

Elżbieta PIECZYSKA

INSTYTUT PODSTAWOWYCH PROBLEMÓW TECHNIKI PAN

Termomechaniczne aspekty przemiany fazowej w stopie TiNi z pamięcią kształtu indukowanej naprężeniem

Dr inż. Elżbieta PIECZYSKA

Zajmuje się badaniem sprzężeń termomechanicznych materiałów wielofunkcyjnych dla różnych obciążeń i prędkości odkształcenia. Pracę doktorską Wpływ umocnienia materiału na efekt termosprężysty stali austenitycznej opublikowała w *J. Theor. Appl. Mech.*, 2, 37, 1999. Opublikowała rozprawę habilitacyjną Analiza doświadczalna termomechanicznych właściwości stopu TiNi oraz poliuretanu z pamięcią kształtu, Prace IPPT PAN, 2008. Członek PTMTS oraz Europejskiego Towarzystwa Mechaniki Doświadczalnej.

e-mail: epiecz@ippt.gov.pl

Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki badań sprzężeń termodynamicznych zachodzących podczas indukowanej naprężeniami przemiany fazowej w stopach TiNi z pamięcią kształtu. Wykazano, że przemiana martenzytyczna wprost i odwrotna, zachodząca podczas pseudosprężystego odkształcania tych stopów, ma charakter niejednorodny. Makroskopowo rozwija się w zlokalizowanych cienkich pasmach, podobnych do pasm Lüdersa, w dwóch prawie prostopadłych kierunkach, co udokumentowano stosując metodę badań w podczerwieni oraz fotografując relief na powierzchni próbki.

Słowa kluczowe: stop z pamięcią kształtu, TiNi, przemiana martenzytyczna, proces rozciągania, kamera termowizyjna, pomiar temperatury.

Thermomechanical aspects of stress-induced martensite transformation in TiNi shape memory alloy

Abstract

Experimental investigations of thermomechanical couplings related to stress-induced martensite transformation in shape memory alloy (SMA) are presented in the paper. TiNi shape memory alloy specimens were subjected to uniaxial tensile tests carried out with various strain rates on an MTS testing machine (Fig. 1). The temperature changes, accompanying the process of stress-induced martensite transformation were recorded with use of a thermovision camera. It was shown that the martensite forward and reverse transformation, related to the SMA pseudo-elastic behavior, can occur and develop in inhomogeneous way in Lüders-like bands [3-5]. Nucleation and development of the phase transformation fronts in the SMA recorded by infrared camera were studied. Narrow bands of considerably higher temperature corresponding to the martensitic phase, starting from the central part of the specimen and developing towards the specimen grips, were recorded. Next, the upswing region was observed, manifested by the more advanced and more homogeneous stage of the phase transformation, accompanied by the more uniform temperature distribution. The inclined bands of heterogeneous temperature distribution were observed also during the unloading process of the SMA, while the reverse transformation accompanied by the temperature decrease took place [14]. The martensite transformation heterogeneity was confirmed by infrared technique and by photographs of the SMA specimen surface relief (Fig. 2). Thermomechanical aspects of the exothermic martensitic forward and the endothermic reverse transformations for various strain rates were analyzed.

Keywords: shape memory alloy, TiNi, martensite transformation, tension, infrared camera, temperature change.

1. Wstęp

Efekt pamięci kształtu oraz termosprężystość, obserwowane w stopach z pamięcią kształtu (SMA), związane są z odwracalną przemianą martenzytyczną zachodzącą w tych materiałach w wyniku zmiany temperatury lub wskutek przyłożonych naprężeń [1-5]. Procesy przemian fazowych są bardzo wrażliwe na

zmiany temperatury [3-6]. W przypadku przemiany indukowanej naprężeniem również zmienia się temperatura próbki, szczególnie dla wyższych prędkości deformacji co wpływa na przebieg procesu przemiany, m.in. na zmianę kąta nachylenia charakterystyki naprężenie-odkształcenie [7-14]. W wyższej temperaturze przemiana martenzytyczna wprost zachodzi na wyższym poziomie naprężenia [1, 14]. Dlatego zarówno ze względów poznawczych, jak również aplikacyjnych istotne są doświadczalne badania sprzężeń termomechanicznych, towarzyszących przemianie martenzytycznej wprost i odwrotnej w stopie TiNi z pamięcią kształtu [3-5]. Przedmiotem niniejszej pracy są efekty sprzężeń termomechanicznych badane za pomocą kamery termowizyjnej w IPPT PAN oraz w *AICHI Institute of Technology* w Japonii.

2. Charakterystyka materiału i opis badań

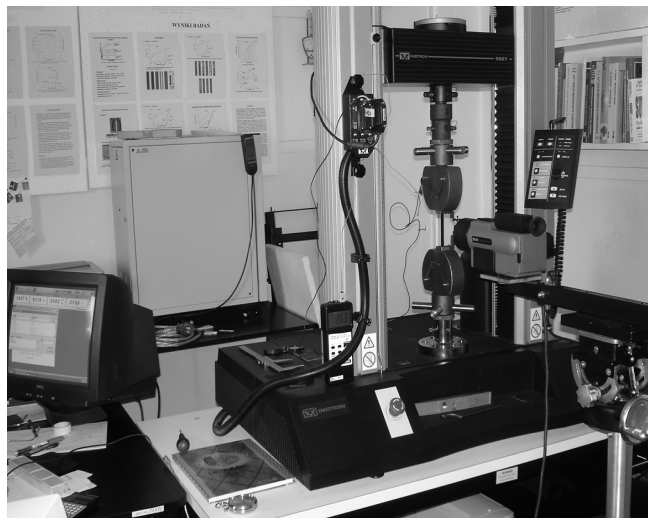
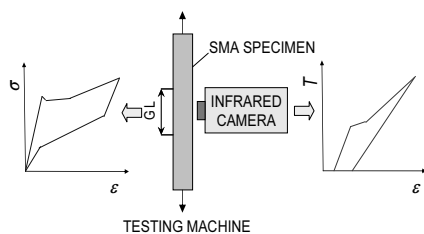
Próbki ze stopu z pamięcią kształtu TiNi poddano badaniom rozciągania z różnymi prędkościami deformacji, w zakresie od 10^{-4}s^{-1} do 10^1s^{-1} przy sterowaniu stałą prędkością odkształcenia. Badania doświadczalne przeprowadzono na próbkach płaskich stopu TiNi produkcji Furukawa Electric Co., o składzie: 55,3wt% Ti oraz 44,7wt% Ni, wymiarach 160 mm × 10 mm × 0,4 mm. Temperatura końca przemiany odwrotnej (*austenite finish*) A_f tego stopu wynosi 285 K co umożliwiło uzyskanie zamkniętych pętli przemiany martenzytycznej i odwrotnej podczas obciążania i odciążania w temperaturze pokojowej (295 K). Podczas obciążania austenityczna faza macierzysta zamienia się w martenzyt, a podczas odciążania materiał powraca do poprzedniego kształtu, struktury. Dla stopów z pamięcią kształtu proces ten jest cykliczny. Zastosowanie wysokiej klasy maszyny wytrzymałościowej i kamery termowizyjnej pozwoliło na otrzymanie mechanicznych parametrów odkształcania oraz odwrotnej podczas obciążania i odciążania w temperaturze pokojowej oraz wilgotności powietrza około 60%. Odkształcenie próbki rejestrowano za pomocą ekstensometru mechanicznego. Po każdym pomiarze próbkę wygrzewano w komorze termicznej w temperaturze 140°C w czasie 20 min. Metodyka badań w podczerwieni zastosowana do badań stopów z pamięcią kształtu prezentowanych w niniejszej pracy została opracowana w czasie wieloletnich badań różnych metali, stopów, kompozytów oraz polimerów [6-14]. Schemat i fotografię stanowiska pomiarowego przedstawiono na rysunku 1.

Podczas badań wybrano trzy sposoby oceny zmian temperatury, z wielu możliwych przy stosowanej kamery termowizyjnej Therna CAMtm PM 695 FLIR Co.:

- z rozkładów temperatury na powierzchni próbki,
- ze zmian temperatury w wybranym punkcie
- ze średniej temperatury próbki.

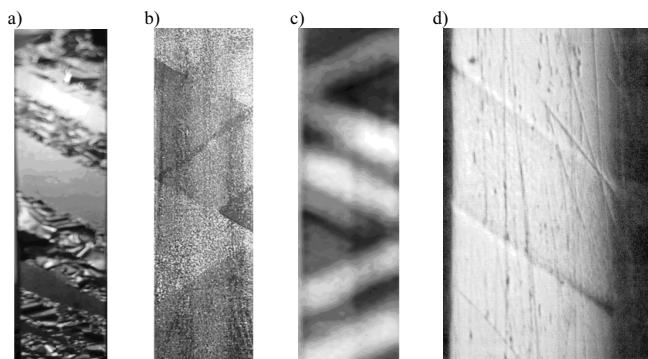
Średnią temperaturę określano z obszaru o wymiarach 8 × 60 mm, położonego w centralnej części próbki. W celu zwiększenia i ujednorodnienia emisyjności, jej powierzchnię pokrywano cienką warstwą sadzy. Dokładność pomiaru temperatury szacuje się na około 0,05 K.

Uzyskane wyniki wskazują, że w stopach TiNi z pamięcią kształtu, stymulowana odkształceniami martenzytyczna przemiana fazowa jak również przemiana odwrotna, są procesami niejednorodnymi. Inicjują się, a następnie rozwijają w pasmach podobnych do pasm Lüdersa (rys. 2, 3). Taka forma przemiany obserwowana była przez nasz zespół zarówno w przypadku sterowania stałą prędkością odkształcenia, jak również stałą prędkością naprężenia [9, 14].



Rys. 1. Schemat i fotografia stanowiska pomiarowego do badań stopów z pamięcią kształtu

Fig. 1. Scheme and photograph of experimental set-up

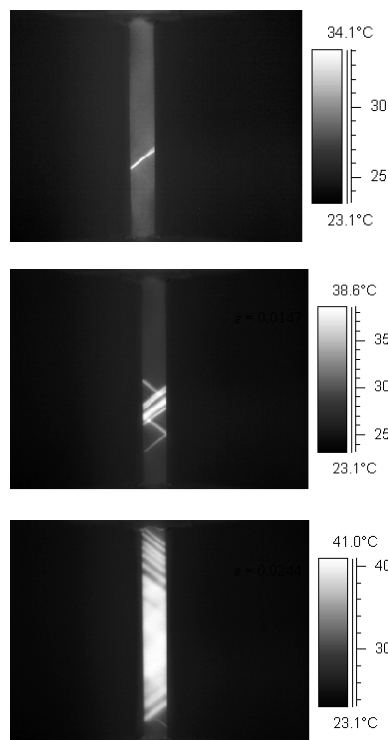


Rys. 2. Pasma zlokalizowanej przemiany martenzytycznej otrzymane w stopie TiNi SMA przy różnych technikach rejestracji: a) optyczna fotografia śladów pasm przemiany na powierzchni próbki pokrytej czarnym lakierem [1], b) fotografia reliefu pasm na powierzchni próbki pokrytej czarnym lakierem [1], c) obraz w podczerwieni [1], d) fotografia pasm przemiany otrzymana przez Q.P. Sun, Hong-Kong University [4]

Fig. 2. Localized phase transformation bands in TiNi SMA observed in various techniques: a) optical photograph of trace of the transformation bands on the specimen surface covered by spray with black lacquer, b) optical photograph of trace of the transformation bands on the specimen surface covered by black marking ink, c) infrared image of the transformation band, d) Photograph of the localized martensite transformation recorded by Q.P. Sun, Hong-Kong University [4]

3. Zmiany temperatury towarzyszące przemianie martenzytycznej wprost i odwrotnej

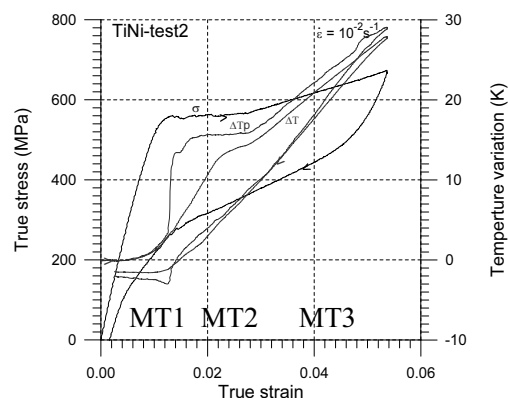
Przy odkształceniu rzeczywistym $\varepsilon = 0,013$, odpowiadającym lokalnemu maksimum naprężenia, na obydwu termogramach pojawia się pasmo wyższej temperatury świadczące o rozpoczęciu w tych obszarach zlokalizowanej przemiany martenzytycznej; rys. 3. Obserwowane pasmo jest skierowane pod kątem około 48° do kierunku rozciągania. Oszacowano, że różnica temperatur pomiędzy pasmem a próbką dochodzi do 8 K [14].



Rys. 3. Termogramy otrzymane dla próbki TiNi SMA odpowiednio przy odkształceniach 0,013; 0,015; 0,026

Fig. 3. Thermograms obtained for TiNi SMA at strains 0.013; 0.015; 0.026, respectively

Na etapie, w którym pasma przemiany martenzytycznej rozwinęły się na całą długość próbki (rys. 3(4)), zauważa się pewne przebiegi krzywych $\sigma(\varepsilon)$, $\Delta T(\varepsilon)$ oraz $\Delta T_p(\varepsilon)$.



Rys. 4. Naprężenie i zmiany temperatury w funkcji odkształcenia próbki ze stopu TiNi z pamięcią kształtu; ΔT – średnia temperatura próbki, ΔT_p – temperatura w punkcie inicjacji przemiany fazowej; wyszczególnienie trzech etapów przemiany: MT1 jednorodny, MT2 niejednorodny, MT3 prawie jednorodny

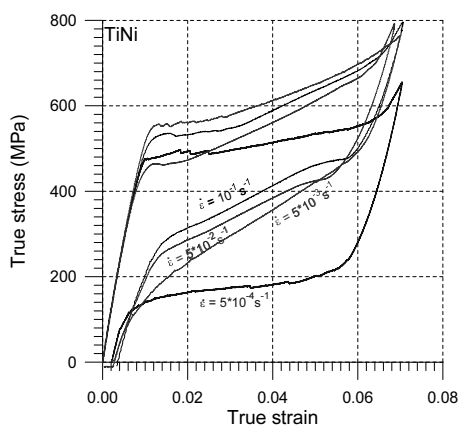
Fig. 4. Three stages of phase transformations: MT1, MT2 and MT3 distinguished on the stress and temperature vs. strain curves for TiNi SMA subjected to tension test with the strain rate of 10^{-2} s^{-1} ; ΔT – average temperature change in the testing area, ΔT_p – temperature change at the point where the phase transition start was noticed

Na rysunku 4 przedstawiono zmiany naprężenia w funkcji odkształcenia uzyskane podczas obciążania i odciążania próbki ze stopu TiNi z prędkością odkształcenia $\dot{\varepsilon} = 10^{-2} \text{ s}^{-1}$, uzupełnione pomiarami średniej temperatury (ΔT). Na tym samym rysunku przedstawiono przebieg zmian temperatury w punkcie położonym w środku pasma inicjacji przemiany fazowej (oznaczony symbolem ΔT_p). Po przekroczeniu sprężystego etapu odkształcania temperatura próbki rośnie. Przyrosty temperatury średniej oraz temperatury w punkcie obserwuje się aż do końca zakresu przemiany martenzytycznej.

Temperatura mierzona w punkcie zaznaczonym w miejscu inicjacji przemiany martenzytycznej (ΔT_p - rys. 4) początkowo wzrasta, podobnie jak temperatura średnia, gdyż jest to etap odkształcania jednorodnego. W momencie inicjacji przemiany zlokalizowanej następuje skok tej temperatury o ok. 8 K. Następnie, w miarę rozciągania, wpływ na zmiany temperatury w wybranym punkcie ma przesuwanie się próbki względem tego punktu, ponieważ wybrany punkt jest nieruchomy. Po zakończeniu odkształcania niejednorodnego, związanego z rozwojem pasm przemiany fazowej, temperatura w wybranym punkcie zmienia się podobnie jak średnia temperatura próbki. Przy odciążeniu, zmiany temperatury w punkcie są niemal identyczne jak średniej temperatury aż do odkształcenia odpowiadającego inicjacji w tym punkcie martenzytycznej przemiany fazowej. Wówczas następuje gwałtowny spadek temperatury o ok. 4 K, a następnie niewielki wzrost spowodowany przepływem ciepła z sąsiednich obszarów. Porównanie średniej temperatury próbki oraz temperatury mierzonej w punkcie (rys. 4) potwierdza niejednorodny przebieg przemiany martenzytycznej i odwrotnej oraz pozwala wyróżnić w procesie charakterystyczne etapy przemiany: MT1 - jednorodny, MT2 - przemiany zlokalizowanej w pasmach, intensywnie przebiegającej zaawansowanej ale już bardziej jednorodnej przemiany.

4. Wpływ prędkości odkształcania na charakterystyki mechaniczne i zmiany temperatury próbek stopu z pamięcią kształtu

Na rysunku 5 przedstawiono charakterystyki $\sigma(\epsilon)$ zmian naprężenia w funkcji odkształcenia stopu TiNi uzyskane przy różnych prędkościach odkształcania: $5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, $5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, 10^{-2} s^{-1} i 10^{-1} s^{-1} . W klasycznych krzywych, obrazujących zjawisko pseudosprężystości w stopach z pamięcią kształtu dla bardzo małych prędkości deformacji odcinki wykresu $\sigma(\epsilon)$ odpowiadające przemianie martenzytycznej i odwrotnej są niemal równoległe do osi odkształcenia [1]. W zakresie quasi-statycznych prędkości deformacji, podczas przemiany martenzytycznej następuje wydzielanie się ciepła powodując wzrost temperatury próbki.



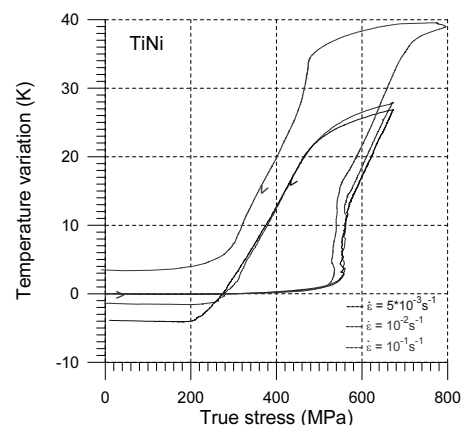
Rys. 5. Charakterystyki naprężenie-odkształcenie stopu TiNi z pamięcią kształtu dla różnych prędkości odkształcania: $5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, $5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, 10^{-2} s^{-1} i 10^{-1} s^{-1}
Fig. 5. Stress-strain curves of TiNi SMA subjected to strain-controlled tension tests with strain rates: $5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, $5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, 10^{-2} s^{-1} , 10^{-1} s^{-1} , respectively

Zmiana temperatury powoduje z kolei wzrost naprężenia [1-8]. W związku z tym wzrasta kąt nachylenia charakterystyki $\sigma(\epsilon)$ (rys. 5). Podobne efekty, tylko w przeciwnym kierunku, zachodzą podczas przemiany odwrotnej.

Na rysunku 6 przedstawiono zmiany średniej temperatury towarzyszące rozciąganiu próbek z różnymi prędkościami deformacji (jak na rys. 5), przedstawione w funkcji naprężenia. Niestety, przyjęto różne zakresy odkształcania. Charakter zmian tych zależności jest podobny, niezależnie od stosowanej prędkości odkształcania. W zakresie sprężystym, aż do osiągnięcia naprężenia

ok. 400 MPa, nie obserwuje się zmian średniej temperatury próbek. W następnym etapie wzrost temperatury jest powolny i nie przekracza 2 K-3 K. Jest to zakres początkowej, zachodzącej w poszczególnych, korzystnie zorientowanych ziarnach, ale makroskopowo jednorodnej przemiany fazowej. Następnie, w zakresie niejednorodnej, zlokalizowanej przemiany martenzytycznej średnia temperatura próbek wzrasta o ok. 10 K przy niemal stałym naprężeniu. W kolejnym etapie, temperatura próbek wzrasta nieco wolniej wraz ze wzrostem naprężenia, przy czym przyrost temperatury jest większy dla wyższych prędkości deformacji. W dalszym etapie rozciągania, zarejestrowanym dla maksymalnej prędkości deformacji 10^{-1} s^{-1} , obserwuje się z kolei już niewielki stopień wzrostu temperatury, wynikający z wysycenia przemiany martenzytycznej, bezwładności procesów cieplnych oraz odpływu ciepła do uchwytów próbki.

Przy odciążeniu, wraz ze zmniejszaniem się naprężenia, obserwuje się spadek temperatury próbki. Najpierw, na etapie odciążania sprężystego, następuje powolny spadek temperatury związany z wymianą ciepła z otoczeniem. Następnie, temperatura próbki szybko maleje w wyniku endotermicznej przemiany odwrotnej. W ostatnim etapie następuje zahamowanie spadku średniej temperatury próbki i do końca odciążania pozostaje ona niemal na tym samym poziomie.



Rys. 6. Zmiany temperatury w funkcji naprężenia otrzymane podczas rozciągania próbki ze stopu TiNi dla różnych prędkości odkształcania: $5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, 10^{-2} s^{-1} i 10^{-1} s^{-1}
Fig. 6. Temperature changes vs. stress in TiNi SMA subjected to tension test with strain rates $5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, 10^{-2} s^{-1} , 10^{-1} s^{-1} , respectively

Zależności przedstawione na rys. 6 zawierają dodatkową istotną informację. Mianowicie, niezależnie od prędkości deformacji, odcinki krzywych zmian temperatury w funkcji naprężenia $\Delta T(\sigma)$, zarejestrowane na etapie zaawansowanej, jednorodnej przemiany martenzytycznej oraz przemiany odwrotnej, są równoległe do siebie lub wręcz się pokrywają. Można je więc opisać funkcją liniową:

$$\Delta \sigma = k \times \Delta T \quad (1)$$

gdzie:

$\Delta \sigma$ - oznacza zmianę naprężenia, w zakresie którego zachodzi przemiana martenzytyczna,

ΔT - oznacza zmianę temperatury w zakresie przemiany martenzytycznej.

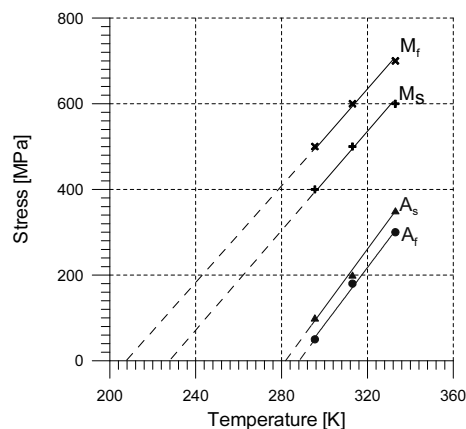
W równaniach termodynamicznych, opisujących zjawisko pseudosprężystości, współczynniki określające stosunki zmian naprężenia do odpowiednich zmian temperatury w zakresie przemiany fazowej mają sens fizyczny, ponieważ związane są z entropią układu [1, 2, 14]. Wyznacza się je doświadczalnie na podstawie wyników otrzymanych podczas rozciągania stopu z pamięcią kształtu z małymi prędkościami deformacji w warunkach izotermicznych, w co najmniej dwu stałych temperaturach. W celu

identyfikacji parametrów materiałowych tego stopu, przeprowadzono dodatkowe badania rozciągania przeprowadzone w komorze, z niską prędkością deformacji $1.67 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, w różnych temperaturach: 295.5K, 313K oraz 333K.

Tab. 1. Oszacowane doświadczalnie wartości współczynników pomiędzy zmianami naprężeniem a temperatury w zakresie zachodzenia przemiany martenzytycznej wprost kM_f i odwrotnej kA_r dla różnych prędkości odkształcania

Tab. 1. Estimated coefficients between the stress and temperature changes within the range of the martensite forward kM_{sr} and reverse transformation kA_{sr} , calculated for various strain rates

	Przemiana martenzytyczna			Przemiana odwrotna		
	$\Delta\sigma$ [MPa]	ΔT [K]	kM_{sr}	$\Delta\sigma$ [MPa]	ΔT [K]	kA_{sr}
$5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$	120	15	8	200	21	9.3
$5 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$	130	15		140	15	
10^{-1} s^{-1}	160	21		110	12	



Rys. 7. Warunki przemiany martenzytycznej i odwrotnej podczas rozciągania stopu TiNi z prędkością $1.67 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ w różnych temperaturach: 295.5K, 313K, 333K (M_s , M_f – oznaczają linie początku i końca przemiany martenzytycznej wprost; A_s , A_r – przemiany odwrotnej)

Fig. 7. Estimated paths for progress of martensitic and reverse transformations in TiNi SMA with low strain rate $1.67 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ at constant temperatures: 295.5K, 313K, 333K; M_s – martensite start, M_f – martensite finish, A_s – austenite start, A_r – austenite finish

Otrzymane wyniki pozwoliły na oszacowanie wartości naprężenia, przy którym dla danej temperatury badań zaczyna się i kończy przemiana martenzytyczna wprost i odwrotna. Wartości tych naprężeń odniesione do odpowiadającej im temperatury badań pozwoliły na otrzymanie charakterystycznego dla tego stopu TiNi SMA współczynnika k o wartości około 6 MPa/K [14]. Różnice otrzymanych wartości wynikają z wymiany ciepła z otoczeniem oraz większych rozrzutów pomiarowych w przypadku badań w temperaturze pokojowej z różnymi prędkościami odkształcania.

5. Podsumowanie

Stopy z pamięcią kształtu to materiały wielofunkcyjne, posiadające własności pamięci kształtu i supersprężystości, związane z odwracalną przemianą martenzytyczną, o dużym potencjale zastosowania w przemyśle lotniczym, motoryzacyjnym, w budownictwie i medycynie. Na podstawie badań efektów sprzężeń termomechanicznych kamerą termowizyjną stwierdzono, że indukowane naprężeniem przemiany fazowe w stopie TiNi z pamięcią kształtu są procesami niejednorodnymi, inicjują się i rozwijają w pasmach, podobnych do pasm Lüdersa. Na podstawie rozkładów temperatury oraz rejestracji reliefu próbki udokumentowano rozwój dwóch kierunków pasm nowej fazy. Na etapie, w którym

pasma rozwiną się na całej długości próbki, proces przemiany zachodzi bardziej jednorodnie ale dynamicznie, co ma odzwierciedlenie we wzroście kąta nachylenia charakterystyk zmian naprężenia i temperatury. Oszacowano wartości współczynników zmian naprężenia do zmian temperatury w zakresie przemiany martenzytycznej, związane z entropią procesu przemiany.

Praca naukowa otrzymała wsparcie Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego w ramach projektu N N501 220837 oraz Japońskiego Towarzystwa Popierania Wiedzy - Post-doc ID P04774. Pewne prace doświadczalne zostały przeprowadzone z udziałem W.K. Nowackiego (IPPT PAN), S.P. Gadaja (IPPT PAN) oraz H. Tobushiego (AIT, Japonia), za co autorka serdecznie dziękuje.

6. Literatura

- [1] K. Otsuka, C. Wayman Eds., Shape Memory Materials, Cambridge University Press, 1999, ISBN 0-521-663849.
- [2] B. Raniecki, Ch. Lexcelent and K. Tanaka, Thermodynamic models of pseudoelastic behaviour of shape memory alloys, Arch. Mech., 44, 3, 261-284, 1992.
- [3] J. A. Shaw and S. Kyriakides, On the nucleation and propagation of phase transformation fronts in a TiNi Alloy, Acta Mater. 45, 2, 683-700, 1997.
- [4] Z.Q. Li and Q.P. Sun, The initiation and growth of macroscopic martensite band in nano-grained NiTi microtube under tension, Int. Journal of Plasticity, 18 1481 – 1498, 2002.
- [5] P. Sittner, M. Landa, P. Lukas, V. Novak. R-phase transformation phenomena in thermomechanically loaded NiTi polycrystals, Mech. Mater. 38, 475-492, 2006.
- [6] Elzbieta Pieczyńska Własności poznawcze i aplikacyjne stopów z pamięcią kształtu na przykładzie TiNi; NIT Nauka, Innowacje, Technika, 24-30, 4-5, 11, 2005.
- [7] Elzbieta A. Pieczyńska, Stefan P. Gadaj, Wojciech K. Nowacki and Hisaaki Tobushi, Superelastic deformation behaviors based on phase transformation bands in TiNi shape memory alloy, Materials Transactions, 47, 3, 670-676, 2006.
- [8] E.A. Pieczyńska, S.P. Gadaj, W.K. Nowacki and H. Tobushi, Transformation induced stress relaxation during superelastic behavior of TiNi SMA, Int. J. of Appl. Electromagnetic & Mechanics, 23, 3-8, 2006.
- [9] E.A. Pieczyńska, S.P. Gadaj, W.K. Nowacki, H. Tobushi, Phase-transformation fronts evolution for strain- and stress- controlled tension tests in TiNi SMA, Exp.l Mechanics, 46, 4, 531-542, 2006.
- [10] E.A. Pieczyńska, W.K. Nowacki, T. Sakuragi and H. Tobushi, Superelastic deformation properties of TiNi shape memory alloy, Key Engineering materials, 340-341, 1211-1216, 2007.
- [11] Elzbieta A. Pieczyńska, Hisaaki Tobushi, Wojciech K. Nowacki, Stefan P. Gadaj and Toshimi Sakuragi, Subloop Deformation Behavior of TiNi Shape Memory Alloy Subjected to Stress-Controlled Loadings, Materials Transactions, 48, No 10, 2679-2686, 2007.
- [12] H. Tobushi, E.A. Pieczyńska, Y. Ejiri and T. Sakuragi, Thermomechanical Properties of SMA and Polymer and their Composite, Mechanics of Advance Mater. and Structures, 16, 236-247, 2009.
- [13] H. Tobushi, E.A. Pieczyńska, W.K. Nowacki and Y. Sugimoto, SMA Thin Strip for Rotary-Driving Element, Solid State Phenomena, 154, 47-52, 2009.
- [14] Elzbieta Pieczyńska, Analiza doświadczalna termomechanicznych właściwości stopu TiNi oraz poliuretanu z pamięcią kształtu, Prace IPPT, IFTR REPORTS, 2008, ISBN 978-83-89687-37-1, 214 stron, http://prace.ippt.gov.pl/IFTR_Reports_3_2008.pdf.