

Maria STASZCZAK<sup>1</sup>, Elżbieta A. PIECZYSKA<sup>1</sup>, Michał MAJ<sup>1</sup>, Leszek URBAŃSKI<sup>1</sup>, Hisaaki TOBUSHI<sup>2</sup>, Shunichi HAYASHI<sup>3</sup>

<sup>1</sup> INSTYTUT PODSTAWOWYCH PROBLEMÓW TECHNIKI PAN, Pawińskiego 5B, 02-106 Warszawa

<sup>2</sup> AICHI INSTITUTE OF TECHNOLOGY, 1247 Yachigusa, Yakusa Cho, Toyota City, Aichi Prefecture 470-0392, Japan

<sup>3</sup> SMP TECHNOLOGIES Inc., Ebisu First Place1-22-8, Ebisu, Shibuya-Ku, Tokyo 150-0013, Japan

## Właściwości mechaniczne oraz zmiany temperatury polimeru z pamięcią kształtu w procesie rozciągania

Mgr inż. Maria STASZCZAK

Absolwentka Wydziału Metalurgicznego Uralskiego Uniwersytetu Federalnego im. Pierwszego Prezydenta Rosji B.N. Jelcyna w Jekaterinburgu (2011). Od 2011 r. mieszka i pracuje w Warszawie, od grudnia 2012 r. w Instytucie Podstawowych Problemów Techniki PAN. Zajmuje się badaniem właściwości termomechanicznych nowoczesnych materiałów wielofunkcyjnych, w szczególności stopu TiNi oraz polimeru z pamięcią kształtu.



e-mail: mstasz@ippt.gov.pl

### Streszczenie

W pracy zawarto opis podstawowych właściwości, przykłady zastosowań oraz wyniki badań efektów sprzężeń termomechanicznych poliuretanu z pamięcią kształtu w procesie rozciągania. Otrzymane charakterystyki mechaniczne i temperaturowe wskazują na dużą wrażliwość tego polimeru na prędkość deformacji. Wykorzystując efekt termosprężysty wyznaczono granice odwracalnego odkształcenia (plastyczności) dla różnych prędkości odkształcania. Pokazano, że metoda bazująca na minimum temperatury próbki pozwala na wyznaczenie granicy plastyczności z dużą dokładnością, w tym materiałów wykazujących nieliniową sprężystość.

**Słowa kluczowe:** poliuretan z pamięcią kształtu, sprzężenia termomechaniczne, próba rozciągania, kamera termograficzna.

### Mechanical properties and temperature changes of shape memory polymer subjected to tension test

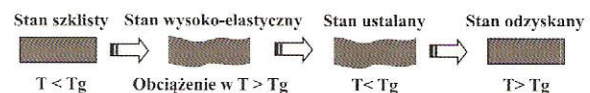
#### Abstract

Mechanical properties and temperature changes of a new multifunctional material - polyurethane shape memory polymer (PU-SMP) subjected to tension at room temperature with various strain rates are presented (Figs. 1-3), [1, 2]. The stress and strain data were recorded by an MTS 858 testing machine. The temperature changes were measured by a fast and sensitive infrared camera ThermoCam Phoenix<sup>TM</sup>. Basing on the obtained mechanical and corresponding temperature data, experimental effects of thermomechanical couplings occurring in the SMP during loading were studied (Figs. 4-7). The stress and temperature changes vs. strain obtained for tension with strain rates  $2 \times 10^{-1} s^{-1}$  and  $2 \times 10^0 s^{-1}$  until the sample rupture show that the SMP exhibits a hardening-like behavior and its elongation limit is over 180 % in case of the true strains (Figs. 4, 5). The higher strain rate, the higher temperature changes were recorded, since the mechanisms of deformation occurred very fast and the process was more close to adiabatic conditions. The significant temperature changes, accompanying the SMP loading with higher strain rate, influence the SMP mechanical behavior. Namely, a maximum of the stress value was recorded at the advanced loading stage, followed by its drop and increase preceding the sample rupture (Fig. 5). The initial reversible tension of any solids is accompanied by a temperature decrease, called thermoelastic effect, whereas the following plastic deformation is always related to energy dissipation and increase in the sample temperature [3-5]. Thus, the maximum drop in temperature of the sample subjected to tension indicates a limit of the reversible material deformation. The higher strain rate, the higher drops in temperature for the SMP were recorded and the larger values of the yield point for the polymer were obtained (Figs. 6, 7), [9, 10].

**Keywords:** polyurethane shape memory polymer, thermomechanical couplings, tension test, infrared camera.

### 1. Opis podstawowych właściwości oraz zastosowań polimerów z pamięcią kształtu

Polimery z pamięcią kształtu, podobnie jak niektóre stopy metali wykazują efekt pamięci kształtu i zaliczane są do grupy tzw. materiałów inteligentnych. Mechanizm wykazywania pamięci kształtu w polimerach jest zdecydowanie inny niż w przypadku stopów metali, ponieważ nie występuje w nich krystalograficzna przemiana fazowa. Wykorzystuje się natomiast różnicę właściwości termomechanicznych poniżej i powyżej charakterystycznej temperatury polimerów, tzw. temperatury zeszklenia. Temperatura zeszklenia  $T_g$  (glass transition temperature) stanowi temperaturę przejścia podczas chłodzenia ze stanu wysoko-elastycznego w stan szklisty, w zakresie której polimer radykalnie zmienia swe własności, m.in. twardość, wartość modułu sprężystości, pojemności cieplnej oraz współczynnika rozszerzalności cieplnej. Polimery z pamięcią kształtu posiadają więc możliwość szybkiej zmiany właściwości fizycznych w zależności od temperatury; stają się miękkie po podgrzaniu powyżej temperatury  $T_g$  i łatwo pozwalają się formować. Podczas schłodzenia poniżej  $T_g$  odzyskują poprzednią sztywność i twardość. Nadal pamiętają swój oryginalny kształt i odzyskują go podczas ponownego podgrzania powyżej temperatury zeszklenia (rys. 1).



Rys. 1. Schemat ideowy ilustrujący efekt pamięci kształtu w polimerach  
Fig. 1. Schematic of shape memory effect in polymers

Specjalne technologie umożliwiają otrzymanie polimeru z pamięcią kształtu o określonych własnościach fizycznych, wykazywanych w różnych temperaturach otoczenia. Jedną z ich istotnych zalet jest duży zakres odwracalnego odkształcenia, 20-krotnie wyższy niż dla stopów metali. Poważną niedogodność stanowi zazwyczaj niewielka wartość przenoszonego naprężenia, poniżej 1% zakresu uzyskiwanego dla stopów z pamięcią kształtu. Natomiast poliuretan, w szczególności produkowane przez Mitsubishi Heavy Industry, Diaplex czy SMP Technologies Inc., wykazują również dość dobre parametry wytrzymałościowe.

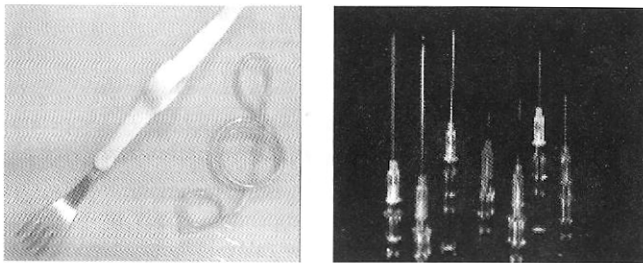
Właściwości poliuretanu z pamięcią kształtu wynikają z jego struktury. Poliuretan utworzony jest ze splecionych długich liniowych łańcuchów składających się z dwóch rodzajów alternatywnie połączonych segmentów. Jeden rodzaj to gładkie, giętkie, podatne, elastyczne łańcuchy (e.g. diisocyanate-coupled polyester/polyether). Drugi rodzaj stanowią elementy sprężyste i twarde (e.g. diurethane bridges resulting from reaction of a diisocyanate with a small-molecule glycol chain extender) [1]. Poprzez odpowiedni dobór udziału miękkich i twardych cząstek można wpływać na właściwości sprężyste, krystalizację, zakres temperatury zeszklenia i topnienia poliuretanu. W temperaturze poniżej temperatury zeszklenia poliuretan z pamięcią kształtu posiada budowę zwartą; sztywne cząsteczki połączone są również sztywnymi więzami, co determinuje wysoki moduł sprężystości i niewielką podatność na odkształcenia. W okolicy  $T_g$  sztywne cząsteczki pozostają, ale łączące je więzy stają się miękkie. Wówczas możliwe stają się swobodne ruchy cząsteczek o charakterze ruchów Browna. Natomiast w jeszcze wyższej temperaturze, w okolicy temperatury topnienia, następuje całkowite zerwanie

więzów i zachowanie polimeru podlega prawom ciecicy, w której ruchy Browna odgrywają zasadniczą rolę. Ponieważ warunki przemieszczania się cząsteczek polimeru są odmienne powyżej i poniżej temperatury  $T_g$ , również właściwości mechaniczne polimerów zdecydowanie różnią się powyżej i poniżej tej temperatury. Dzięki różnicom tych właściwości możliwe jest ustalenieżądanego kształtu w temperaturze powyżej  $T_g$ , utrwalenie go w temperaturze niższej, a następnie odzyskanie poprzedniego kształtu w temperaturze powyżej  $T_g$ , co umożliwia różnorodne praktyczne zastosowania poliuretanów z pamięcią kształtu [1, 2].

I tak właściwość odzyskania poprzednio ustalonego kształtu stosowana jest m.in. w przemyśle lotniczym i kosmicznym, np. do produkcji wkrętów o zmieniającym się kształcie gwintu pod wpływem zmiany temperatury, co umożliwia skomplikowany montaż.

Możliwość dopasowywania kształtu w zależności od zmiany temperatury zewnętrznej stosowana jest przy produkcji automatycznych mechanizmów okien szklarni, rolet, żaluzji.

Właściwość dokładnego dopasowywania kształtu w określonej temperaturze wykorzystywana jest przy produkcji uchwytów sztućców i narzędzi, przeznaczonych dla osób pozbawionych własności chwytowych palców (rys. 2).



Rys. 2. Przykłady zastosowania polimerów z pamięcią kształtu w przemyśle medycznym: uchwyt widelca oraz strzykawki, których igły stają się miękkie; SMP Technologies Inc.

Fig. 2. Examples of shape memory polymer applications in medical industry: fork for handicapped people and injection needle - soft at body temperature; SMP Technologies Inc.

Wysoka wartość energii dysypowanej stosowana jest w konstrukcjach mechanicznych przy produkcji materiałów izolujących, tłumiących oraz odpowiedzialnych opakowań.

Właściwość znacznego magazynowania energii odkształcenia wykorzystywana jest w przemyśle motoryzacyjnym oraz w systemach zabezpieczeń przed skutkami trzęsien ziemi.

Dobre własności izolujące i zabezpieczające przed wilgocią polimerów z pamięcią kształtu, zmienne w zależności od temperatury, stosowane są przy produkcji oddychającej odzieży sportowej oraz systemów kontrolujących wilgotność i cyrkulację powietrza przy zabezpieczaniu żywności.

## 2. Badania sprzężeń termomechanicznych poliuretanu z pamięcią kształtu w procesie rozciągania z różnymi prędkościami odkształcania

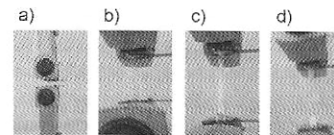
Stosowanie polimerów z pamięcią kształtu w nowych rozwiązaniach technicznych wymaga wyznaczenia parametrów zdolności odzyskiwania kształtu (*shape recovery*), dopasowania kształtu (*shape fixity*), a także zbadania ich właściwości w różnych warunkach pracy [1, 2]. Ponieważ temperatura topnienia polimerów jest stosunkowo niska, istotnym kierunkiem badań jest wyznaczenie efektów sprzężeń termomechanicznych, tj. wzajemnych oddziaływań pól naprężeń i pól temperatury [6, 7, 9].

W związku z tym celem tej pracy jest zbadanie parametrów mechanicznych poliuretanu z pamięcią kształtu, pomiar związanych z jego odkształcaniem zmian temperatury oraz zastosowanie spadku temperatury na początku obciążania do wyznaczenia granicy plastyczności.

Badaniom poddano poliuretan z pamięcią kształtu, oznaczony MM 2520, produkcji *SMP Technologies Inc. Tokyo*, grubości 1 mm i temperaturze zeszklenia 19 °C. Proces rozciągania przeprowadzono w temperaturze pokojowej (~22 °C) na maszynie wytrzymałościowej *MTS 858* z napędem hydraulicznym. Temperaturę próbki mierzono za pomocą szybkiej (624 Hz) i czułej (0,025 K) kamery termograficznej *Phoenix*. Próbkę wycinano specjalnie zaprojektowanym urządzeniem; miały one postać pasków o przekroju 10 mm x 1mm. Długość części roboczej próbek była dobierana w zależności od programu badań.

### 2.1. Analiza charakterystyk mechanicznych i zmian temperatury poliuretanu z pamięcią kształtu dla różnych prędkości odkształcania w próbach do zerwania

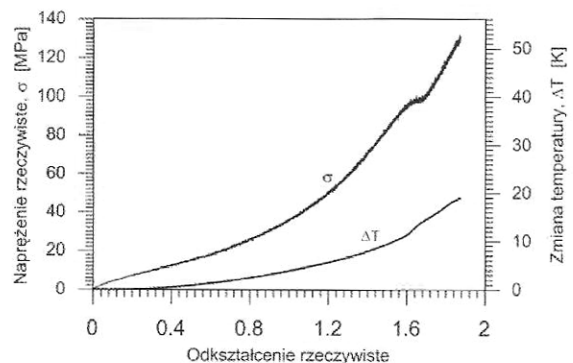
Proces rozciągania próbek poliuretanu z pamięcią kształtu do zerwania przeprowadzono dla różnych prędkości odkształcania: od  $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  do  $1 \times 10^1 \text{ s}^{-1}$ . Ze względu na uzyskiwane duże wartości odkształcenia, około 180 % odkształcenia rzeczywistego, w próbach do zerwania ustalono bazę pomiarową równą 15 mm. Fotografując kolejne etapy procesu rozciągania, przedstawiono na rys. 3: a) obraz próbki przed obciążeniem, b) w trakcie procesu, c) podczas zaawansowanego rozciągania z zarejestrowanym bieleciem polimeru, d) na etapie zerwania.



Rys. 3. Fotografia próbki PU-SMP w uchwytach maszyny wytrzymałościowej: a) przed obciążeniem, b) w trakcie procesu, c) etap zaawansowanego rozciągania, d) zerwanie próbki

Fig. 3. Photograph of the PU-SMP sample in grips of a testing machine: a) before tension, b) during loading, c) at stage of advanced tension (SMP whitening), d) sample rupture

Na rysunkach 4, 5 przedstawiono zależności naprężenia oraz zmian temperatury w zależności od odkształcenia. Obliczono tzw. rzeczywiste wartości naprężenia i odkształcenia, tj. odniesione do aktualnego przekroju próbki.

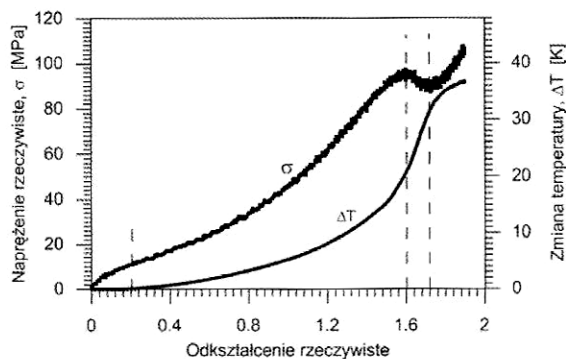


Rys. 4. Naprężenie rzeczywiste  $\sigma$  oraz zmiany temperatury  $\Delta T$  w funkcji odkształcenia rzeczywistego dla PU-SMP podczas rozciągania z prędkością  $2 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$  do zerwania próbki

Fig. 4. True stress vs. true strain obtained for the PU-SMP during tension test performed with strain rate  $2 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$

Otrzymane zależności naprężenia od odkształcenia dla niższych prędkości odkształcania, np.  $10^{-4} \text{ s}^{-1}$  i  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$  mają gładki przebieg z łagodnym „umocnieniem” podczas odkształcania, wynikającym z reorientacji łańcuchów polimerowych. Dla tak niskich prędkości zmiany temperatury próbek SMP okazały się niewielkie, ponieważ ciepło wytworzone w wyniku sprzężeń termomechanicznych było

natychmiast rozpraszane w otoczeniu, głównie przez uchwyt maszyny. Natomiast dla wyższej prędkości odkształcania  $2 \times 10^{-1} \text{s}^{-1}$  stwierdzono silne umocnienie, wzrost naprężenia do 130 MPa oraz przyrost temperatury o 19 K, zarejestrowany na etapie zerwania próbki (rys. 4). Ponadto, dla tej prędkości na zaawansowanym etapie obciążania (około 1,6 rzeczywistego odkształcenia) pojawia się na krzywej mechanicznej charakterystyczny spadek naprężenia. Prawdopodobnie wynika to ze zmiany mechanizmów odkształcania, związanej ze zmianą struktury materiału. Wydaje się, że zwiększa się udział mechanizmów o charakterze dyssypacyjnym, o czym świadczy towarzyszący spadkowi naprężenia nagły wzrost temperatury próbki.



Rys. 5. Naprężenie rzeczywiste  $\sigma$  oraz zmiany temperatury  $\Delta T$  w funkcji odkształcenia rzeczywistego dla PU-SMP podczas rozciągania z prędkością  $2 \times 10^0 \text{s}^{-1}$  do zerwania próbki

Fig. 5. Stress  $\sigma$  and temperature change  $\Delta T$  of the PU-SMP sample obtained during tension with strain rate  $2 \times 10^0 \text{s}^{-1}$  till rupture

Dla 10-krotnie wyższej prędkości odkształcania  $2 \times 10^0 \text{s}^{-1}$  zaobserwowano przyrost temperatury o 36 K w chwili zerwania próbki (rys. 5). Tak znaczący wzrost temperatury wpływa na zmianę profilu charakterystyki mechanicznej - występuje maksimum naprężenia, spadek a następnie jego ponowny silny wzrost do 130 MPa, poprzedzający zerwanie próbki. Na etapie pojawiania się maksimum oraz spadku naprężenia zaobserwowano bardzo silny wzrost temperatury próbki, który ulega zahamowaniu tuż przed jej zerwaniem.

Otrzymane charakterystyki naprężenia oraz zmiany temperatury próbki w funkcji odkształcenia pozwalają podzielić proces odkształcania na cztery etapy. Etap I odwracalnego odkształcenia próbki, kiedy nie występuje wzrost, natomiast rejestruje się niewielki spadek temperatury (efekt termosprężysty). Etap II, związany ze wzrostem naprężenia oraz wzrostem temperatury próbki. Pod koniec tego etapu występuje znaczne umocnienie oraz "zbieżenie" próbki, co związane jest z powstawaniem pustek w objętości polimeru. Następnie etap III, kiedy naprężenie spada a temperatura próbki znacząco wzrasta, co związane jest z dalszą modyfikacją struktury - rozwoju pustek w materiale. Następnie etap IV, silnego wzrostu naprężenia i temperatury, poprzedzających zerwanie próbki. Im wyższa prędkość odkształcania, tym maksimum naprężenia obserwowane jest dla niższej wartości odkształcenia, ponadto jest wyraźniejsze oraz występuje w szerszym zakresie odkształcenia. Świadczy to o silnym działaniu sprzężeń termomechanicznych w tym materiale. Dla wyższych prędkości stan termodynamiczny, w którym zmieniają się mechanizmy odkształcania, pojawia się wcześniej.

## 2.2. Podstawy teoretyczne sprzężeń termomechanicznych w ciałach stałych

Sprzężenia termomechaniczne, których efekty często obserwowane są w przyrodzie, mają długą historię zarówno w zakresie prac doświadczalnych jak również teoretycznych. Były one

przedmiotem badań Kelvina [3], W. Nowackiego [4] oraz innych badaczy.

Efekty sprzężeń termomechanicznych towarzyszące początkowej, odwracalnej deformacji ciała stałego związane są ze zmianą naprężenia lub objętości:

$$\pm \Delta p \rightarrow \pm \Delta T \text{ lub } \pm \Delta V \rightarrow \pm \Delta T, \quad (1)$$

gdzie:  $p$  oznacza ciśnienie,  $V$  objętość, a  $T$  - temperaturę ciała w skali bezwzględnej.

W zależności od rodzaju odkształcania (rozciąganie, ściskanie, ścinanie, skręcanie), zmiany temperatury ciała stałego w zakresie sprężystym, zwane efektem piezokalorycznym lub termosprężystym, mogą być ujemne, dodatnie lub zerowe. Przyjmują zazwyczaj niewielkie wartości [5, 10]. Natomiast dla większych obciążeń, na skutek procesów dyssypacyjnych towarzyszącym odkształceniom plastycznym lub zachodzącym przemianom fazowym, wzrost temperatury ciała związany z odkształcaniem jest zwykle znaczący [6-8].

W przypadku rozciągania (ściskania) zmiany temperatury w początkowym zakresie odwracalnego odkształcania w warunkach adiabatycznych określa tzw. zależność Kelvina [3]:

$$\Delta T_{el} = - \frac{\alpha T \Delta \sigma_s}{c_p \rho}, \quad (2)$$

gdzie:  $\alpha$  - współczynnik rozszerzalności termicznej,  $T$  - temperatura w skali bezwzględnej,  $\Delta \sigma_s$  - zmiana naprężenia,  $c_p$  - ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu,  $\rho$  - gęstość materiału.

Ponieważ zazwyczaj  $\alpha > 0$ , temperatura spada na początku sprężystego rozciągania, a wzrasta w zakresie sprężystego ściskania. Otrzymane zmiany temperatury są niewielkie i dla metali w zakresie początkowej, odwracalnej deformacji nie przekraczają 0,2 K, aczkolwiek wzrastają wraz z umocnieniem materiału [5]. Zdecydowanie wyższe wartości, dochodzące do 2 K, osiągnęte są natomiast przez polimery [6, 7, 9]. W tym przypadku efekt ten wynika ze spadku entropii układu, co związane jest z porządkowaniem struktury łańcuchów polimerowych w początkowym zakresie obciążania próbki [1]. Dla większych obciążeń odkształceni towarzyszą procesy dyssypacyjne i temperatura polimeru wzrasta [6, 7].

Maksimum spadku temperatury może być wykorzystane do wyznaczania z dużą dokładnością granicy plastyczności badanego materiału [10]. Takie kryterium granicy plastyczności jest bardziej zasadne w przypadku materiałów polimerowych, wykazujących nieliniową sprężystość, od stosowanego dla materiałów o liniowej sprężystości, np. metali, punktu rozbieżności zmian temperatury w funkcji naprężenia od przebiegu liniowego [5].

## 2.3. Wyznaczenie granicy plastyczności poliuretanu z pamięcią kształtu dla różnych prędkości odkształcania na podstawie badań efektu termosprężystego

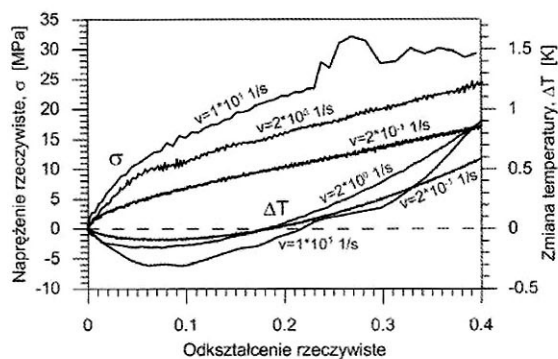
Próbki poliuretanu z pamięcią kształtu (PU-SMP) rozciągano na maszynie wytrzymałościowej z różnymi prędkościami w początkowym zakresie odkształcania, do wartości rzeczywistej odkształcenia równej 0,4. Kamerą termograficzną wyznaczano zmiany temperatury próbek podczas ich obciążania.

Zależność zmian naprężenia oraz temperatury od odkształcenia w początkowym zakresie odkształcania SMP z prędkościami  $2 \times 10^{-1} \text{s}^{-1}$ ,  $2 \times 10^0 \text{s}^{-1}$  oraz  $1 \times 10^1 \text{s}^{-1}$  przedstawiono na rys. 6.

Poliuretan z pamięcią kształtu jest bardzo wrażliwy na prędkość odkształcania. Dla wyższych prędkości uzyskano wyższy poziom naprężenia oraz wyższe zmiany temperatury.

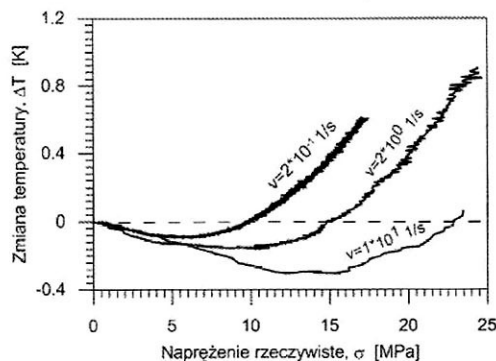
W początkowym zakresie rozciągania zarejestrowano spadek temperatury, związany z odkształcaniem sprężystym, a następnie wzrost temperatury, związany z procesami dysypacyjnymi, zachodzącymi w materiale próbki (rys. 6).

Naprężenie odpowiadające minimum temperatury próbki przyjęto jako granicę plastyczności materiału [10]. Przeprowadzone badania wykazały, że wyznaczone tą metodą wartości granicy plastyczności odpowiadają wyznaczonym metodą wielokrotnego obciążania i odciążania, aczkolwiek materiał ten wykazuje bardzo silną nieliniowość (rys. 6, 7).



Rys. 6. Zależność naprężenia  $\sigma$  oraz zmiany temperatury  $\Delta T$  od odkształcenia w początkowym zakresie rozciągania PU-SMP z prędkościami  $2 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ ,  $2 \times 10^0 \text{ s}^{-1}$  oraz  $1 \times 10^1 \text{ s}^{-1}$ .

Fig. 6. Stress  $\sigma$  and temperature change  $\Delta T$  vs. strain for the PU-SMP initial tension with strain rates:  $2 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ ,  $2 \times 10^0 \text{ s}^{-1}$  and  $1 \times 10^1 \text{ s}^{-1}$ .



Rys. 7. Zależność zmiany temperatury  $\Delta T$  w funkcji naprężenia  $\sigma$  w początkowym zakresie rozciągania PU-SMP z prędkościami  $2 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ ,  $2 \times 10^0 \text{ s}^{-1}$  oraz  $1 \times 10^1 \text{ s}^{-1}$ .

Fig. 7. Temperature change  $\Delta T$  vs. stress  $\sigma$  obtained for the PU-SMP initial tension with strain rates:  $2 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ ,  $2 \times 10^0 \text{ s}^{-1}$  and  $1 \times 10^1 \text{ s}^{-1}$ .

Tab. 1. Wartości maksymalnych spadków temperatury  $\Delta T$  oraz granicy plastyczności  $\sigma_{\text{odwr}}$  (odwrotnego odkształcenia) dla różnych prędkości odkształcania PU-SMP

Tab. 1. Maximal drops in temperature and estimated yield point values for various strain rates

Prędkość odkształcania	$2 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$	$2 \times 10^0 \text{ s}^{-1}$	$1 \times 10^1 \text{ s}^{-1}$
$\Delta T_{\text{max}}$ [K]	-0,12	-0,20	-0,32
$\sigma_{\text{odwr}}$ [MPa]	4,8	9,5	14,5

Jak wynika z otrzymanych wyników, wartości maksymalnych spadków temperatury, związane z granicą plastyczności wzrastają

dla wyższych prędkości odkształcania - odpowiednio od 0,12 K dla  $2 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$  do 0,35 K dla  $1 \times 10^1 \text{ s}^{-1}$  (rys. 6, 7) (tab. 1).

Wartości naprężenia, odpowiadające maksymalnym spadkom temperatury i wyznaczającym granicę plastyczności, również wzrastają dla wyższych prędkości odkształcania, odpowiednio od 4,8 MPa dla  $2 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$  do 14,5 MPa dla  $1 \times 10^1 \text{ s}^{-1}$  (tab. 1).

### 3. Podsumowanie

Przeprowadzone badania sprzężeń termomechanicznych poliuretanu z pamięcią kształtu PU-SMP 2520 w procesie rozciągania potwierdziły jego dobre parametry mechaniczne, duży zakres odkształcania oraz wysoką wrażliwość na prędkość deformacji.

Im wyższa prędkość odkształcania, tym otrzymane zmiany naprężenia i temperatury są wyższe, ponieważ w materiale tym działają silne sprzężenia termomechaniczne, a dla wysokich prędkości procesy odkształcania zachodzą dynamicznie, a warunki pomiaru zbliżają się do adiabatycznych.

Pomiar temperatury próbki podczas obciążania pozwala na wyznaczenie granicy plastyczności z dużą dokładnością, również materiałów wykazujących nieliniową sprężystość, np. polimerów, w tym polimerów z pamięcią kształtu.

Wartość granicy plastyczności poliuretanu z pamięcią kształtu, wyznaczona na podstawie maksymalnych spadków temperatury, wzrasta dla wyższych prędkości odkształcania.

*Projekt został sfinansowany ze środków Narodowego Centrum Nauki przyznanych na podstawie decyzji numer DEC-2011/01/M/ST8/07754.*

### 4. Literatura

- [1] Huang W.M., Young B. and Fu Y.Q.: Polyurethane Shape Memory Polymers, CRC Press Taylor & Francis Group, 2012.
- [2] Tobushi H., Pieczyska E.A., Ejiri Y., Sakuragi T.: Thermomechanical Properties of Shape Memory Alloy and Polymer and their Composite. Mech. Advanced Mater. Struct., 2009, 16, 236-247.
- [3] Thomson W. (Lord Kelvin): On the thermoelastic and thermomagnetic properties of matter. Transactions of the Royal Society of Edinburgh; 20 (161): 57-77, 1853.
- [4] Nowacki W.: Teoria sprężystości - PWN, Warszawa, 1970.
- [5] Pieczyska E.A.: Thermoelastic effect in austenitic steel referred to its hardening. J. Theor. Appl. Mech., 2, 37, 1999; (Ph. D thesis).
- [6] Pieczyska E.A., Gadaj S.P., Nowacki W.K.: Thermoelastic and thermoplastic effects investigated in steel, polyamide and shape memory alloys; Proc. of SPIE, Thermosense XXIV, 1-4 April 2002, Orlando, USA, vol. 4710, 479-497, 2002.
- [7] Pieczyska E.A., Gadaj S.P., Nowacki W.K.: Temperature changes in polyamide subjected to tensile deformation, Infrared Physics and Technology, Vol. 43/3-5, 183-186, 2002.
- [8] Pieczyska E.A.: Termomechaniczne aspekty przemiany fazowej w stopie TiNi z pamięcią kształtu indukowanej naprężeniem, Pomiary Automatyka Kontrola, 55, 958-961; 9, 2009.
- [9] Pieczyska E.A., Nowacki W.K., Tobushi H., Hayashi S.: Thermomechanical properties of shape memory polymer subjected to tension in various conditions, QIRT Journal, Vol. 6 189 - 205, 2010.
- [10] Oliferuk W., Maj M., Litwinko R., Urbański L.: Thermomechanical coupling in the elastic regime and elasto-plastic transition during tension of austenitic steel, titanium and aluminium alloy at strain rates from 10<sup>-4</sup> to 10<sup>-1</sup> s<sup>-1</sup>, European Journal of Mechanics A-Solids, 35, 111-118, 2012.

otrzymano / received: 24.06.2013

przyjęto do druku / accepted: 01.08.2013

artykuł recenzowany / revised paper