

## DIAGNOSTYKA PARAMETRÓW MECHANICZNYCH STOPU NiTi

Jan TARGOSZ

Katedra Robotyki i Mechatroniki  
Akademia Górniczo Hutnicza w Krakowie  
30-059 Kraków, Al. Mickiewicza 30, 012 634 35 05, [jantargosz@interia.pl](mailto:jantargosz@interia.pl)

### Streszczenie

Stopy wykazujące się efektem pamięci kształtu, do których należy stop NiTi, wykazują w stanie martenzytycznym bardzo dobre własności tłumienia drgań. Jednak w celu określenia ich rzeczywistej przydatności do zastosowania w maszynach i urządzeniach wibracyjnych oraz złożonych układach wibroizolacji należy przeprowadzić diagnostykę statyczno-dynamiczną własności fizyko – mechanicznych takich jak: modułu sprężystości podłużnej E, sztywności oraz miary tłumienia.

Diagnostykę własności fizyko – mechanicznych przeprowadzono dla drutu NiTi o średnicy  $d=1$  mm i o stężeniu masowym 53-57% niklu w komorze temperaturowej, dla temperatur 20, 35, 50 i 60 °C i w zakresie obciążeń 0,15 – 0,65 kN. Diagnostyka obejmowała między innymi wyznaczenie modułu Younga, współczynnika sprężystości (statycznego i dynamicznego), współczynnika tłumienia (statycznego i dynamicznego). W artykule tym zaprezentowano wyniki przeprowadzonych badań.

Słowa kluczowe: diagnostyka, materiały inteligentne, własności mechaniczne.

### DIAGNOSTICS OF MECHANICAL PARAMETERS NITI MATERIAL

#### Summary

Preventing the process of vibration spreading or the process of controlling vibrations from technological point of view involves mainly applying the elastic elements, more and more often including shape-memory materials, also by some authors referred to as intelligent materials. Diagnostics of NiTi element included Young's modulus, elasticity coefficient (static and dynamic), damping coefficient (static and dynamic).

The diagnostics were carried out on NiTi wire of a diameter  $d=0,001$  m, (in a constant-temperature chamber) for temperatures of 20, 35, 50 and 60 °C were carried out with loads 0,15 – 0,65 kN. Diagnostics of mechanical parameters The results of the conducted tests are enclosed in this article.

Keywords: diagnostics, smart materials, mechanic parameters.

## 1. WSTĘP

Badania diagnostyczne materiałów inteligentnych w chwili obecnej są szeroko rozwinięte, lecz dotyczą tylko układów mechanicznych o małych gabarytach. Jest to związane głównie z kwestiami ekonomicznymi. Wydaje się, że w miarę postępu technologicznego, zagadnienia ekonomiczne staną się mniej istotne.

W niniejszej pracy przedstawiono badania materiału typu NiTi o stężeniu masowym 50 – 53% niklu, przy zachowaniu stałego zakresu obciążenia wymuszenia przy zmianach termicznych w zakresie 20 – 60 °C, jednocześnie badając ich wpływ na inne warunki technologiczne (sztywność, tłumienie). Pozwoli to po przeprowadzeniu kolejnych badań do których użyte zostaną próbki NiTi o innych wymiarach (głównie średnicy drutu) oraz poszerzeniu zakresu temperatur od – 20 °C do

+ 70 °C na modyfikację modelu Rogers – Brinson, którego celem będzie opisanie wpływu temperatury jak i obciążeń dynamicznych w stopach charakteryzujących się pamięcią kształtu. Pozwoli to na prawidłowy dobór parametrów mechanicznych np. złożonych układów wibroizolacyjnych z możliwością sterowania własnościami mechanicznymi w pewnym ograniczonym zakresie.

## 2. BADANIA DIAGNOSTYCZNE

### 2.1. Badania diagnostyczne parametrów mechanicznych stopu NiTi

Zapobieganie procesowi rozprzestrzeniania się drgań lub procesowi ich kontroli z punktu widzenia technologicznego polega głównie na zastosowaniu elementów elastycznych, w tym coraz częściej materiałów z pamięcią kształtu, zwanych przez

niektórych materiałami inteligentnymi. Użycie tych elementów przynosi zwykle pozytywne efekty w zakresie tłumienia i izolacji drgań jak również możliwość sterowania i kontroli parametrów dynamicznych urządzeń wibracyjnych.

Jednak w celu określenia ich rzeczywistej przydatności do zastosowania w maszynach i urządzeniach wibracyjnych oraz złożonych układach wibroizolacji przeprowadzono badania doświadczalne statyczno-dynamiczne na maszynie wytrzymałościowej Instron 1273 z napędem hydraulicznym i sterowaniem elektronicznym. Badania modułu sprężystości podłużnej  $E$ , sztywności oraz miar tłumienia próbek NiTi wykonano w Laboratorium Wytrzymałości Materiałów w AGH Krakowie, posiadającym uprawnienia Urzędu Dozoru Technicznego oraz National Institute of Standards and Technology USA w zakresie wytrzymałości materiałów konstrukcyjnych oraz wdrożony system jakości laboratorium badawczego. Maszyna posiada aktualne i ciągle aktualizowane świadectwo legalizacyjne, widok maszyny przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Maszyna wytrzymałościowa statyczno – dynamiczna typu Instron 1273

Maszyna ta umożliwia wykonywania zarówno badań w warunkach quasi statycznych obciążeń przy skoku tłoka  $\pm 50$  mm i maksymalnej sile 100 kN, jak i szybkozmiennych obciążeń dynamicznych o częstotliwościach do 100 Hz. Badania próbek stopu NiTi wykonano w zakresie ściskania, w cyklach z obciążeniem i z odciążeniem.

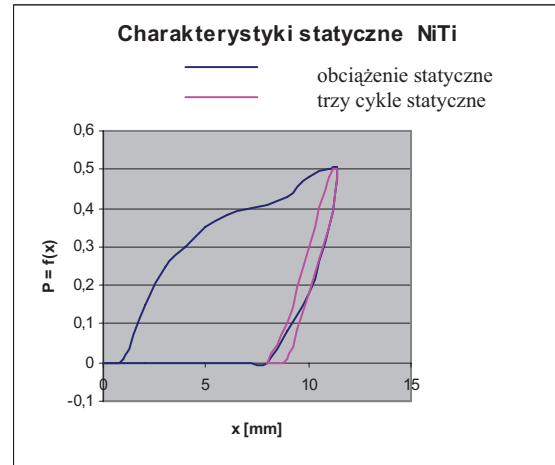
Badania obejmowały między innymi:

- pomiary geometryczne próbek,
- statyczną próbę rozciągania,
- określenie modułu Younga,
- pomiar współczynnika sprężystości statycznej,
- pomiar współczynnika tłumienia statycznego.

## 2.2. Badania statyczne parametrów mechanicznych stopu NiTi

Badania te przeprowadzono dla drutu NiTi o średnicy  $d=0,001$  m i długości  $l_0 = 0,09$ m ze wstępnym wydłużeniem statycznym  $\Delta = 0,01$ m i prędkością  $v = 0,1$  mm/s, (w komorze temperaturowej pozwalającej utrzymać stałość temperatury) dla temperatur 20, 35, 50 i 60 °C.

W pierwszej kolejności przeprowadzono badania statycznego modułu Younga w temperaturze laboratoryjnej  $T = 20$  °C, obciążeniem 0,7 kN, a następnie przeprowadzono trzy cykle statyczne w zakresie 0,2 – 0,65 kN. Wyniki przedstawiono w postaci charakterystyk na rys. 2.



Rys. 2. Charakterystyka statyczna trzech cykli NiTi – kolor niebieski (seria 1) oraz charakterystyka statyczna trzech cykli NiTi – kolor różowy (seria 2)

W trakcie prób dokonywano rejestracji przebiegu ustabilizowanej pętli histerezy pracy mechanicznej, z której wyznaczono w sposób zgodny z normami wartości modułu  $E$  z fragmentu pętli histerezy odpowiadającego obciążeniu próbki siłą ściskającą oraz współczynnik tłumienia. NiTi z obu fragmentów pętli: obciążenia i odciążenia. W niektórych przypadkach zachodziła konieczność graficznego uśrednienia przebiegu z boczna narastającego przy wyznaczaniu modułu  $E$  wobec wystąpienia niewielkich nieliniowości na obu końcach pętli histerezy. Wartość statycznego modułu Young'a wyznaczona tą metodą wynosi:  $E = 3,44$  GPa. Wykorzystując zależność teoretyczną na współczynnik sprężystości pręta w postaci:

$$k_z = \frac{EF}{l}, \quad (1)$$

oraz podstawiając wyznaczone zależności materiałowe i geometryczne pręta obliczono wartość statycznego współczynnika sprężystości, która wyniosła:  $k_z = 3 \cdot 10^4$  Nm<sup>-1</sup>.

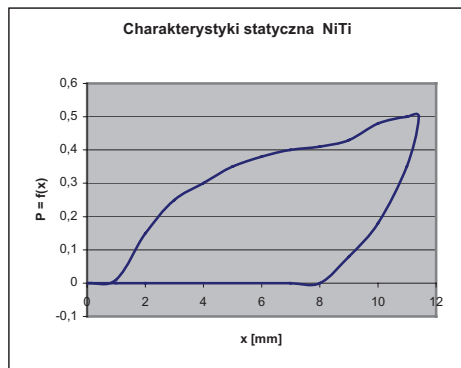
Następnie wyznaczono miarę tłumienia dla badanego materiału, który zdefiniowano jako współczynnik rozproszenia energii, wynikający bezpośrednio z badań doświadczalnych. Jest to iloraz energii rozproszonej podczas jednego okresu drgań  $F_{petli}$  do maksymalnej energii potencjalnej w tym okresie:

$$\psi = \frac{W_{petli}}{W} \quad (2)$$

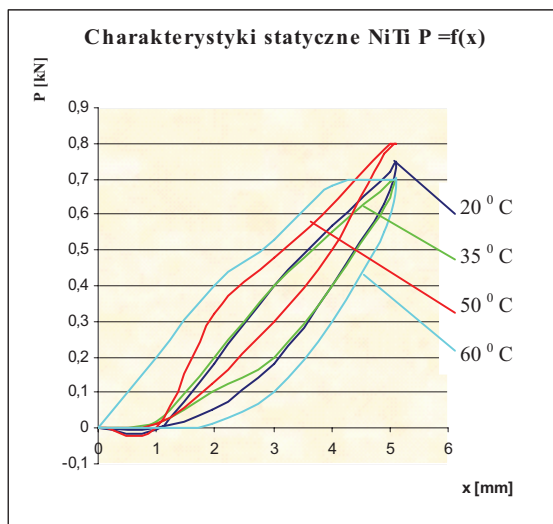
Zależność między siłą a przemieszczeniem tworzy w przypadku ustalonych drgań okresowych

pętlę histerezy (rys. 3). Pole pętli przedstawia energię rozproszoną  $W_{\text{pętli}}$ .

Wcześniej jednak należało wyznaczyć pola poszczególnych powierzchni. W tym celu za pomocą tabletu graficznego PENTAGRAM XXL zapisywano wektorowo pliki wykresów w AutoCAD a następnie za pomocą funkcji pomocniczej, będącej na wyposażeniu tego programu, wyznaczano pola powierzchni pętli histerezy. Na rys. 3 przedstawiono dla przykładu pętlę histerezy NiTi dla temperatury 20 °C, natomiast na rys. 4 przedstawiono charakterystyki statyczne NiTi dla różnych temperatur.

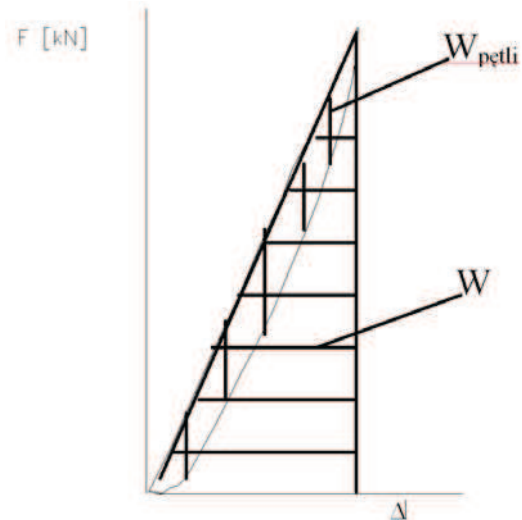


Rys. 3. Charakterystyka statyczna NiTi przy temperaturze 20 °C



Rys. 4. Charakterystyki statyczne NiTi dla różnych temperatur

Zależność między siłą a przemieszczeniem, tworzy w przypadku ustalonych drgań okresowych pętlę histerezy (rys. 5). Pole zakreskowane przedstawia energię rozproszoną  $W_{\text{pętli}}$ , natomiast pole pod krzywą określa odwracalny proces drgań układu (bez rozproszenia energii), przedstawia maksymalną potencjalną energię układu  $W$ .



Rys. 5. Pętla histerezy

Wyniki obliczeń współczynnika rozproszenia energii przedstawiono w tab. 1.

Tab. 1. Współczynnik rozproszenia energii  $\Psi$  NiTi

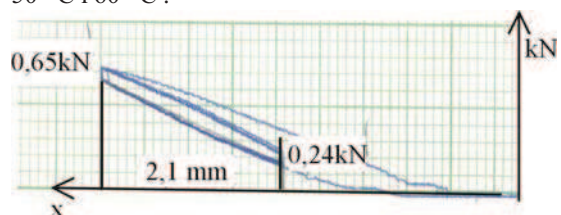
Temperatura 20 °C	Temperatura 35 °C	Temperatura 50 °C	Temperatura 60 °C
$\Psi = 0,41$	$\Psi = 0,51$	$\Psi = 0,63$	$\Psi = 0,64$

### 2.3. Badania dynamiczne parametrów mechanicznych stopu NiTi

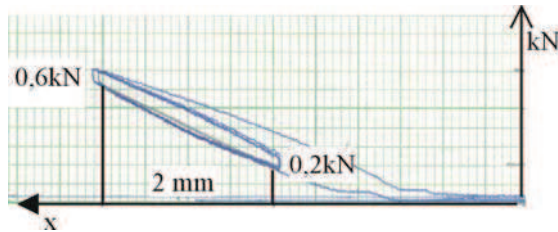
Badania dynamiczne przeprowadzone dla drutu NiTi o identycznej średnicy  $d=0,001$  m i długości  $l_0 = 0,09$  m ze wstępnym wydłużeniem statycznym  $\Delta = 0,01$  m i prędkością  $v = 3$  mm/s, (w komorze temperaturowej pozwalającej utrzymać stałą temperaturę) dla tych samych temperatur 20, 35, 50 i 60 °C. W pierwszej kolejności przeprowadzono badania dynamicznego modułu Younga, obciążeniem w zakresie 0,15 – 0,65 kN i amplitudą tłka maszyny wytrzymałościowej Instron 1273,  $A = 5$  mm. Następnie przeprowadzono badania dynamiczne umożliwiające wyznaczenie parametrów mechanicznych stopu NiTi takich jak:

- współczynnik sprężystości dynamicznej,
- współczynnik tłumienia dynamicznego.

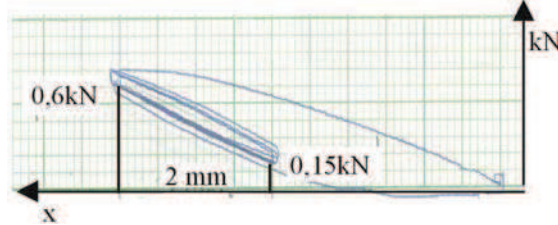
Na rys. 6, 7, 8 i 9 przedstawiono przykładowo pętle histerezy badanego stopu, otrzymane w wyniku badań dynamicznych przy temperaturze 20 °C, 35 °C, 50 °C i 60 °C.



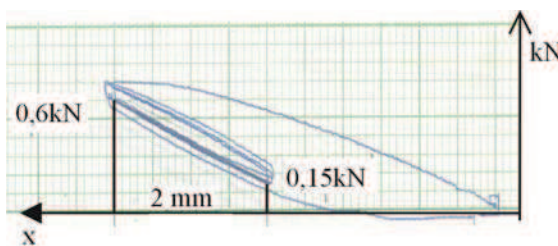
Rys. 6. Pętla histerezy dla próbki przy temp. 20 °C



Rys. 7. Pętla histerezy dla próbki przy temp. 35 °C



Rys. 8. Pętla histerezy dla próbki przy temp. 50 °C



Rys. 9. Pętla histerezy dla próbki przy temp. 60 °C

Wyniki badań dynamicznych  $E_{dyn}$  zestawiono w tab. 2.

Tab. 2. Moduł Younga  $E_{dyn}$  NiTi [GPa]

Temperatura 20 °C	Temperatura 35 °C	Temperatura 50 °C	Temperatura 60 °C
$E_d = 3,45$	$E_d = 2,76$	$E_d = 3,05$	$E_d = 3,39$

Badania dynamicznego modułu Younga  $E_{dyn}$  potwierdziły w sposób wyraźny wpływ stanu przemiany na strukturę materiału zależną od temperatury stopu NiTi.

Kolejnym etapem prowadzonych badań było wyznaczenie zastępczych współczynników sztywności dynamicznej, które w oparciu o wyznaczone moduły Younga można obliczyć z zależności 1. Wyniki tych obliczeń zestawiono w tab. 3.

Tab.3. Sztywność dynamiczna  $k_d$  NiTi [ $\text{Nm}^{-1}$ ]

Temperatura 20 °C	Temperatura 35 °C	Temperatura 50 °C	Temperatur a 60 °C
$k_d = 1,25 \cdot 10^6$	$k_d = 9,98 \cdot 10^5$	$k_d = 1,1 \cdot 10^6$	$k_d = 1,2 \cdot 10^6$

Na podstawie wyznaczonych sztywności dynamicznych w oparciu o zależność (1), widać wyraźnie, że sztywności te są o około  $10^2$  większe od sztywności statycznej przy amplitudzie wymuszenia cyklu dynamicznego  $x = 0,002$  m.

Następnie wyznaczono w sposób identyczny jak dla warunków statycznych, miarę tłumienia dla NiTi która jest współczynnikiem rozproszenia energii, wynikającym bezpośrednio z dynamicznych badań doświadczalnych. Wyniki obliczeń zestawiono w tab. 4.

Tab. 4. Współczynnik rozproszenia energii  $\Psi$  NiTi

Temperatura 20 °C	Temperatura 35 °C	Temperatura 50 °C	Temperatura 60 °C
$\Psi = 0,32$	$\Psi = 0,34$	$\Psi = 0,35$	$\Psi = 0,38$

Na podstawie wyznaczonej miary tłumienia widać jej wzrost w miarę wzrostu temperatury, co związane jest z przemianami fazowymi materiału.

### 3. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań statycznych materiału z pamięcią kształtu typu NiTi można stwierdzić:

- ograniczoną możliwość pracy w zakresie początkowym, aż do przemiany w stan martenzytyczny,
- konieczność nauczenia przemiany odwracalnej, dwukierunkowej,
- wzrost modułu Younga, który wynosi dla temperatury 35 °C,  $E = 2,76$  GPa, dla temperatury 50 °C,  $E = 3,05$  GPa, a dla temperatury 60 °C,  $E = 3,39$  GPa,
- wzrost współczynnika rozproszenia energii  $\Psi$  NiTi w miarę wzrostu temperatury i tak dla temperatury 35 °C wynosi  $\Psi = 0,41$ , dla temperatury 50 °C wynosi  $\Psi = 0,63$ , a dla temperatury 60 °C wynosi  $\Psi = 0,64$ ;
- statyczny współczynnik sprężystości wynosi  $k_z = 3 \cdot 10^4 \text{ Nm}^{-1}$ .

Na podstawie przeprowadzonych badań dynamicznych stopu NiTi charakteryzującego się pamięcią kształtu można stwierdzić, że:

- istnieje możliwość pracy w obszarze wyznaczonych amplitud dynamicznych po nauczeniu materiału przemiany dwukierunkowej,
- wzrost dynamicznego modułu Younga, od temperatury 35 °C do temperatury 60 °C w zakresie  $E_d = 2,76$ , GPa do  $E_d = 3,39$  GPa, choć w początkowej fazie przemiany martenzytowej następuje spadek wartości modułu,
- wzrost współczynnika rozproszenia energii  $\Psi$  NiTi w miarę wzrostu temperatury. I tak dla temp. 20 °C wynosi  $\Psi = 0,32$ , dla temp. 35 °C wynosi  $\Psi = 0,34$ , dla temp. 50 °C wynosi  $\Psi = 0,35$ , a dla temp. 60 °C wynosi  $\Psi = 0,38$ .
- dynamiczny współczynnik sztywności w zakresie amplitudy wymuszenia, czyli w fazie martenzytycznej, jest prawie  $10^2$  większy od współczynnika statycznego.

Na podstawie przeprowadzonych badań można założyć możliwość zastosowania w/w materiału do złożonych układów wibroizolacji jak również zastosowania go w maszynach wibracyjnych.

### LITERATURA

- [1].Bierek K.: *Porównanie wybranych równań konstytutywnych stopów z pamięcią kształtu*, Modelowanie Inżynierskie 32, s. 37-44, Gliwice 2006.



- [2].Giergiel M., Targosz J.: *Badania współczynnika tłumienia NiTiNołu*, IV Międzynarodowe Sympozjum Zniszczenia Materiałów i Konstrukcji, Augustów, 2007.
- [3].Morawiec H., Lekston Z., Kobus K., Węgrzyn M., Drugacz J.: *Kształtowanie nadsprężystych pierścieni i sprężyn ze stopów NiTi dla kranoplastyki*. Inżynieria Biomateriałów, 38-42, rok VII(2004) 36.
- [4].Sapińska A.: *Mechatroniczne człony wykonawcze z zastosowaniem materiałów inteligentnych*, Praca doktorska, AGH, Kraków, 2006.



Dr inż. **Jan TARGOSZ**, zatrudniony jest na stanowisku adiunkta w Katedrze Robotyki i Mechatroniki na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, AGH w Krakowie, zajmuje się problemami dynamiki maszyn ze szczególnym uwzględnieniem złożonych układów wibroizolacji.