

## BADANIA WYTRZYMAŁOŚCIOWE ELASTOMERÓW POLIURETANOWYCH STOSOWANYCH W PRZEMYSŁE MOTORYZACYJNYM Z WYKORZYSTANIEM METOD MECHANIKI PĘKANIA

*Poliuretanowe elastomery zastępują w układach zawieszenia pojazdów mechanicznych materiały gumowe. W artykule przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych elastomerów poliuretanowych. Główną uwagę poświęcono odporności na pękanie i rozdzieranie elastomerów poliuretanowych w dwóch różnych konfiguracjach twardości – 80ShA – zbliżonej do twardości seryjnie użytkowanych gumowych elastomerów i 90ShA dedykowanej dla pojazdów, gdzie wymagana jest większa sztywność zawieszenia. Zbadano wpływ twardości tworzywa na odporność na pękanie wyrażoną w krytycznej wartości energii  $W_f$  oraz odporności na rozdzieranie. Wykazano, że wśród powszechnie stosowanych materiałów o dwóch twardościach; 80ShA i 90ShA, występują znacząco różne mechanizmy dyssypatywne przed frontem szczeliny. Pomimo zbliżonych wartości wydłużenia całkowitego przy zerwaniu (statyczna próba rozciągania próbek gładkich) zaobserwowano istotnie różną skłonność materiału do pochłaniania energii, jak również odporności na rozdzieranie. Z perspektywy użytkowej parametry te są kluczowe w kontekście dynamicznego charakteru pracy tego typu materiałów.*

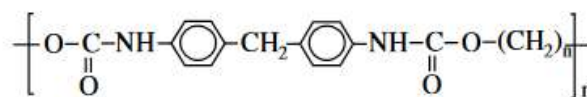
### WSTĘP

Komfort użytkowania pojazdów mechanicznych uzależniony jest od szeregu układów odpowiedzialnych za różne funkcje pojazdu. Jednym z nich jest układ zawieszenia, który łączy koła pojazdu z ramą. Jego głównym zadaniem jest utrzymywanie płynności ruchu i redukcja sił (naprężeń) pochodzących od nierówności występujących na drogach. Układ ten zbudowany jest z wielu elementów, pracujących w trudnych warunkach, takich jak: zanieczyszczenia, zmienne warunki atmosferyczne czy działające na niego duże siły na skutek drgań pochodzących od pokonywania przeszkód drogowych. W przypadku eksploatacji floty autobusowej można wykazać, że naprawy i usuwanie skutków awarii układu zawieszenia są znaczącym elementem kosztów poniesionych przez przewoźnika na skutek wyłączenia pojazdu z ruchu pasażerskiego. Na podstawie analizy floty pewnego przedsiębiorstwa komunikacyjnego, wykazano (w pracy [1]), że średnie czasy usuwania usterek zawieszenia przedniego i tylnego eksploatowanych autobusów były jednymi z najbardziej czasochłonnych napraw (odpowiednio 3 i 5 miejsce na 21 sklasyfikowanych). Ze względów ekonomicznych – wyłączenie pojazdu z ruchu – poszukuje się nowych rozwiązań w sferze materiałów elastomerowych. Jednym z osiągnięć inżynierii chemicznej i materiałowej jest synteza nowoczesnych materiałów poliuretanowych. Materiał ten posiada wiele zalet - w przeciwieństwie do seryjnie montowanych przez producentów elementów gumowych. Do zalet tych można zaliczyć: zdolność do tłumienia drgań, wysoką wytrzymałość w szerokim zakresie temperaturowym, wysoką elastyczność w całym zakresie twardości, wysoką odporność na ścieranie a także na obciążenia dynamiczne oraz odporność na oleje, kwasy, rozpuszczalniki i warunki atmosferyczne. Te cechy decydują o coraz częstszym jego stosowaniu w obecnych konstrukcjach zawieszonych pojazdów.

Z punktu widzenia użytkowego oraz doświadczeń producentów kluczową rolę w trwałości tego typu elementów odgrywa obecność ostrych koncentratorów naprężeń wywołanych m.in. uszkodzeniami

powstałymi podczas montażu lub wadami pojawiającymi się już w fazie produkcyjnej. Poliuretan jako materiał, pomimo bardzo dobrych właściwości, wciąż nie jest w pełni dobrze poznany – podobnie zresztą jak guma – na tle badań eksperymentalnych pod kątem odporności na pękanie. Wynika to między innymi z faktu braku rozpowszechnionej wiedzy na temat sposobu badań takich materiałów oraz z trudnością interpretacji ich wyników ze względu na jego lepkosprężyste zachowanie oraz różnorodności grup materiałowych przeznaczonych do syntezy. W przypadku materiałów poliuretanowych stosowanych na elementy zawieszonych pojazdów główny sposób jego wytwarzania w warunkach przemysłowych polega na polimeryzacji addycyjnej. Może zawierać w swojej budowie grupy eterowe, estrowe, uretanowe, mocznikowe czy także pierścienie aromatyczne. Możliwość wytwarzania elastomerów poliuretanowych pozwalają na stosowanie różnych składników w celu uzyskania pożądaných właściwości. Sardanopoli [2] wykorzystuje polietery i poliestry do produkcji elastomerów poliuretanowych celem uzyskania wzrostu wytrzymałości materiału na ściskanie. Z kolei Desai i Lee [3, 4] uzyskali wzrost wytrzymałości na rozciąganie i wydłużenia całkowitego wykorzystując do w reakcji syntezy związki PPG, HTPB, TDI oraz MDI. Należy zaznaczyć, że poza odpowiednimi składnikami chemicznymi, kluczową rolę w uzyskaniu optymalnych właściwości mechanicznych odgrywa proces technologiczny – często strzeżony patentem lub tajemnicą danego przedsiębiorstwa produkcyjnego.

Cechą charakterystyczną poliuretanów jest specyficzna segmentowa blokowa budowa łańcucha, gdzie makrocząsteczki składają się z naprzemiennie ułożonych segmentów sztywnych i elastycznych [2].



Rys. 1. Przykładowa, segmentowa budowa łańcucha poliuretanowego

Segmenty sztywne zawierają ugrupowania polarne i silnie oddziałują na siebie poprzez wytwarzane wiązania wodorowe. Tworzą się domeny segmentów sztywnych, które stanowią fazę uporządkowaną przenikającą się z fazą segmentów giętkich, lecz nie mieszają się ze sobą i dlatego Poliuretany mają strukturę dwufazową, co prowadzi do dużej wytrzymałości mechanicznej.

Segmenty giętkie natomiast składają się z ugrupowań metylo- wch oraz estrowych lub eterowych [5].

Ich właściwości fizyczne zależą od udziału fazy segmentów sztywnych i giętkich. Zawartość segmentów sztywnych powyżej 40% tworzy fazę ciągłą, przez co zwiększa się twardość. W przypadku poliuretanów elastycznych, segmenty giętkie stanowią większość i to one tworzą fazę ciągłą. Ich zawartość wtedy jest na poziomie 60-80% [5].

Poliuretany charakteryzują się relatywnie dużym modułem sprężystości, stabilnym w szerokim zakresie temperatur, doskonałą wytrzymałością na rozciąganie oraz wielokrotne zginanie, dobrą udarnościami czy odpornością na hydrolizę. Posiadają także odporność na działanie różnych związków chemicznych, zwłaszcza na oleje i smary węglowodorowe. Mają również wysoką odporność na ścieranie, rozdieranie, jak również zdolność do tłumienia drgań [5].

## 1. MATERIAŁ BADAWCZY I METODA

Do badań wstępnych wytypowano elastomer poliuretanowy powstały na bazie MDI (4,4'-metylenodifenylodiiizocyaninu) i glikolu politetrametylenowego. Syntezę i technologię produkcyjną opracowano w taki sposób, aby uzyskać odlewy poliuretanowe o różnych wartościach twardości 80ShA i 90ShA – powszechnie spotykanych w przemyśle motoryzacyjnym. Materiał w postaci prefabrykatów pokazano na rys. 2.



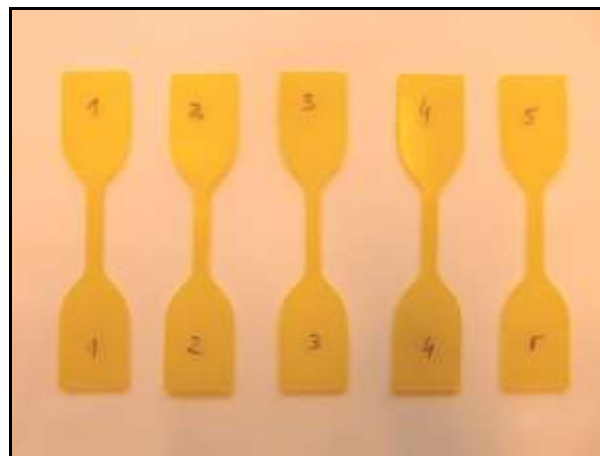
**Rys. 2.** Prefabrykaty przygotowane do badań; żółty 90ShA i czerwony 80ShA

Dla wytworzonych materiałów wykonano serię testów mechanicznych, które swoim zakresem obejmowały:

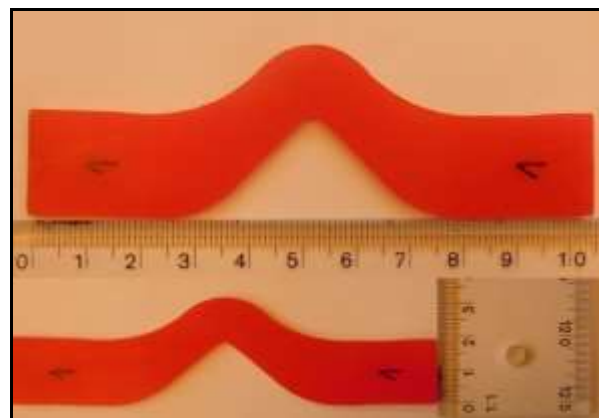
- Statyczną próbę rozciągania,
- Próbę rozdierania,
- Badania odporności na pęknięcie,
- Ocenę wartości odkształcenia trwałego po ścisnieniu.

Wszystkie badania prowadzono w dwóch grupach materiałowych; o twardości 80ShA (czerwone) i 90ShA (żółte). Prezentowane w dalszej części pracy wyniki (punkty na wykresach) reprezentują średnią z pięciu próbek.

Statyczną próbę rozciągania przeprowadzono zgodnie z normą PN-ISO 37:2007/AC1:2008 na próbkach wiósełkowych („Dumbell” – C) – rys. 3



**Rys. 3.** Próbkę przeznaczoną do statycznej próby rozciągania (90ShA)



**Rys. 4.** Próbkę przeznaczoną do statycznej próby rozdierania (80ShA)

Próbę rozdierania przeprowadzono na próbkach kątowych (typ C) zgodnie z normą PN ISO 34-1:2007 (procedura a, metoda B). Kształt i wymiary próbek pokazano na rys. 4. Próbę ścisnienia przeprowadzono w oparciu o postanowienia normy PN-ISO 815:1998 i ASTM D395. Ścisnieniu poddano próbki walcowe, które odkształcono wstępnie o 25% (80ShA) i 15% (90ShA), a następnie sezonowano je w temperaturze 70°C przez 72 godziny.

Ze względu na brak uregulowań normatywnych dotyczących badania odporności na pęknięcie elastomerów zdecydowano się na wykorzystanie (rozpoznawczo) metody EWF (ang. *Essential Work of Fracture*). Wyznaczenie tzw. istotnej pracy polega na przeprowadzeniu próby rozciągania na specjalnie przygotowanych próbkach płaskich z obustronnie naciętymi korbami, różniącymi się między sobą wartością długości niepękniętego odcinka L (rys. 5). Próbkę obciąża się monotonicznie celem zarejestrowania przebiegu siły zrywającej w funkcji przemieszczenia – dla różnych konfiguracji długości korb. Na podstawie analizy przebiegów wykresów siła – przemieszczenie – wyznaczana jest energia (praca sił zewnętrznych) niezbędna do rozdzielenia próbki w funkcji tzw. wiążącej długości L [6]. Najczęściej w analizach wykorzystywana jest całkowita energia potrzebna do wykonania pracy łamania, która równa jest wartości pola pod krzywą obciążenie – odkształcenie. Niekiedy w literaturze pojawiają się także koncepcje jej partycjonowania. Jej składniki wyznaczane mogą być dwiema metodami [6]:

- a) Metoda tzw. „Pracy odkształcenia” – polega ona na rozdzielaniu energii na  $W_y$  -energie potrzebna do odkształcenia strefy wiążącej (pomiędzy dwoma korbami) oraz  $W_n$  – energię potrzebną do późniejszego przewężenia i zerwania.

b) Metoda tzw. „pracy inicjacji” – podzielenie energii odbywa się po przekroczeniu strefy przewężenia na  $W_I$  – energia potrzebna na inicjację, rozwój odkształcenia prowadzący do przewężenia oraz na stępienie końcówki pęknięcia oraz na  $W_{II}$  – energię potrzebną do rozwoju pęknięcia i poszerzenia przewężenia w strefę plastyczną. Podczas przeprowadzania eksperymentu należy uwzględnić poniższe założenia:

- próbka musi znajdować się w płaskim stanie naprężenia,
- przebiegi uzyskanych wykresów siła – odkształcenie, powinny być podobne do siebie,
- odległość pomiędzy karbami  $L$  powinna znajdować się w poniżej przedstawionym przedziale:

$$\max(3t - 5) < L < \min(W / 3, 2r_p) \quad (1)$$

Gdzie:

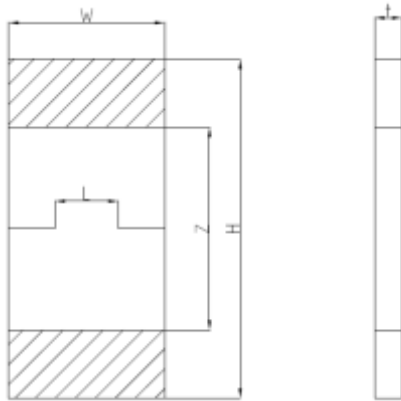
- $W$  – szerokość próbki,
- $t$  – grubość próbki,
- $r_p$  – promień strefy plastycznej.

$$r_p = \left( \frac{\pi}{8} \right) \left( \frac{EWe}{\sigma_y^2} \right) \quad (2)$$

Gdzie:

- $E$  – moduł Younga,
- $\sigma_y$  – granica plastyczności,
- $We$  – istotna praca łamania.

Kształt i wymiary próbek do analiz odporności na pęknięcie przedstawiono na rys. 5.



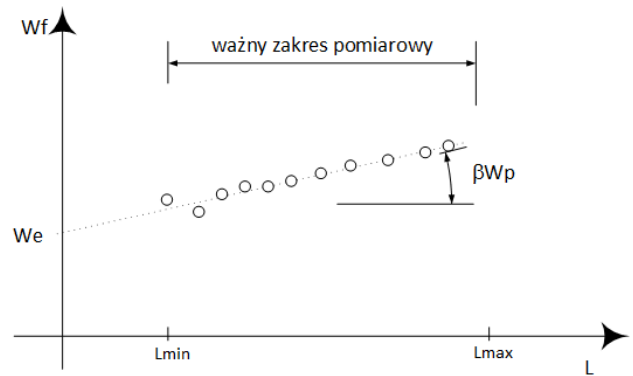
**Rys. 5.** Próbką DENT do badań odporności na pęknięcie,  $W=40\text{mm}$ ,  $H=140\text{mm}$ ,  $Z=80\text{mm}$ ,  $L$  – długość niepękniętego odcinka,  $t=2\text{mm}$

Typowy diagram energetyczny zniszczenia przedstawiono na rys. 6.

Przy spełnieniu wszystkich warunków prowadzenia eksperymentu (jak również (1) i (2)) zależność energii łamania od długości niepękniętego odcinka  $L$  przedstawia się linią prostą o równaniu:

$$W_f = W_e + \beta W_p L \quad (3)$$

Przy czym współczynnik  $\beta$  związany jest z kształtem strefy plastycznej charakteryzującej niepęknięty odcinek próbki.

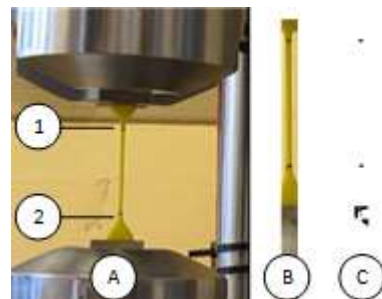


**Rys. 6.** Przykładowy diagram energetyczny EWF

Boczne koncentratory naprężeń wykonywano skalpelem chirurgicznym z wymiennym ostrzem. W celu zapewnienia dostatecznej małego promienia zaokrąglenia pęknięcia, karby nacinano nowymi ostrzami chirurgicznymi. Długość niepękniętego odcinka wyznaczano za pomocą warsztatowego mikroskopu z dokładnością do 0.1mm. Wykonane w ten sposób pęknięcia symulowały pęknięcia zmęczeniowe lub ostre wady powstałe w trakcie eksploatacji lub na skutek zjawisk zmęczeniowych. Serię próbek z różnymi długościami niepękniętego odcinka rozciągano z prędkością 50mm/min. W metodzie EWF głównym celem jest uzyskanie wykresów energetycznych – zależności energii pęknięcia od długości niepękniętego odcinka. Wartość  $L=0$  reprezentuje teoretyczną energię niezbędną do rozdzielenia materiału. W wielu pracach wykazano zbieżność  $W_f$  z krytyczną wartością całki  $J$ . Ekwivalentność tej wielkości postulowana jest m.in. w pracy [7]. W celu zautomatyzowania toru pomiarowo-analitycznego zaimplementowano procedurę metody EWF do środowiska HPVEE [8] i na tej podstawie obliczano poszczególne komponenty energetyczne. Celem oceny poziomu dyssypacji energii podczas eksperymentu obserwowano wierzchołki pęknięć za pomocą kamery termowizyjnej.

## 2. WYNIKI BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH

Wyniki statycznej próby rozciągania zebrano w tabeli 1 ( $V$  – współczynnik zmienności). Na rys. 8. przedstawiono reprezentatywne przebiegi rejestrowanej siły w funkcji przemieszczenia tłoka maszyny (160mm). W celu oszacowania poziomu naprężeń odpowiadających poziomom odkształcenia całkowitego; 100%, 200% i 300% rejestrowano za pomocą cyfrowej kamery przemieszczenia punktów referencyjnych.

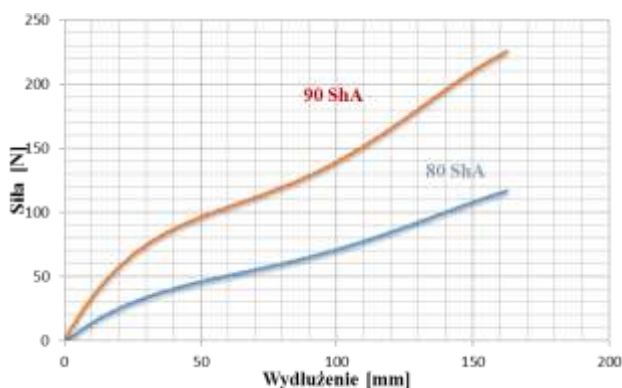


**Rys. 7.** Próbką o twardości 90ShA w szczękach maszyny wytrzymałościowej z zaznaczonymi punktami kontrolnymi; górnym (1) i dolnym (2).

Na rys. 7 przedstawiono kolejne etapy przetwarzania obrazu: (A) uzyskanego bezpośrednio z kamery cyfrowej, (B) przyciętego do obszaru zainteresowania, (C) zbinaryzowanego. W prezentowanej metodzie zakłada się, że:

- filmowany jest znacznie większy obszar niż tylko „pole robocze”  
W związku z tym każda klatka musi być „przycięta” (i obrócona gdy zachodzi potrzeba korekty pionu).
- górna szczęką maszyny jest nieruchoma, „pole robocze” obejmuje próbkę oraz dolną szczękę, która porusza się w trakcie eksperymentu. Algorytm znajduje granicę szczęki korzystając z metody korelacji obrazów. W ten sposób na każdej klatce pozostaje tylko obraz próbki.
- obraz próbki jest binaryzowany (wszystkie punkty obrazu o jasności mniejszej niż zadana wartość stają się białe, a pozostałe czarne). Pozwala to pozostawić na obrazie wyłącznie markery.

Zastosowany algorytm grupowania pikseli pozwala oddzielić punkty należące do markera górnego i dolnego. Nawet w przypadku niedoskonałości obrazu, gdy któryś z markerów składa się z kilku niespójnych obszarów (znajdujących się obok siebie) algorytm znajdzie (metodą średniej) „środek ciężkości” każdego markera. Pomiedzy środkami ciężkości wyznaczana jest odległość. W przedstawionej metodzie zastosowano jest metrykę euklidesową. Przetwarzanie obrazu z kamery odbywało się za pomocą autorskiego algorytmu numerycznego, zaimplementowanego do środowiska Mathematica/MatLab.

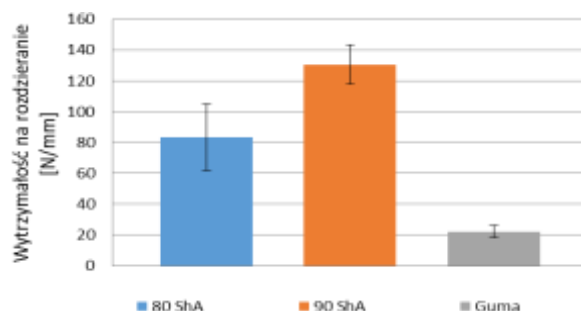


**Rys. 8.** Reprezentatywne przebiegi krzywych rozciągania na PU 80ShA i 90ShA.

**Tab. 1.** Wyniki statycznej próby rozciągania

Oznaczenie	PU80ShA	PU90ShA	UWAGI
odkształcenie całkowite $\epsilon_r$ [%]	419	422	
wytrzymałość na rozciąganie $\sigma_r$ [MPa]	31,8	41,8	PU80 – min.30, max. 36 PU90 – min.40,5, max. 45,6
$\sigma_{100\%}$ [MPa]	3,7	7,4	PU80:V=11,7% PU90:V=2%
$\sigma_{200\%}$ [MPa]	5,4	11,1	PU80:V=5,8% PU90:V=1,9%
$\sigma_{300\%}$ [MPa]	7	15,1	PU80:V=6,3% PU90:V=2%

Wyniki próby rozdierania wraz z przedziałami ufności dla średniej ( $\alpha=0.05$ ) przedstawiono na rys. 9. Wyniki zestawiono z typowymi wynikami uzyskanymi dla elastomerów gumowych.



**Rys. 9.** Wyniki badań wytrzymałości na rozdieranie

Z doświadczenia autorów wynika, że to właśnie wytrzymałość na rozdieranie jest dobrym wskaźnikiem jakości produkowanego surowca. Dlatego też przeprowadzono dodatkowe badania gumowych elastomerów celem oceny porównawczej jakości wytworzonych materiałów. Interesujące wyniki, można także odnaleźć w pracy [9] przedstawiono wyniki próby rozdierania dla czterech rodzajów gumy o twardości 80 ShA:

- dla typu I -  $T_s = 22,89$  [N/mm],
- dla typu II -  $T_s = 27,52$  [N/mm],
- dla typu III -  $T_s = 21,16$  [N/mm],
- dla typu IV -  $T_s = 17,19$  [N/mm].

Autorzy [9] modyfikowali skład elastomerów gumowych celem uzyskania ich optymalnych właściwości – w tym przypadku uzyskane wyniki próby rozdierania wyniosły  $T=76,7$  N/mm, przy czym twardość tego elastomeru wynosiła zaledwie 64ShA.

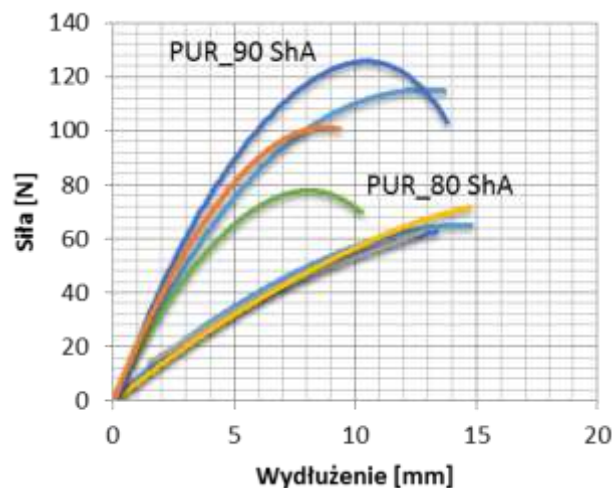
Wyniki próby ściskania zebrano w tabeli 2.

**Tab. 2.** Wyniki próby ściskania (70°C, 72h, 25%80ShA, 15%90ShA)

Oznaczenie	PU80ShA	PU90ShA
$\epsilon_i$ [%]	30,7	25,2

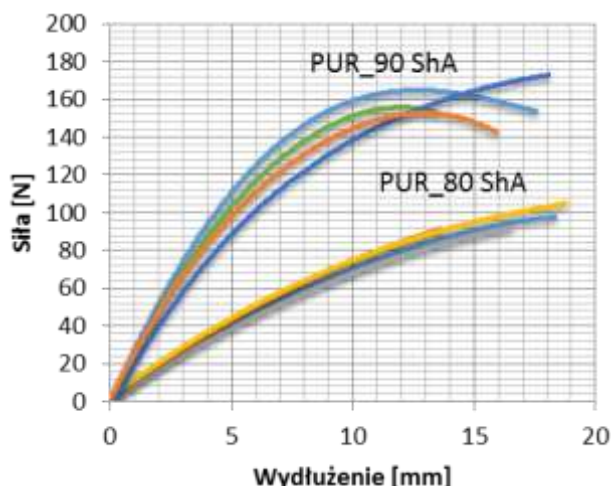
### Wyniki badań odporności na pękanie metodą EWF

Przykładowe przebiegi krzywych rozciągania próbek z karami przedstawiono na rys. 10 (L=6-7mm) oraz rys. 11 (L=8mm).

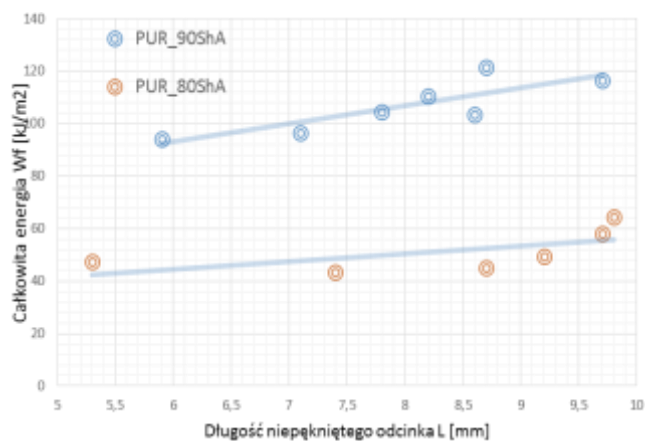


**Rys. 10.** Reprezentatywne przebiegi krzywych rozciągania PU 80ShA i 90ShA dla długości L=6-7mm

Przebiegi krzywych rozciągania dla materiałów o twardości 80ShA wskazują na kruchy charakter rozprzestrzeniania się pęknięć w tym materiale. Zupełnie inny przebieg procesu niszczenia odnajdujemy w materiale o twardości 90ShA. Każdorazowo, zauważa się elementy uplastycznienia szczeliny przed gwałtowną dekohezją materiału. Wnioski te potwierdzają także obrazy zarejestrowane kamerą termowizyjną.



**Rys. 11.** Reprezentatywne przebiegi krzywych rozciągania PU 80ShA i 90ShA dla długości  $L=10\text{mm}$



**Rys. 12.** Wykresy EWF dla badanych elastomerów poliuretanowych

Na rys. 12 przedstawiono energetyczny wykres pękania badanych elastomerów poliuretanowych.

Zbiorcze zestawienie miar odporności na pęknięcie wyrażone metodą EWF przedstawiono w tabeli 3.

**Tab. 3.** Zbiorcze zestawienie wyników odporności na pęknięcie

Oznaczenie	PU80ShA	PU90ShA
$W_e$ [kJ/m <sup>2</sup> ]	26,7	52,3
$\beta W_p$ [MJ/m <sup>3</sup> ]	2,9	6,8

Zaobserwowane znaczne różnice wyrażone w składnikach energetycznych wyznaczonych metodą EWF wskazują na różne mechanizmy dyssypacyjne zachodzące przed frontem szczeliny. Potwierdzenie tych różnic odnaleziono także w obrazach termograficznych rejestrowanych w trakcie eksperymentu (rys. 13) w różnych fazach obciążania próbki. Obserwowane różnice sięgały nawet kilku stopni (strefa procesu pęknięcia). Zauważa się relatywnie wyższą amplitudę temperatury w materiale 90ShA w porównaniu z 80ShA. Obserwacje te można wiązać z efektywniejszymi mechanizmami dyssypacyjnymi przed frontem szczeliny. Dodatkowo, w przypadku materiału 90ShA (dla dostatecznie krótkiego, niepękniętego odcinka) obserwowano wzrost temperatury na całym niepękniętym odcinku  $L$  – czego nie obserwowano w materiale o twardości 80ShA.

Ze względu na brak norm badawczych i danych materiałowych dokumentujących odporność na pęknięcie tworzyw polimerowych,

wyznaczoną metodą EWF pracę  $W_e$  odniesiono wyników do innych, znanych materiałów polimerowych (niekoniecznie użytkowanych w systemach zawieszonych pojazdów). W pracy [6] przedstawiono wyniki dla trzech materiałów polimerowych, które wynoszą, odpowiednio dla każdego:

- EPCOP (kopolimer blokowy propylen-etylen) -  $w_e = 43,8$  [kJ/m<sup>2</sup>],  $\beta w_p = 10,1$  [MJ/m<sup>3</sup>],
- PETG (amorficzny politereftalan etylenu) -  $w_e = 29,2$  [kJ/m<sup>2</sup>],  $\beta w_p = 7,5$  [MJ/m<sup>3</sup>],
- PEI (polietermid) -  $w_e = 26,4$  [kJ/m<sup>2</sup>],  $\beta w_p = 2,4$  [MJ/m<sup>3</sup>].

Ze względu na podobieństwo właściwości mechanicznych niektórych poliuretanów termoplastycznych, przedstawiono poniżej (na podstawie pracy [10]) wyniki badań odporności na pęknięcie metodą EWF dla różnych odmian termoplastycznego poliuretanu, różniących się stosunkiem udziałów segmentów miękkich i twardych w ich strukturze:

- PU12 -  $W_e = 48,3$  [kJ/m<sup>2</sup>],  $\beta W_p = 3,0$  [MJ/m<sup>3</sup>],
- PU13 -  $W_e = 27,3$  [kJ/m<sup>2</sup>],  $\beta W_p = 5,0$  [MJ/m<sup>3</sup>],
- PU14 -  $W_e = 26,6$  [kJ/m<sup>2</sup>],  $\beta W_p = 4,8$  [MJ/m<sup>3</sup>],
- PU16 -  $W_e = 25,7$  [kJ/m<sup>2</sup>],  $\beta W_p = 2,7$  [MJ/m<sup>3</sup>],
- PU16 -  $W_e = 26,3$  [kJ/m<sup>2</sup>],  $\beta W_p = 5,1$  [MJ/m<sup>3</sup>],
- PU18 -  $W_e = 25,2$  [kJ/m<sup>2</sup>],  $\beta W_p = 2,3$  [MJ/m<sup>3</sup>].

W porównaniu wyników przytoczonych powyżej z wynikami uzyskanymi w przeprowadzonych badaniach, poliuretan o twardości 90 ShA wypada najlepiej. Natomiast poliuretan o twardości 80 ShA posiada najbliższe zbliżone właściwości do materiału PEI.

## PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W pracy scharakteryzowano pod względem wytrzymałościowym jedno z rozwiązań materiałowych – mogące być potencjalnie wykorzystane do budowy niektórych elementów zawieszania pojazdów mechanicznych – w tym autobusów. Badany elastomer poliuretanowy został wytworzony na bazie MDI (4,4 metylenodifenyldiizocyaninu) i glikolu polietylenowego. W wyniku syntezy i przetwórstwa technologicznego otrzymano materiały o zróżnicowanych cechach użytkowych pod względem twardości tj. 80ShA i 90ShA. Na podstawie samego przebiegu krzywych rozciągania nie można wnioskować o charakterze i sposobie pęknięcia tego materiału zwłaszcza, że wartości krytyczne odkształceń całkowitych są zbliżone. Dane eksploatacyjne oraz charakter pracy elementów zawieszania wskazują na fakt, że zastosowanie mechaniki pęknięcia do scharakteryzowania tego typu materiałów jest pełni uzasadnione. Zauważa się to nie tylko w zróżnicowanych wartościach wytrzymałości na rozdieranie, ale przede wszystkim w odporności na pęknięcie. Różnica ta, jest przede wszystkim widoczna w wartościach rejestrowanych sił (dla różnych konfiguracji  $L$ ) przebiegów krzywych siła – przemieszczenie. Wynika ona zapewne z budowy strukturalnej poliuretanu, w której to wraz ze wzrostem tzw. segmentów twardych w łańcuchu cząsteczkowym, wzrastają właściwości mechaniczne. Z obserwacji termograficznych wynika także, że pojawiają się także dodatkowe mechanizmy dyssypacyjne, które umożliwiają większą akumulację energii w materiale. Najistotniejszych wyników, z punktu badań odporności na pęknięcie, dostarczyły badania metodą istotnej pracy łamania. W następstwie czego uzyskano wartość istotnej energii  $W_e$  dla materiału o twardości 80 ShA równą  $26,8$  kJ/m<sup>2</sup> a dla materiału o twardości 90 ShA równą  $52,3$  kJ/m<sup>2</sup>. Na tle wyników odporności na pęknięcie dla innych materiałów polimerowych, w tym także termoplastycznych poliuretanowych elastomerów, badany materiał wypada bardzo dobrze. W porównaniu z gumą, poliuretan cechuje się znacznie lepszymi właściwościami mechanicznymi (głównie wytrzymałość na rozdieranie, oraz odporność chemiczna). Z punk-

tu widzenia naukowego, metoda EWF w takim znaczeniu w jakim wykorzystano ją w niniejszej pracy, wydaje się nieocenionym narzędziem kontroli jakości tworzywa dla materiałów o twardości 90ShA. Ze względu na niewielki poziom uplastycznienia – materiały o twardości 80ShA mogą zostać scharakteryzowane za pomocą klasycznych miar odporności na pękanie. Metoda EWF w tym przypadku może być także efektywnie wykorzystana, ale pod warunkiem partycjonowania energii – głównie w kierunku pracy inicjacji Wi.

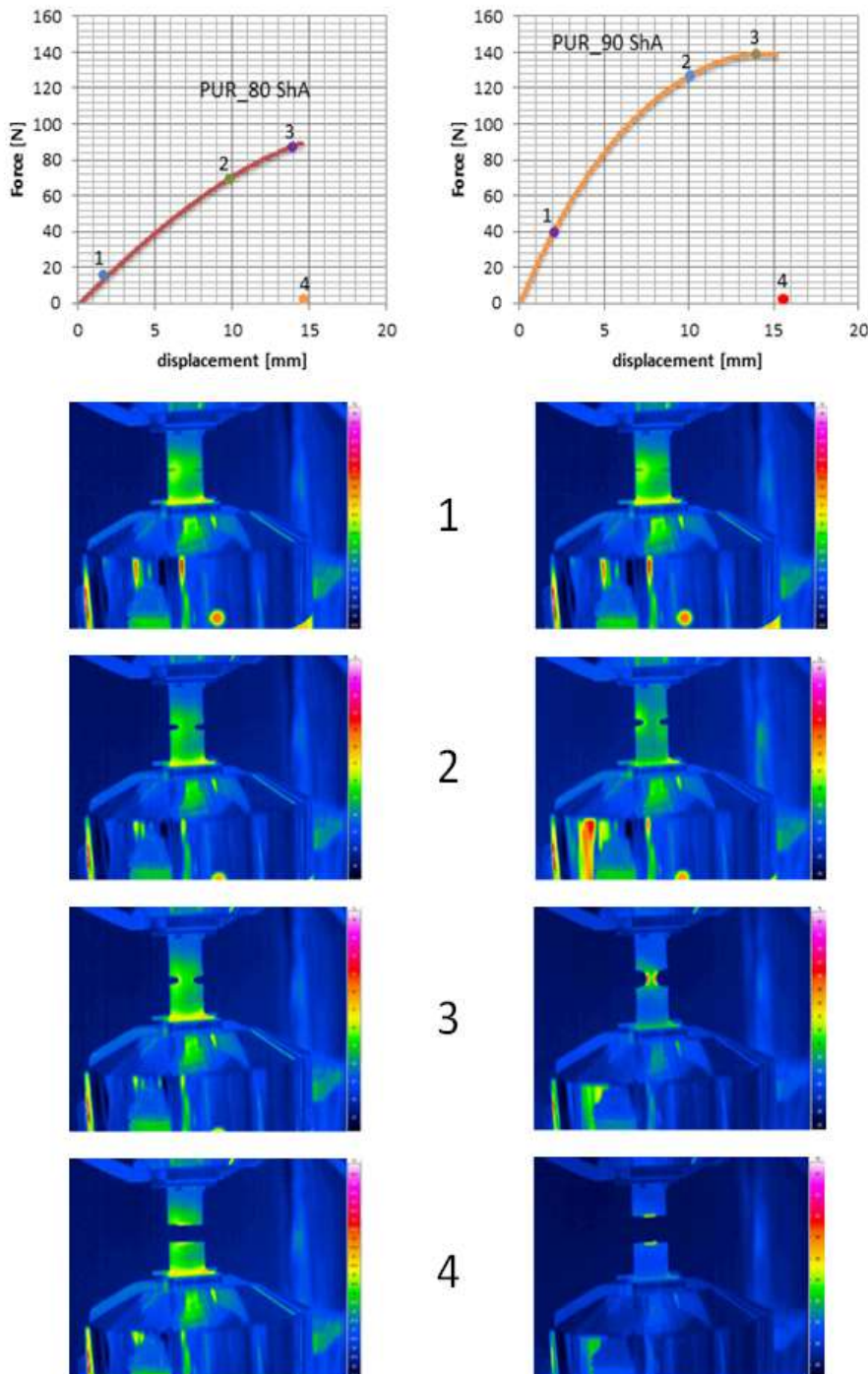
### PODZIĘKOWANIA

- 1) Prace eksperymentalne zostały częściowo sfinansowane z środków statutowych Politechniki Wrocławskiej B50090/W10/K10
- 2) Autorzy pracy pragną także wyrazić podziękowanie dla Wro-

clawskiego Centrum Akademickiego, dzięki któremu możliwa była realizacja niniejszej pracy w ramach Miejskiego Programu Wsparcia Współpracy Szkolnictwa Wyższego i Nauki oraz Sektora Aktywności Gospodarczej finansowanego ze środków Gminy Wrocław.

### BIBLIOGRAFIA

1. Tubis A., Werbińska-Wojciechowska S., System pomiaru a ocena niezawodności przewozów świadczonych przez przedsiębiorstwa drogowego transportu pasażerskiego. Studium przypadku, Logistyka nr 3/2014, pp.6347-6447
2. Sardanopoli, A., Grosse, I.L. and Richard, J. (2001). Cross-linking Thermoplastic Polyurethane, United States Patent: 6258310, 2001-10-07.
3. Desai, S., Thakore, I.M. and Sarawade, B.D. (2000). Effect of



Rys. 13. Przykładowe termogramy zarejestrowane w różnych fazach obciążania próbek

- Polyols and Diisocyanates on Thermo-mechanical and Morphological Properties of Polyurethanes, *European Polymer Journal*, 36: 711–725
- Lee, D.K. and Tsai, H.B. (2000). Properties of Segmented Polyurethanes Derived from Different Diisocyanates, *Journal of Applied Polymer Science*, 75: 167–174.
  - Żuchowska D., *Polimery konstrukcyjne przetwórstwo i właściwości*, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1993.
  - J. Gamez-Perez, M. Sanchez-Soto, J. Ignacio Velasco, M. Ll. MasPOCH, The Essential Work of Fracture (EWF) method – Analyzing the Post –Yielding Fracture Mechanics of polymers, *Engineering Failure Analysis*, December 2009.
  - Arkhireyeva, A., and S. Hashemi. "Determination of fracture toughness of poly (ethylene terephthalate) film by essential work of fracture and J integral measurements." *Plastics, rubber and composites* 30.7 (2001): 337-350
  - Helsel R., *Visual Programming With HP-VEE (3rd Edition)*, Prentice Hall PTR, Hewlett-Packard Professional Books, 1998
  - G. Rodriguez, P. Touchet, A.R. Teets, D.P.Flanagan, "Elastomers for Tracked Vehicles-Development of Rubber Compounds for Bushing", Army Research Laboratory, United States 1999.
  - Haibin C., Jingshen W., "Specific Essential work of fracture of Polyurethane thin Films with Different Molecular Structures", *Journal of Polymer Science: Part B: Polymer Physics*, doi:10.1002/polb.21172

### Mechanical investigation of polyurethane elastomers in terms of fracture mechanics methods

*In the paper, the experimental results of the mechanical investigation have been presented. The main attention was paid to fracture toughness and tearing resistance of polyurethane elastomers in terms of two different hardness configurations; 80ShA and 90ShA. The impact of material hardness on the fracture resistance is reflected in experimental results. For fracture toughness characterization, the EWF (essential work of fracture) method was involved. It has been shown, that the 80ShA and 90ShA materials demonstrate completely different behavior under high stress concentration condition - see the results for the cracked DENT specimens. The higher values of the essential work of fracture for the 90ShA material confirm a higher ductility level of this material. From the perspective of usefulness of fracture mechanics, the energy approach seems to be crucial in the context of the real operating conditions of the bushing in suspension system of vehicles.*

Autorzy:

dr inż. **Grzegorz Lesiuk** – Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczny, Katedra Mechaniki i Inżynierii Materiałowej, ul. Smoluchowskiego 25, 50-370 Wrocław ([Grzegorz.Lesiuk@pwr.edu.pl](mailto:Grzegorz.Lesiuk@pwr.edu.pl))

dr inż. **Wojciech Myszka** - Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczny, Katedra Mechaniki i Inżynierii Materiałowej, ul. Smoluchowskiego 25, 50-370 Wrocław

mgr inż. **Kamil Snowacki** – Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczny, Katedra Mechaniki i Inżynierii Materiałowej, ul. Smoluchowskiego 25, 50-370 Wrocław

mgr inż. **Krzysztof Junik** – Strongflex Sp. z o.o., ul. Przejazdowa 11, 51-167 Wrocław