4,4'-MDI, a pozostałą część stanowi mieszanina innych izomerów oraz homologów MDI [6, 15]. Ze względu na jego średnią funkcyjność, większą od 2, otrzymuje się z udziałem p-MDI elastomery o strukturze usieciowanej lub silnie rozgałęzionej, wykluczającej termoplastyczność.

1.4. Cel pracy

Celem niniejszej pracy było scharakteryzowanie i omówienie poziomu zużycia ściernego elastomerów uretanowych badanego z wykorzystaniem dwóch najpopularniejszych technik badawczych: metody Grasselliego i metody Schoppera oraz próba odpowiedzi na pytanie, czy wyniki uzyskane przy zastosowaniu obu metod można ze sobą porównywać.

Dodatkowym aspektem przeprowadzonych badań było ustalenie wpływu użytego izocyjanianu na odporność na zużycie ściernie otrzymanych elastomerów uretanowych.

2. Część doświadczalna

2.1. Materiały użyte do syntezy

- oligoeterodiol: poli(tlenek tetrametylenowy) (PTMO) o masie cząsteczkowej $M_n = 1000$ (Theratan 1000, Du Pont);
- techniczny monomeryczny 4,4'-diizocyjanian difenylometanu (m-MDI) o czystości 98 %, (Sigma-Aldrich);
- polimeryczny izocyjanian difenylometanu (p-MDI) o zawartości grup NCO $30,5 \pm 1,0$ % mas., gęsto-

ści $1,21 \text{ g/cm}^3$ (25 °C), lepkości 125 mPas (25 °C) (Specflex NE113, Dow Chemical);

- 1,4-butanodiol (1,4-BD), (Du Pont) – przedłużacz łańcucha.

2.2. Synteza elastomerów uretanowych

PTMO oraz butanodiol bezpośrednio przed użyciem suszono w próżni w temperaturze 140 °C w ciągu 1 h. Syntezę elastomerów uretanowych z polimerycznego MDI prowadzono jednoetapowo w naczyniu polipropylenowym, następnie przelano do form.

Syntezę poliuretanów z udziałem monomerycznego MDI przeprowadzono dwuetapowo w szklanym reaktorze wyposażonym w olejowo-płaszczowy system grzania, mieszadło mechaniczne oraz instalację obniżonego ciśnienia. Do obliczonej ilości MDI dodano oligoeterodiol, następnie przeprowadzono polimeryzację w temperaturze 120 °C przez 60 min, po czym obniżono temperaturę w reaktorze do 50 °C. Na drugim etapie do uzyskanego prepolimeru dodano przedłużacz łańcucha i intensywnie mieszano przez 30 s. Gotowy materiał niezwłocznie przelano do form. Skład i udział masowy komponentów użytych do otrzymania elastomerów uretanowych zawiera Tabela 1.

Tabela 1. Rodzaj i udział masowy substratów w elastomerach uretanowych. % Sg oznacza procentową zawartość segmentów giętkich

Table 1. Composition and weight content of polyurethane elastomers. % Sg means % soft segments

Nr próbki	Skład, cz. masowe na 100 g PUR				molowo: oligomerol/ izocyjanian/przedłużacz
	PTMO, $M = 1000 \text{ g/mol}$; % Sg	p-MDI	m-MDI	1,4-BD	
1	50,0	41,1	–	8,9	1,0/3,0/2,0
2	55,0	37,7	–	7,3	1,0/2,5/1,5
3	60,0	34,2	–	5,8	1,0/2,1/1,1
4	65,0	30,8	–	4,2	1,0/1,7/0,7
5	70,0	27,4	–	2,6	1,0/1,4/0,4
6	50,0	–	40,1	9,9	1,0/3,2/2,2
7	55,0	–	36,7	8,3	1,0/2,7/1,7
8	60,0	–	33,4	6,6	1,0/2,2/1,2
9	65,0	–	30,0	5,0	1,0/1,8/0,8
10	70,0	–	26,7	3,3	1,0/1,5/0,5

2.3. Materiały komercyjne

W celach porównawczych przebadano dwie serie komercyjnych elastomerów uretanowych. Dostarczone przez dwóch niezależnych producentów próbki zostały oznaczone literami A i B. Każda z serii zawierała materiały syntezowane z tych samych substratów, ale w innych proporcjach, co skutkowało inną, nieokreślaną w tej pracy dokładnie, zawartością segmentów giętkich. Badane materiały komercyjne były pod względem spektrogramów uzyskanych ze spektroskopii w podczerwieni z transformacją Fouriera (FTIR) analogiczne do syntezowanych samodzielnie.

2.4. Przygotowanie próbek do badań

Próbki materiałów komercyjnych do badań na aparacie Grasselliego, o wymiarach podanych na Rys. 1, przygotowano przez frezowanie zgodnie z normą PN-EN ISO 2818 na frezarce numerycznej z dostarczonych profili. „Próbki komercyjne” o średnicy 16 mm do badań na aparacie Schoppera uzyskano za pomocą wykrojnika ze stałymi ostrzami metodą wycinania obrotowego (PN-ISO 4661-1). Próbki z poliuretanów syntezowanych we własnym laboratorium wykonano metodą odlewania w formach polipropylenowych, po czym wygrzewano je przez 2 h w temperaturze 50 °C, a następnie przez 3 h w 110 °C.

2.5. Metody badań

Zużycie ściernie na aparacie Grasselliego badano zgodnie z normą PN-80/C-04233 z modyfikacją polegającą na wyznaczaniu tylko ubytku objętości. Zmierzono ubytek objętości po 200 obrotach tarczy. Dobrano korundowy papier ścierny „1919 Siawood Top Tec” o numerze 60, firmy SIA Abrasives. Pomiar wykonano na dotartych krążkach papieru. Wykonano po 5 oznaczeń dla każdego materiału.

Zużycie ściernie na aparacie Schoppera określono zgodnie z obowiązującą normą PN-ISO 4649:2007. Dobrano płótno ściernie korundowe Alotex B (BTJ 14-3) o numerze 60 firmy Klingspor. Wykonano po 5 oznaczeń dla każdego materiału.

Gęstość elastomerów oznaczono na wadze hydrostatycznej w temperaturze 21,0 °C, zgodnie z normą PN-ISO 2781+AC1: 1996.

Twardość Shore’a zmierzono za pomocą aparatu typu D firmy Zwick, wyposażonego w statyw. Pomiar wykonano zgodnie z normą PN-EN ISO 868:2005.

Dokonano statystycznej interpretacji wyników zgodnie z normą PN-ISO 2602:1994.

3. Wyniki badań i dyskusja

3.1. Zużycie ściernie elastomerów uretanowych na podstawie MDI

Wyniki przeprowadzonych badań zestawiono w Tabeli 2.

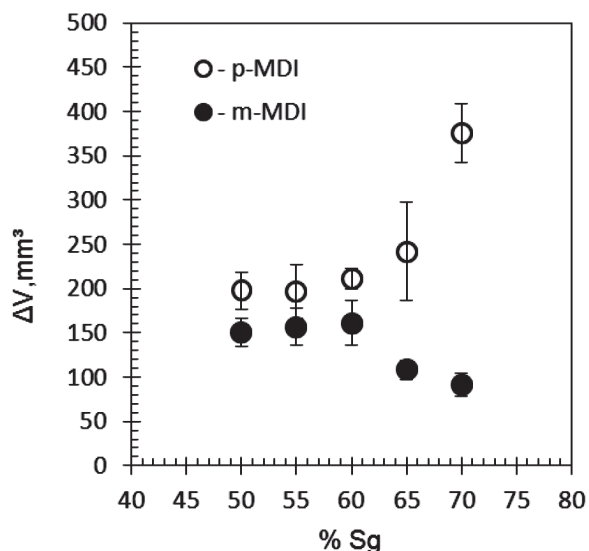
Tabela 2. Właściwości badanych elastomerów uretanowych

Table 2. Properties of polyurethane elastomers

Nr próbki	Twardość, Sh D	Gęstość, g/cm ³	Zużycie ściernie, ΔV, mm ³	
			aparat Grasselliego	aparat Schoppera
1	39±1	1,132±0,002	1172 ± 89	198 ± 21
2	34±1	1,121±0,002	1529 ± 112	197 ± 30
3	28±1	1,103±0,002	2435 ± 103	211 ± 12
4	24±1	1,094±0,002	2911 ± 198	242 ± 56
5	13±1	1,075±0,002	4002 ± 99	376 ± 33
6	52±1	1,144±0,002	1021 ± 87	151 ± 16
7	45±1	1,128±0,002	1343 ± 69	157 ± 21
8	37±1	1,115±0,002	1383 ± 87	161 ± 25
9	30±1	1,098±0,002	1195 ± 56	108 ± 11
10	23±1	1,082±0,002	1011 ± 60	91 ± 13
A1	37±1	1,160±0,002	139 ± 16	49 ± 2
A2	40±1	1,165±0,002	125 ± 15	57 ± 3
A3	47±1	1,180±0,002	112 ± 10	80 ± 4
B1	30±1	1,226±0,002	860 ± 60	61 ± 7
B2	34±1	1,232±0,002	820 ± 48	66 ± 4
B3	39±1	1,227±0,002	703 ± 49	89 ± 8

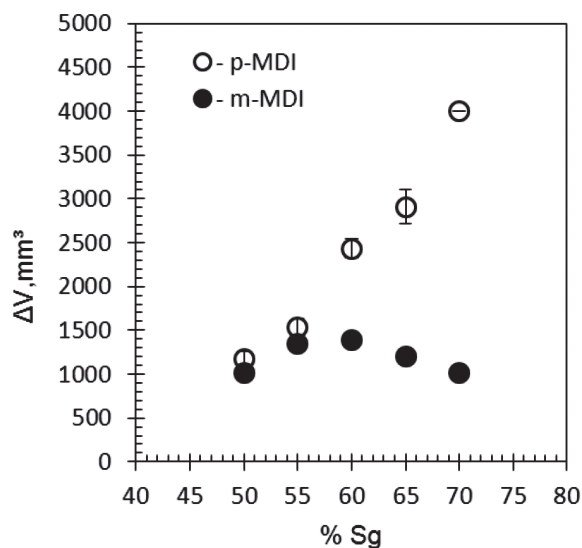
Elastomery uretanowe syntezowane z udziałem różnych izocyjanianów odznaczały się odmiennym przebiegiem zależności „zużycie ściernie – zawartość segmentów giętkich”, niezależnie od przyjętej metody badawczej (Rys. 3 i Rys. 4). Zawartość segmentów giętkich koresponduje z twardością materiału: im więcej segmentów giętkich, tym materiał bardziej miękki. W przypadku próbek zawierających w swoim składzie polimeryczny MDI wraz ze wzrostem zawartości segmentów giętkich, a tym samym wraz ze spadkiem twardości, poziom zużycia ściernego rośnie. Jest to szczególnie zauważalne w przypadku próbki zawierającej 70 % segmentów giętkich, badanej na aparacie Schoppera. Próbkę zawierającą 50–65 % segmentów giętkich wykazywały zużycie ściernie na statystycznie podobnym poziomie. W przypadku wyników uzyskanych na aparacie Grasselliego ta zależność jest wprost proporcjonalna – spadek twardości oznaczał istotny statystycznie spadek odporności na zużycie.

Poliuretany zawierające monomeryczny MDI wykazują odmienne zależności. Przebadane na aparacie Schoppera próbki zawierające od 50 % do 60 % segmentów giętkich mają statystycznie taką samą odporność na zużycie. Zachowanie się tych materiałów jest więc analogiczne jak PUR syntezowanych z udziałem polimerycznego MDI. Jednak przy wzroście zawartości fazy miękkiej odporność na ścieranie rośnie, czyli zmniejsza się ΔV . Badanie na aparacie Grasselliego potwierdza tę prawidłowość, aczkolwiek można zauważyć pewne maksimum zużycia przy zawartości 55 % i 60 % segmentów giętkich.



Rys. 3. Zużycie ściernie na aparacie Schoppera – materiały syntezowane we własnym zakresie

Fig. 3. Abrasive wear of synthesized PUR tested by Schopper method



Rys. 4. Zużycie ściernie na aparacie Grasselliego – materiały syntezowane we własnym zakresie

Fig. 4. Abrasive wear of synthesized PUR tested by Grasselli method

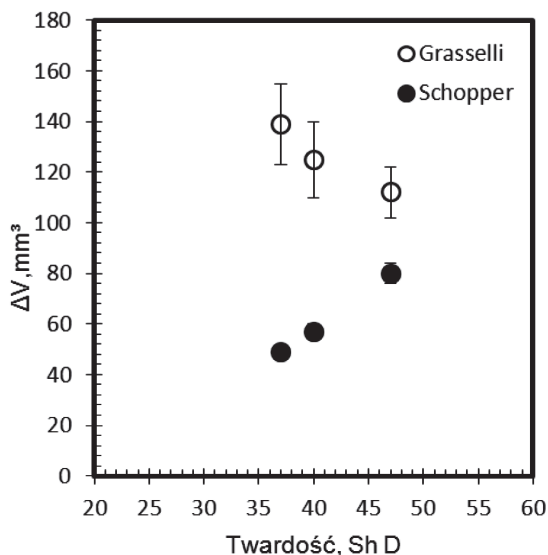
Takie różnice w zachowaniu należy tłumaczyć m.in. odmienną morfologią uzyskanych poliuretanów. Elastomery zawierające polimeryczny izocyjanian są silnie rozgałęzione i usieciowane, natomiast próbki zawierające monomeryczny MDI są termoplastyczne, dodatkowo segmenty sztywne ze względu na swoją symetrię, są zdolne do krystalizacji [6, 15]. Różnice w morfologii mogą skutkować odmiennym mechanizmem zużycia ściernego, jednakże należy to zweryfikować w dalszych badaniach.

3.1. Zużycie ściernie komercyjnych elastomerów uretanowych

Analiza wyników zużycia ściernego próbek komercyjnych spowodowała pewnego rodzaju zaskoczenie. Na wykresach (Rys. 5 i Rys. 6) przedstawiono zbiorcze wyniki pomiarów na obu urządzeniach badawczych, odpowiednio materiałów z serii A i serii B. Wyniki badań na aparacie Grasselliego pokazują, że wraz ze wzrostem twardości (spadek zawartości segmentów giętkich) odporność na zużycie ściernie rośnie. Statystycznie (95-proc. przedział ufności, liczba próbek $n = 5$) próbka A_3 jest bardziej odporna niż próbka A_1 , podobnie jak B_3 w porównaniu z B_1 (twardość próbek serii A i B podano w Tabelach 5 i 6).

Taką samą zależność wykazywały badane na aparacie Grasselliego próbki syntezowane przez autorów z użyciem polimerycznego MDI. Jednak wyniki badań próbek komercyjnych na aparacie Schoppera pokazu-

ją, że tendencja się odwraca. Wzrost twardości skutkuje istotnym spadkiem odporności (rośnie ΔV). Jest to szczególnie widocznie w przypadku serii A, w której wszystkie materiały wykazują statystycznie istotne różnice w poziomie zużycia ściernego.



Rys. 5. Zużycie ściernie na aparacie Grasselliego i aparacie Schoppera – próbki komercyjnej serii A

Fig. 5. Abrasive wear of commercial PUR (series A) Tested by Grasselli and Schopper method

4. Wnioski

Przeprowadzona w powyższej pracy analiza wykazuje, że sama znajomość twardości (zależnej od zawartości segmentów giętkich) nie jest wystarczająca do odpowiedzi na pytanie: który materiał będzie bardziej odporny na zużycie ściernie, bardziej twardy czy bardziej miękki?

Z punktu widzenia chemicznego istotne znaczenie może mieć dobór substratów użytych do syntezy elastomerów uretanowych. Próbkę miękką, zawierającą 70 % segmentów giętkich, mogą być odporne na zużycie ściernie (próbka 10) lub odwrotnie, charakteryzować się dużym zużyciem (próbka 5).

Z punktu widzenia mechaniki zużycia równie istotne znaczenie będą miały warunki pracy wytypowanego materiału. Metoda badawcza powinna uwzględniać rzeczywiste czynniki panujące w warunkach użytkowania. Materiał wykazujący dużą odporność na aparacie Grasselliego (A_3) po zmianie warunków ściernia może stać się materiałem najmniej odpornym. Z powyższego powodu czasem uzasadnione wydaje się zastosowanie do oznaczeń poziomu zużycia ściernego wycofanej normy, jeśli geometria układu trybologicznego będzie bardziej odzwierciedlała rzeczywistość.

Z przeprowadzonych badań wynika wniosek, że do problemu doboru materiału narażonego na zużycie ściernie należy podchodzić kompleksowo, uwzględniając zarówno budowę chemiczną, jak również warunki pracy elementu z projektowanego materiału poliuretanowego. Główną różnicą charakteru ściernia na aparacie Grasselliego w porównaniu z aparatem Schoppera z obracającą się próbką jest ciągła zmiana kierunku bruzdowania w przypadku aparatu Schoppera (bardziej agresywne warunki) i brak zmiany kierunku bruzdowania w aparacie Grasselliego. Zatem jeśli warunki ściernia są agresywne i następuje ciągła zmiana kierunku bruzdowania (np. sita do kruszyw), wydaje się bardziej uzasadnione zastosowanie elastomeru uretanowego o mniejszej twardości wykonanego z monomerycznego MDI. Jeśli zaś warunki pracy zapewniają stały kierunek bruzdowania (np. zgarniacze taśm przenośnikowych), można rozważyć zastosowanie do wytwarzania PU tańszego, polimerycznego MDI zamiast monomerycznego MDI, zwłaszcza, jeśli istnieje potrzeba wykonania twardego materiału o dużej zawartości segmentów sztywnych.

Literatura

- Mardel J., Chynoweth K. i A. Hill, *Materials Forum*, 1995, **19**, 117–128.
- Clemison I., *Castable polyurethane elastomers*, CRC Press, Boca Raton 2008.
- Hill D., Killeen M., O'Donnell J., Pomery P., St John D., Whittaker A, *Wear*, 1997, **208**, 155–160.
- Molnar W., Varga M., Braun P., Adam K. i E. Badisch, *Wear*, 2014, **320**, 1–6.
- Nachman M. i K. Kwiatkowski, *Wear*, 2013, **306**, (1–2), 113–118.
- Michalski P., Nachman M. i K. Kwiatkowski, *Polimery* 2012, **57**, 11–12, 839–845.
- Bohm, H., Betz S. i A. Ball, *Tribology International*, 1990, **23**, 6, 399–406.
- Jia X. i R. Ling, *Tribology International*, 2007, **40**, 1276–1283.
- Jaroszczyńska D., Gaczyński R. i B. Felczak, *Metody badań właściwości fizycznych gumy*, WNT, Warszawa, 1978.
- Beck R. i R. Truss, *Wear*, 1998, **218**, 145–152.
- Zakład Tworzyw Polimerowych IIM ZUT w Szczecinie, materiały niepublikowane.
- Nachman M., Michalski P., Hełminiak A., Arabczyk W. i Z. Roślaniec, *Elastomery*, 2012, **16**, 2, 11–15.
- Prisacariu C., *Polyurethane Elastomers From Morphology to Mechanical Aspects*, Springer-Verlag, Wiedeń, 2011.
- Michalski P. i K. Kwiatkowski, *Elastomery* 2014, **18**, 2, 23–28.
- Wirpsza Z., *Poliuretany. Chemia, technologia, zastosowanie*, WNT, Warszawa, 1991.