

Magdalena WÓJTOWICZ, Janusz W. SIKORA

Politechnika Lubelska, Katedra Procesów Polimerowych; e-mail: janusz.sikora@pollub.pl

## Powrót poodkształceniowy poliuretanowych pianek wiskoelastycznych

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono badania doświadczalne czasu i wartości powrotu poodkształceniowego, zarówno natychmiastowego, jak i opóźnionego pięciu rodzajów poliuretanowych pianek wiskoelastycznych (z pamięcią kształtu) o różnej gęstości pozornej. Określono również wartości naprężenia ściskającego występującego przy 80% odkształceniu pianek. Badania wykonano w temperaturze: 20, 30, 40, 50 oraz 60°C. Stwierdzono, że badane pianki wykazują różne wartości powrotu poodkształceniowego w porównywalnym czasie, a temperatura badania ma istotny wpływ na wartość powrotu poodkształceniowego, jak i na czas tego powrotu. Wykonane zostały stosowne wykresy oraz wyciągnięto wnioski.

**Słowa kluczowe:** naprężenie ściskające, poliuretanowa pianka, powrót poodkształceniowy, ściskanie.

### ELASTIC RECOVERY OF SHAPE MEMORY POLYURETHANE FOAMS

**Abstract:** The manuscript presents experimental studies of the time and value of elastic recovery, both immediate and delayed, for five types of polyurethane shape memory (viscoelastic) foams of various pour density. The values of compressive strength appearing at 80% foam strain were also determined. The tests were conducted at temperatures: 20, 30, 40, 50 and 60°C. It was concluded that the studied foams have different values of elastic recovery in comparable time and that the test temperature has a significant influence on the value of elastic recovery as well as on the time of the recovery. The appropriate graphs were made and conclusions were drawn.

**Keywords:** compressive strength, polyurethane foam, elastic recovery, compression

### 1. Wstęp

Zainteresowanie polimerami, w których można wywołać zachowanie inteligentne, pojawiło się znacznie później niż w przypadku materiałów metalowych lub ceramicznych. W ostatnim dwudziestolecu zainteresowanie to jednak znacznie wzrosło dzięki obiecującym wynikom badań, wykazujących właściwości inteligentne niektórych polimerów, przydatne w zastosowaniach specjalnych [1]. Inteligentne polimery mogą mieć więcej potencjalnych zastosowań w medycynie i technice. Często są stosowane w systemach kontrolowanego uwalniania leków, membranach i zaworach polimerowych, bioreaktorach, układach do separacji związków oraz otrzymywania sztucznych mięśni i wielu innych [2, 3]. Mają także szerokie zastosowanie w przemyśle lotniczym i samochodowym [4].

Inteligentne materiały polimerowe pod wpływem różnych czynników zmieniają barwę [5, 6, 7], kształt [8, 9, 10] i wielkość [11] oraz właściwości [12, 13], emitują światło [14, 15, 16] reagują na pole magnetyczne [17] oraz mogą inicjować proces polimeryzacji [18].

Do takich materiałów inteligentnych można także zaliczyć poliuretanowe pianki wiskoelastyczne [10], których używa się do poprawy właściwości mebli tapicerowanych

lub materaców, w zakresie komfortu ich użytkowania, gdyż w zależności od wielkości obciążenia i temperatury „dostosowują” one swoje właściwości, stając się bardziej lub mniej podatnymi na odkształcenia. Pianki takie cechuje bardzo mała elastyczność, przy wydłużonym czasie powrotu po zgnieceniu oraz odwrotnie proporcjonalna zależność twardości od temperatury. Otwiera to nowe możliwości w produkcji np. specjalistycznych materaców przeciwoleżynowych oraz innych artykułów, spełniających specyficzne wymagania [19].

Celem przeprowadzonych badań jest doświadczalne określenie wartości i czasu powrotu poodkształceniowego wiskoelastycznych pianek poliuretanowych (z pamięcią kształtu) oraz naprężenia ściskającego w różnej temperaturze przy 80% ich odkształceniu podczas ściskania.

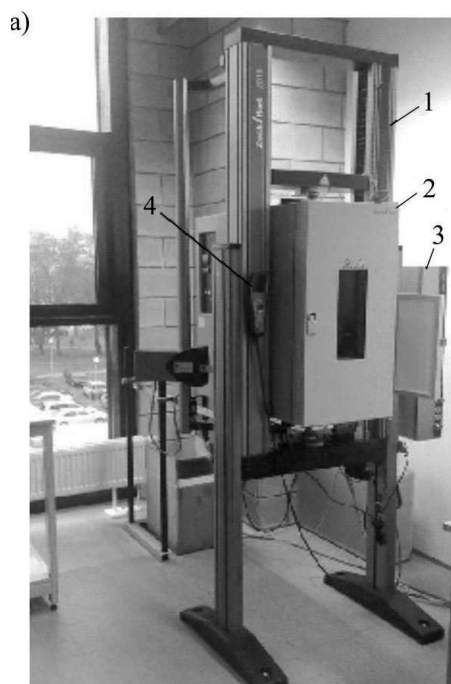
### 2. Materiały wykorzystane do badań

Przedmiot badań stanowiły próbki pianki poliuretanowej wiskoelastycznej o różnej gęstości, której głównym składnikiem jest polioli oraz izocyjanian. Do badań wykorzystano pięć rodzajów pianek o symbolach: VE4510, VE4515, VE5010, VE5015, VE6024. Pianki wyprodukowane zostały przez firmę Vita Baltic International, znajdującą się na Litwie.

Tabela 1. Właściwości pianek wiskoelastycznych według danych producenta

Table 1. Properties of viscoelastic foams according to the manufacturer

Właściwość	VE4510	VE4515	VE5010	VE5015	VE6024	Metoda badań
Gęstość pozorna, kg/m <sup>3</sup>	43 – 50	43 – 47	47 – 55	47,5 – 57,5	49 – 58	ISO 845
Twardość ILD, N	30 – 46	44 – 65	30 – 46	48 – 72	52 – 75	ISO 2439
Odkształcenie trwałe, %	10	10	10	10	10	ISO 1856
Elastyczność, %	15	15	15	15	15	ISO 8307



Rys. 1. Wygląd maszyny wytrzymałościowej Zwick/Roell Z1010; a) widok ogólny, b) przestrzeń robocza: 1 – rama, 2 – komora cieplna, 3 – jednostka sterująca, 4 – pilot sterujący, 5 – uchwyt górny, 6 – uchwyt dolny, 7 – ruchoma belka, 8 – ekran komputera

Fig. 1. Appearance of the testing machine Zwick / Roell Z1010; a) general view, b) workspace: 1 – frame, 2 – heat chamber, 3 – control unit, 4 – remote control, 5 – top grip, 6 – bottom grip, 7 – beam, 8 – the computer screen

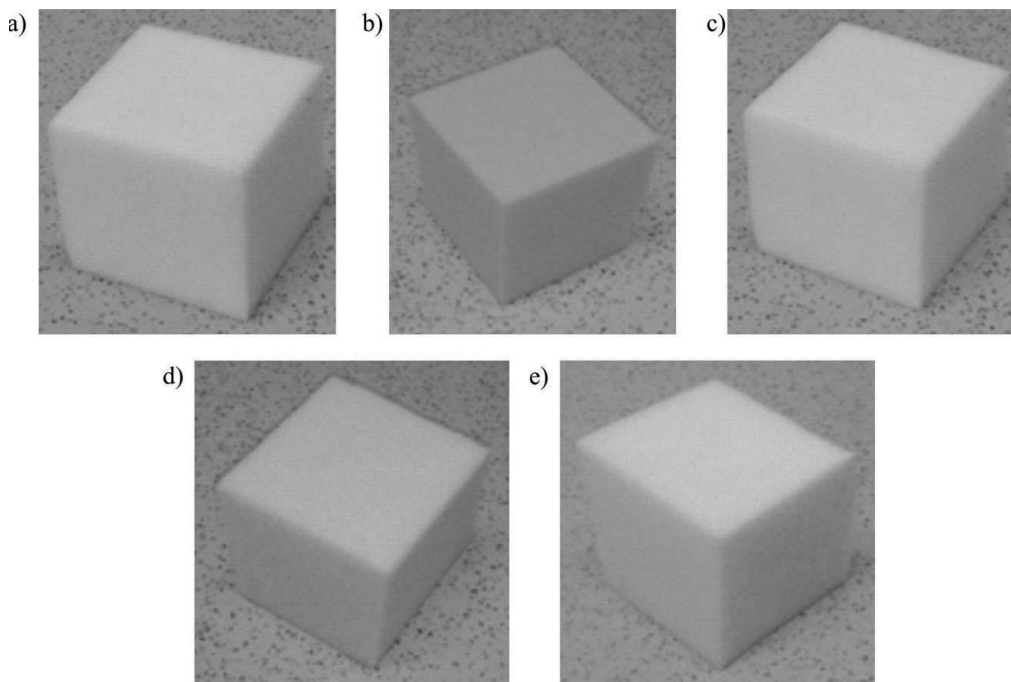
W tabeli 1 przedstawiono podstawowe właściwości badanych pianek wiskoelastycznych według danych producenta.

### 3. Charakterystyka stanowiska badawczego

Badania czasu powrotu poodkształceniowego wybranych pianek poliuretanowych wykonano przy użyciu

maszyny wytrzymałościowej Zwick/Roell Z1010 (rys. 1a i 1b), znajdującej się w Katedrze Przetwórstwa Tworzyw Polimerowych Politechniki Lubelskiej.

Maszyna posiada konstrukcję dwukolumnową. Możliwe są za jej pomocą badania na rozciąganie, ściskanie, zginanie oraz próby tarcia, zaopatrzona jest w głowicę pomiarową 10 kN mogącą poruszać się z prędkością od

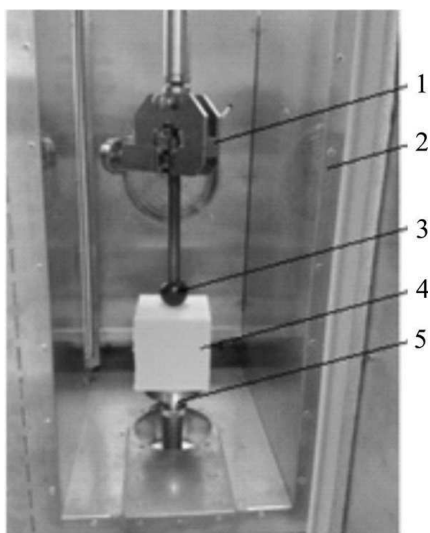


Rys. 2. Próbki pianek poliuretanowych wiskoelastycznych użytych do badań: a) VE5015, b) VE4010, c) VE5010, d) VE6024, e) VE4015  
Fig. 2. Samples of viscoelastic polyurethane foams used in the tests: a) VE5015, b) VE4010, c) VE5010, d) VE6024, e) VE4015

1 do 2000 mm/min., uchwyty śrubowo-klinowe i szczypcowe oraz ekstensjometr video. Dodatkowym wyposażeniem maszyny wytrzymałościowej jest komora cieplna umożliwiająca prowadzenie badań w zakresie temperatury od  $-80^{\circ}\text{C}$  do  $0^{\circ}\text{C}$ .

#### 4. Technika prowadzenia badań

Przed przystąpieniem do wyznaczania cech wytrzymałościowych przy statycznym ściskaniu przygotowano próbki do badań – wycięto je za pomocą ostrego noża z bloku pianki o wymiarach  $1000 \times 300 \times 100$  mm. W efekcie tego próbki miały kształt sześciangu o wymiarach  $100 \times 100 \times 100$  mm (rys. 2). W uchwycie górnym maszyny wytrzymałościowej zamocowano wgłębnik w kształcie kulki o średnicy 20 mm (rys. 3) w taki sposób, aby oś wgłębnika pokrywała się z osią próbki i była zgodna z kierunkiem siły ściskającej, a próbkę z pianki ustawiono na stoliku zamocowanym do uchwytu dolnego maszyny wytrzymałościowej. Następnie nastawiono prędkość badania (ściskania), która wynosi 100 mm/min, zaś wgłębnik ustawiono, tak aby stykał się z górną powierzchnią próbki.



Rys. 3. Zamocowanie wgłębnika i ustawienie próbki: 1 – uchwyt górny, 2 – komora temperaturowa, 3 – wgłębnik, 4 – próbka, 5 – stolik maszyny  
Fig. 3. Fixing the indenter and sample set: 1 – top grip, 2 – heat chamber, 3 – indenter, 4 – sample, 5 – table of machines

Próbki, wraz z uchwytami i wgłębnikiem nagrzewane były w komorze cieplnej w temperaturach:  $20^{\circ}\text{C}$ ,  $30^{\circ}\text{C}$ ,  $40^{\circ}\text{C}$ ,  $50^{\circ}\text{C}$  i  $60^{\circ}\text{C}$  w czasie 60 minut. Po tym czasie wgłębnik był wciskany z ustaloną prędkością w próbkę na głębokość 80 mm (stanowiącej 80% jej wysokości), a po osiągnięciu tej głębokości, był zatrzymywany i po upływie 1 minuty wyciągany z pianki. Po usunięciu wgłębnika wyjmowano piankę z komory cieplnej i przenoszono pod czujnik zegarowy, za pomocą którego, co określony czas, odczytywano wartość powrotu poodkształceniowego badanej próbki, zarówno natychmiastowego, jak

i opóźnionego aż do momentu całkowitego powrotu poodkształceniowego badanej pianki. Przy czym przyjęto, że natychmiastowy powrót poodkształceniowy odbywa się w czasie pierwszych 10 sekund od zdjęcia obciążenia i obejmuje pierwszy pomiar, kolejne pomiary odbywały się co 5 sekund. Wszystkie pomiary wartości powrotu poodkształceniowego odbywały się w osi działania siły ściskającej i w kierunku przeciwnym do kierunku działania siły.

Wykonano także pomiary naprężenia ściskającego przy 80% odkształceniach poliuretanowych pianek wiskoelastycznych.

#### 5. Analiza wyników

Wyniki pomiarów wartości powrotu poodkształceniowego i czasu powrotu poodkształceniowego badanych pianek w temperaturze  $20^{\circ}\text{C}$  przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Wyniki badań czasu i wartości powrotu poodkształceniowego poliuretanowych pianek wiskoelastycznych w temperaturze  $20^{\circ}\text{C}$

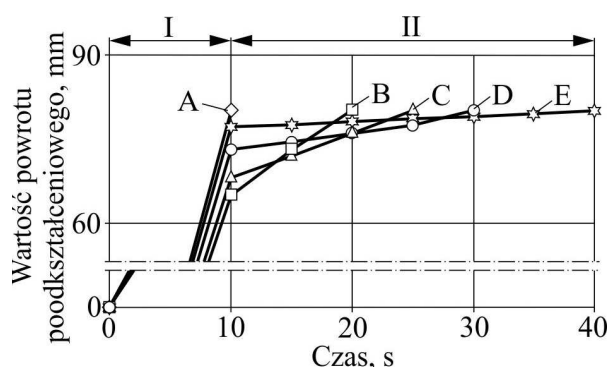
Table 2. Test results of time and strain recovery values viscoelastic polyurethane foams at a temperature of  $20^{\circ}\text{C}$

Czas powrotu poodkształceniowego, s	Wartość powrotu poodkształceniowego pianek, mm				
	VE6024	VE5015	VE5010	VE4515	VE4510
10	80	65	68	73	77
15	-	73	72	74,5	77,5
20	-	80	76	76	78
25	-	-	80	77,5	78,5
30	-	-	-	80	79
35	-	-	-	-	79,5
40	-	-	-	-	80

Dla lepszego zobrazowania otrzymanych wyników przedstawiono je także w postaci graficznej na rysunku 4.

Na wykresie przedstawiającym zależność powrotu poodkształceniowego pięciu rodzajów pianek poliuretanowych wiskoelastycznych od czasu po zdjęciu obciążenia wywołującego odkształcenie można wyróżnić dwa obszary przebiegu wykreślonej krzywej. Pierwszy obszar (I) obejmuje tzw. natychmiastowy powrót poodkształceniowy, który charakteryzuje się bardzo gwałtownym wzrostem wartości powrotu poodkształceniowego w czasie 10s dla każdej pianki. Drugi obszar (II) to opóźniony powrót poodkształceniowy, charakteryzujący się wolniejszym powrotem pianki do pierwotnej wysokości.

Najmniejszą wartość natychmiastowego powrotu poodkształceniowego ma pianka VE5015 i wynosi ona 65mm. Wartość natychmiastowego powrotu jest większa dla pianki VE5010 o 3mm, dla pianki VE4515 o 8mm, dla pianki VE4010 o 12mm, dla pianki VE6024 o 15mm od wartości tego powrotu dla pianki VE5015. Największą wartość opóźnionego powrotu poodkształceniowego ma



Rys. 4. Zależność powrotu poodkształceniowego pianek od czasu po zdjęciu obciążenia: A) pianka VE6024, B) VE5015, C) VE5010, D) VE4515, E) VE4510; I – natychmiastowy powrót poodkształceniowy, II – opóźniony powrót poodkształceniowy

Fig. 4. Relationship of postdeformation return of foam from the unload time: A) the foam VE6024, B) VE5015, C) VE5010, D) VE4515, E) VE4510; I – immediate postdeformation return II – delayed postdeformation return

pianka o największej gęstości pozornej i twardości VE5015 i wynosi ona 15 mm, przy czym czas całkowitego powrotu poodkształceniowy był w tym przypadku najkrótszy i wynosił 20s. Najdłuższym czasem całkowitego powrotu poodkształceniowego, tj. 40s, charakteryzowała się pianka VE4510, a więc pianka o stosunkowo małej gęstości i twardości.

Podjęto również próby pomiaru wartości powrotu poodkształceniowego badanych pianek w czasie po zdjęciu obciążenia w wyższych temperaturach, jednak wraz z ustąpieniem obciążenia i wzrostem temperatury prawie natychmiast następował całkowity powrót poodkształceniowy badanej próbki jeszcze w komorze cieplnej, a więc nie było możliwości wykonania pomiarów natychmiastowego powrotu poodkształceniowego. W związku z tym pomiar opóźnionego powrotu poodkształceniowego nie był miarodajny.

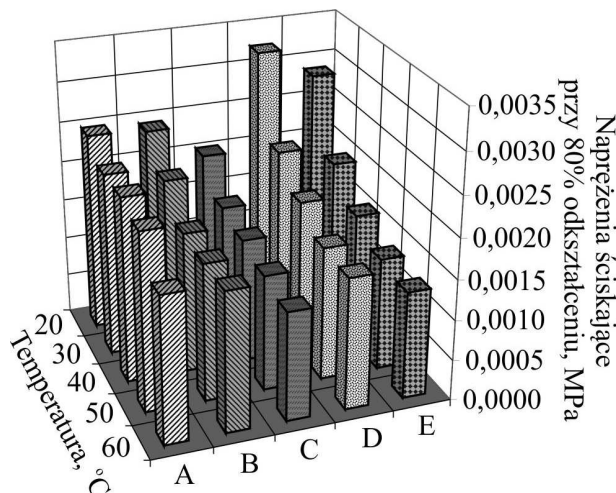
Tabela 3. Wyniki badań naprężenia ściskającego, występującego przy 80% odkształceniu pianek poliuretanowych wiskoelastycznych w różnej temperaturze

Table 3. Results of the compressive stress occurring at 80% strain viscoelastic polyurethane foams at different temperatures

Symbol pianki	Naprężenia ściskające przy 80% odkształceniu w temperaturze, MPa				
	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C
VE6024	0,00248	0,00228	0,00230	0,00221	0,00181
VE5015	0,00244	0,00210	0,00175	0,00171	0,00173
VE5010	0,00203	0,00165	0,00155	0,00144	0,00135
VE4515	0,00324	0,00225	0,00191	0,00166	0,00163
VE4510	0,00287	0,00200	0,00163	0,00140	0,00133

Pomiary naprężeń ściskających przy 80% odkształceniu poliuretanowych pianek wiskoelastycznych o różnej

gęstości i w różnej temperaturze przedstawiono w tabeli 3, natomiast interpretację graficzną otrzymanych wyników na rysunku 5.



Rys. 5. Zależność naprężenia ściskającego przy 80% odkształceniu od temperatury dla pianek: A) VE6024, B) VE5015, C) VE5010, D) VE4515, E) VE4510

Fig. 5. The relationship of compressive stress at 80% strain and the temperature for foam: A) VE6024, B) VE5015, C) VE5010, D) VE4515, E) VE4510

W temperaturze 20°C największe naprężenie ściskające przy 80% odkształceniu posiada pianka VE4515 i wynosi ono 0,00324 MPa, natomiast najmniejsze wykazała pianka VE5010, dla której wyniosło 0,00203 MPa. W temperaturze 30°C największe naprężenie ściskające przy 80% odkształceniu odnotowano dla pianki VE6024, natomiast najmniejsze dla pianki VE5010. Z kolei w 40°C i 50°C, największe i najmniejsze naprężenie ściskające zauważono odpowiednio przy piance VE6024 oraz VE5010, podobnie jak miało to miejsce przy 30°C. Natomiast, w temperaturze 60°C największe naprężenie ściskające przy 80% odkształceniu wykazała, tak jak poprzednio, pianka VE6024 a najmniejsze pianka VE4510. Warto też odnotować, że różnica naprężenia ściskającego przy 80% odkształceniu pomiędzy poszczególnymi rodzajami pianek maleje wraz ze wzrostem temperatury. I tak największa różnica naprężenia w temperaturze 20°C wynosi 0,00121 MPa, natomiast w temperaturze 60°C wynosi już tylko 0,00048 MPa.

Wraz ze wzrostem temperatury pomiaru z 20 do 60°C, zmniejszało się naprężenie ściskające przy 80% odkształceniu pianek. Ilościowo, największe zmniejszenie naprężenia odnotowano dla pianki VE4515 – zmniejszyło się ono o 0,00161 MPa, jakościowo natomiast największe było dla pianki VE4510 i wynosiło prawie 52% wartości początkowej. Najmniejsze zmniejszenie naprężenia, zarówno ilościowo, jak i jakościowo zauważono dla pianki VE6024, wynosiło ono odpowiednio 0,00067 MPa i 27% wartości początkowej.

## 6. Wnioski

Po przeprowadzonych badaniach zaobserwowano, że wraz ze wzrostem temperatury w poszczególnych próbkach maleją naprężenia przy 80% odkształceniu, co oznacza, że przy wyższej temperaturze do odkształcenia badanych pianek potrzebna jest coraz mniejsza siła. W temperaturze 20°C naprężenia te są największe i wynoszą 0,00324 MPa dla pianki o symbolu VE4515. Najmniejsze zaś miały miejsce w temperaturze 60°C w piance o symbolu VE4510 (0,00133 MPa). Można również zauważyć, że w piankach o najmniejszej gęstości (VE4510 i VE4515) wystąpiły największe różnice pomiędzy naprężeniami, które występowały w próbkach w poszczególnych temperaturach.

Najdłuższy czas powrotu poodkształceniowego – 40s – ma próbka o najmniejszej gęstości, czyli pianka VE4510, zaś najkrótszy czas ma pianka VE6024 o gęstości znacznie większej. Wynika z tego, że w przypadku poliuretanowych pianek najlepszą pamięć kształtu ma pianka o najmniejszej gęstości i twardości.

Zauważono, też, że zapamiętywanie kształtu badanych próbek jest tym lepsze im niższa jest temperatura, w wyższych temperaturach próbki tracą pamięć kształtu (w badanym zakresie zmiany temperatury).

Najszybszy całkowity powrót poodkształceniowy ma pianka VE6024 (duża gęstość i twardość), ponieważ powrót pianki do swojego kształtu przed odkształceniem trwa 10s. Najwolniejszy powrót poodkształceniowy wykazuje pianka VE4510 (najmniejsza gęstość i twardość) i wynosi on 40s.

Podczas badania wyodrębniono natychmiastowy powrót poodkształceniowy, którego czas dla każdej próbki był taki sam i wynosił 10s oraz opóźniony powrót poodkształceniowy, który był różny w czasie dla każdej z badanych pianek. Najszybszy natychmiastowy powrót poodkształceniowy ma pianka VE6024. Najmniejszą wartość natychmiastowego powrotu poodkształceniowego odnotowano dla pianki VE5015.

## Literatura

1. Boczkowska A.: Inteligentne polimery i kompozyty polimerowe, *Inżynieria Materiałowa* 2004, 2, 72-75.
2. <http://www.ska-polska.pl/pl/projekty/pamiec-kszaltu> [dostęp 20 października 2015].
3. <http://bloglenovo.pl/oto-hit-przyszlosci-samonaprawiajacy-sie-polimer/> [dostęp 20 października 2015].
4. <http://www.matint.pl/index.php> [dostęp 20 października 2015].
5. <http://www.matint.pl/materialy-fotochromowe.php> [dostęp 20 października 2015].
6. <http://www.matint.pl/materialy-termochromowe.php> [dostęp 20 października 2015].
7. <http://www.matint.pl/materialy-elektrochromowe.php> [dostęp 20 października 2015].
8. <http://www.matint.pl/materialy-elektrostrykcyjne.php> [dostęp 20 października 2015].
9. Ukielski R., Sobecki P.: Inteligentne polimery z termicznym efektem pamięci kształtu, *Polimery* 2008, 11-12, 793-797.
10. Kang S. M., Lee S. J., Kim B. K.: Shape memory polyurethane foams. *eXPRESS Polymer Letters* 2012, 6, 1, 63-69.
11. <http://www.matint.pl/zele-polimerowe.php> [dostęp 20 października 2015].
12. Tobushi H., Okumura K., Endo M., Hayashi S.: Thermomechanical properties of polyurethane-shape memory polymer foam. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 2001, 12, 283-287.
13. Madbouly S. A., Lendlein A.: Shape-memory polymer composites. *Advanced in Polymer Science* 2010, 226, 41-95.
14. <http://www.matint.pl/materialy-elektroluminescencyjne.php> [dostęp 20 października 2015].
15. <http://www.elektroonline.pl/a/6097,Struktury-elektroluminescencyjne-i-wybrane-przyklady-ich-zastosowan,Technika-swietlna> [dostęp 20 października 2015].
16. Stolarzewicz A., Swinarew A., Piekarnik B., *Polimerowe materiały fotoluminescencyjne oraz sposób ich otrzymywania*, Uniwersytet Śląski w Katowicach, Katowice 2008, 1-2.
17. Boczkowska A., Awietjan S.: Inteligentne kompozyty magnetoelastyczne, *Polimery* 2013, 6, 443-448.
18. <http://www.matint.pl/materialy-samonaprawiajace.php> [dostęp 20 października 2015].
19. Ratna D., Karger-Kocsis J.: Recent advances in shape memory polymers and composites: A review. *Journal of Materials Science* 2008, 43, 254-269.

Data przyjęcia publikacji do druku: 07-01-2016.