

Měříme modul pružnosti ve smyku nitinolového drátu s tvarovou pamětí

ADÉLA RICHTEROVÁ¹ – VLADIMÍRA ERHARTOVÁ¹ – JIŘÍ ERHART²

¹Doctrina – Podještědské gymnázium, s.r.o., Liberec – ²Fakulta přírodovědně-humanitní a pedagogická, Technická univerzita v Liberci

Úvod

Materiály s tvarovou pamětí jsou speciální polymorfní materiály, které vlivem změny teploty nebo mechanického napětí dokáží obnovit svůj původní tvar a samovolně se do něj vrátit. Vyskytuje se u nich tzv. kolektivní paměť atomů, díky které i po zdeformování dokáží obnovit svůj původní makroskopický tvar. Tento jev se nazývá paměťový a jeho příčinou je transformace struktury v pevném stavu, tj. vratná přeměna mezi dvěma fázemi s rozdílnými krystalickými mřížkami [1]. Tato strukturální fázová transformace se vyznačuje například výraznou změnou elastických modulů při přechodu mezi nízkoteplotní a vysokoteplotní strukturou krystalové mřížky. Nejznámější slitinou s tvarovou pamětí je nitinol, který dostal své jméno podle atomů slitiny (Ni a Ti) a laboratoře, kde byl vyvinut (Naval Ordnance Laboratory). Slitinu nitinol dneska můžeme běžně zakoupit ve formě drátů a využít pro své projekty a experimentování.

Jev tvarové paměti byl objeven již roku 1932. Byl pozorován na slitině AuCd pomocí metalografických metod [2] za současné změny elektrického odporu. Zájem mimo akademickou půdu vyvolal až objev velké tvarové paměti slitiny nitinol, u které roku 1959 W. J. Buehler pozoroval podobné chování. Při deformaci za pokojové teploty se materiál choval plasticky, po

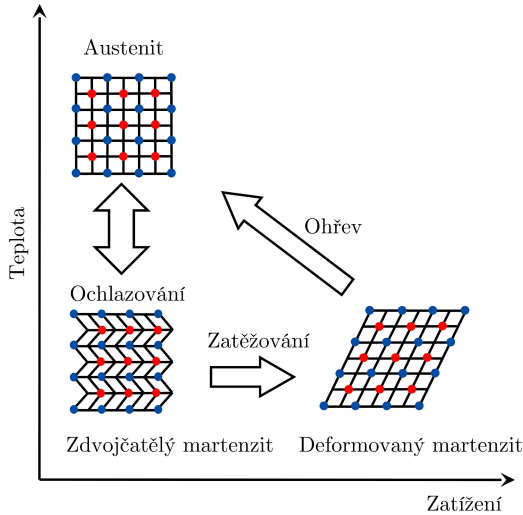
zahřátí na vyšší teplotu se ale vrátil do původního stavu. Paměťový jev byl poté objeven i u mnoha dalších materiálů. Nejvyužívanější jsou slitiny na bázi Ni-Ti (Ni-Ti-Cu, Ni-Ti-Cu-Zr, Ni-Ti-Fe) a na bázi Cu (Cu-Zn-Al, Cu-Al-Ni, Cu-Al-Ag), dále pak například Ag-Cd, Au-Cd, In-Tl, In-Gd, nebo Mn-Cu [3, 4].

Martenzitická transformace je strukturní, fázová a reverzibilní transformace bezdifuzního typu, která spočívá ve změně typu mřížky posunem atomů při změně vnějších podmínek (např. teploty) z vysoce symetrické (např. kubické) na méně symetrickou (např. monoklinickou) krystalovou mřížku. Struktura slitiny se symetrickou mřížkou se nazývá austenit a je stabilní při vyšších teplotách. Modifikace s nižší symetrií se nazývá martenzit, který se vyskytuje za teploty nižší, než je teplota transformace. Díky martenzitické transformaci mají tyto materiály jedinečné vlastnosti, zejména tvarovou paměť a superelasticitu [4, 5].

Martenzitická transformace je reorganizace atomů pohybem vnitřních rozhraní v materiálu. Je způsobena snahou materiálu dosáhnout energeticky nejvýhodnějšího stavu, kdy kvůli rychlé změně okolní teploty, zatížení, či jiných podmínek již původní fáze není energeticky výhodná a materiál se přeorientuje do nové krystalické struktury. Během této transformace nevznikají v materiálu defekty krystalové struktury, protože dojde jen k posuvům atomů, které jsou ve srovnání s meziatomovými vzdálenostmi v mřížce relativně malé [1]. Změna objemu je jen nepatrná, martenzit dokáže převzít přesný vnější makroskopický tvar austenitu [6, s. 401]. Atomy martenzitu mohou díky nižší symetrii zaujmout více ekvivalentních poloh a z jednoho austenitu tedy může vzniknout mnoho různých variant martenzitu s různě orientovanými mřížkami. To je způsobeno tím, že se vrstvy atomových rovin martenzitu deformují pohybem rovin atomů. Tomu se říká dvojčatění. Při pohybu atomů z jejich rovnovážných poloh v materiálu dochází k plošné poruše krystalové mřížky. Vznikne rovina souměrnosti (rovina dvojčatění, viz schématicky obr. 1), podél níž jsou atomy krystalové mřížky v jednom dvojčeti zrcadlově souměrné s atomy mřížky v druhém dvojčeti.

Pásek nitinolu, který je v austenitické fázi plochý, zdeformujeme v martenzitickém stavu do jiného tvaru. Pokud působíme dostatečnou silou a překročíme hranici kritického napětí, deformace zůstane i po uvolnění. Poté materiál zahřejeme nad teplotu strukturní transformace. Jeho struktura se přemění do austenitické fáze a obnoví svůj původní tvar. Při ochlazování se vrací do fáze zdvojčatělého martenzitu, což nezpůsobí žádnou

makroskopicky viditelnou změnu tvaru (viz obr. 1).



Obr. 1 Tvarově paměťová transformace

Teplota, kterou musíme překročit, aby došlo k transformaci, se nazývá transformační (nebo také aktivační) teplota. Při mechanickém zatížení vzrůstá a mění se hlavně v závislosti na přesném složení slitiny. Nitinol se vyrábí s mnoha různými aktivačními teplotami (od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$). Standardní je slitina s obsahem asi 50 at. % Ni (obsah niklu v nitinolu se může pohybovat mezi 48–52 at. %), změna o 0,1 % může ale změnit transformační teplotu až o $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Proto se při výrobě slitiny musí dodržet její přesné složení [3].

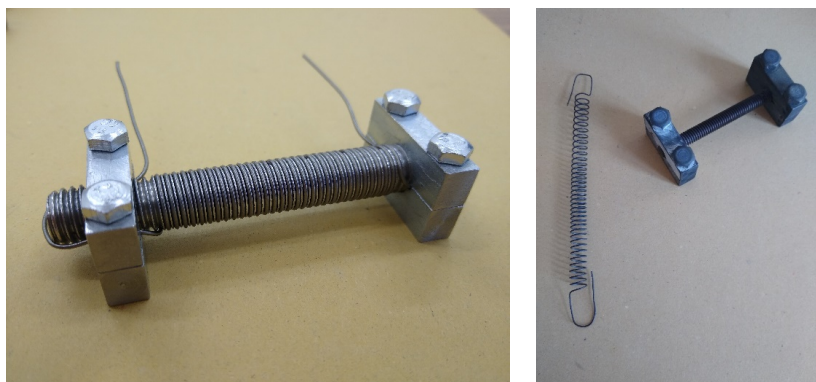
V předkládaném článku se zaměřujeme na experimentování s vlastními vytvořenými pružinami z drátu ze slitiny nitinol s různými aktivačními teplotami, průměry drátů a spirál pružin jednoduchými měřidly s využitím školního systému Vernier. Pružina umožňuje změření smykového modulu pružnosti při jeho změně během strukturální transformace mřížky. Pro další experimenty s nitinolem viz např. [7].

1. Praktická část

Praktická část práce se věnuje fyzikálním vlastnostem nitinolového drátu za různých teplot a mechanického namáhání. Měříme křivku deformace a z ní určíme hodnoty modulů pružnosti ve smyku pro martenzickou a

austenitickou fází materiálu. Ukážeme, že se mechanické vlastnosti v jednotlivých fázích výrazně liší.

Jsou realizována měření s nitinolovými dráty o různých průměrech (0,5 mm a 1 mm) a aktivačních teplotách 45 °C a 70 °C. Nejprve jsou z těchto drátů vyrobeny pružiny o různých průměrech. Nitinolový drát byl namotán na šablonu vytvořenou ze závitové tyče vhodného průměru (4 mm, 5 mm, 6 mm, 8 mm, 10 mm, 12 mm a 16 mm) a na koncích zafixován pomocí přípravku (viz obr. 2). V laboratorní peci byl poté žhán na teplotu 550 °C po dobu půl hodiny a ponechán samovolně vychladnout. Vzhledem k této vysoké teplotě žhání musí být celý přípravek vyroben z nekorodující nerezové oceli. Výsledkem byla nitinolová pružina definovaného tvaru, která se po protažení za pokojové teploty a následného ohřátí nad aktivační teplotu paměťové transformace do tohoto tvaru zase vracela.



Obr. 2 Nitinolový drát zafixovaný na šabloně a vytvořená pružina

V prvním měření jsou poté pružiny deformovány za pokojové teploty (v martenzitické fázi) a je změřena křivka deformace. V křivce deformace je vybrána počáteční oblast s lineárním průběhem (pro malé deformace). Z této oblasti je následně odečtena tuhost pružiny a dopočítán modul pružnosti ve smyku. Druhé měření je realizováno za zvýšené teploty, kdy jsou pružiny v austenitické fázi. Pružiny jsou ohřáty průchodem elektrického proudu, znovu deformovány, je měřena působící síla a prodloužení pružiny a jsou vytvořeny křivky deformace. Poté je v každém grafu vybrána oblast s lineárním průběhem v oblasti malých deformací a stejně jako v martenzitické fázi určena tuhost pružiny a vypočten modul pružnosti ve smyku. Vzhledem k tomu, že modul pružnosti je materiálovou konstantou, tak

by ho neměly ovlivnit rozdílné průřezy zkoumaných vzorků pro stejnou aktivační teplotu (tj. stejné složení slitiny). Při přechodu transformační teploty materiálu dochází k výrazné přeměně krystalické mřížky. Nitinol ve formě austenitu má mřížku více symetrickou, zatímco ve formě martenzitu má mřížku s nižší symetrií. Velikosti elastických modulů pružnosti pružin v austenitické fázi by měly být asi 2 až 3krát vyšší [8, 9].

Chování materiálu při jeho deformaci znázorňuje křivka deformace, tedy graf závislosti mechanického napětí na relativním prodloužení. V našem případě však pracujeme s protažením pružiny (materiál závitů se deformuje ve smyku), kde však nemáme možnost přímo určit smykovou deformaci drátu. Zjišťujeme tedy tuhost pružiny, což však není materiálová konstanta, ale veličina závislá na modulu pružnosti drátu, na jeho průměru, na počtu a poloměru závitů spirály pružiny. Tuhost k je fyzikální veličina udávající sílu F , kterou protáhneme pružinu o jednotku její délky Δl [10].

$$k = \frac{F}{\Delta l}. \quad (1)$$

Při natahování pružiny je pružina namáhána tahem, samotný drát je ale namáhán ve smyku. Pro tuhost pružiny platí vztah

$$k = \frac{Gd^4}{8D^3N}, \quad (2)$$

kde D je průměr spirály pružiny (měřeno od středu průměru drátu), N počet závitů spirály pružiny, G modul pružnosti ve smyku a d průměr drátu, ze kterého je pružina vyrobena [11].

Z tohoto vztahu lze odvodit vztah pro výpočet modulu pružnosti ve smyku

$$G = \frac{8kD^3N}{d^4}. \quad (3)$$

U nitinolu by se měla hodnota modulu pružnosti ve smyku pohybovat pro martenzit v rozmezí 10–15,5 GPa, pro austenit kolem 31 GPa [8].

Pro vytvořené pružiny byly na 5 místech změřeny průměry drátů a vnější průměry pružin D_V . Pro určení průměru D spirály pružiny (měřené ke středu drátu) odečteme od této hodnoty průměrnou hodnotu průměru drátu d , tedy $D = D_V - d$. Průměry spirál pružiny nemusí být také nutně rovny průměru závitové tyče použité na šablonu pro vytvoření spirály pružiny, závisí na průměru použitého drátu, na rozměrech závitů závitové tyče a těsnosti namotání drátu na závitovou tyč.

Aktivační teplota 70 °C							
Drát \varnothing 0,5 mm, pružina \varnothing 4 mm						Průměr	Chyba
d /mm	0,52	0,51	0,52	0,50	0,52	0,51	0,01
D_V /mm	4,47	4,43	4,47	4,56	4,52	4,49	0,05
Drát \varnothing 0,5 mm, pružina \varnothing 5 mm						Průměr	Chyba
d /mm	0,52	0,52	0,51	0,51	0,51	0,514	0,005
D_V /mm	5,30	5,23	5,22	5,22	5,23	5,24	0,03
Drát \varnothing 0,5 mm, pružina \varnothing 6 mm						Průměr	Chyba
d /mm	0,52	0,52	0,51	0,50	0,50	0,51	0,01
D_V /mm	5,85	5,95	6,00	5,97	5,99	5,95	0,05
Drát \varnothing 0,5 mm, pružina \varnothing 8 mm						Průměr	Chyba
d /mm	0,52	0,51	0,50	0,53	0,51	0,51	0,01
D_V /mm	7,24	7,35	7,39	7,37	7,36	7,34	0,05
Drát \varnothing 1 mm, pružina \varnothing 10 mm						Průměr	Chyba
d /mm	0,96	0,98	0,95	0,95	0,99	0,97	0,02
D_V /mm	10,74	10,79	10,76	10,83	10,83	10,79	0,04
Drát \varnothing 1 mm, pružina \varnothing 12 mm						Průměr	Chyba
d /mm	0,96	0,98	0,96	0,94	0,97	0,96	0,01
D_V /mm	12,63	12,52	12,49	12,74	12,53	12,58	0,09
Drát \varnothing 1 mm, pružina \varnothing 16 mm						Průměr	Chyba
d /mm	0,96	0,97	0,95	0,97	0,95	0,96	0,01
D_V /mm	15,61	15,52	15,73	15,56	15,68	15,62	0,08

Tabulka 1 Rozměry pružin s aktivační teplotou 70 °C

Relativní chyby měření modulu pružnosti ve smyku G určíme pomocí chyb určení průměru spirály pružiny D , průměru drátu d a tuhosti pružiny k

$$\vartheta_r(G) \approx \vartheta_r(k) + 3\vartheta_r(D) + 4\vartheta_r(d), \quad (4)$$

kde jednotlivé relativní chyby veličin jsou určeny absolutní chybou a hodnotou veličiny samotné

$$\vartheta_r(k) = \frac{\vartheta(k)}{k}, \quad \vartheta_r(D) = \frac{\vartheta(D)}{D}, \quad \vartheta_r(d) = \frac{\vartheta(d)}{d}. \quad (5)$$

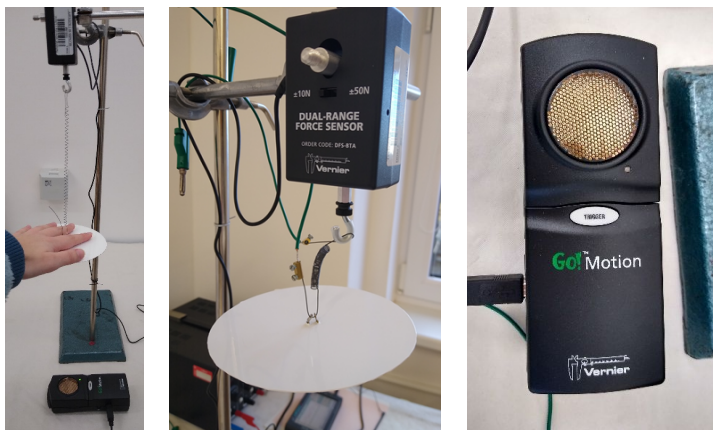
Hodnoty chyb průměrů nitinolových drátů a spirál pružin určíme jako chyby aritmetických průměrů z opakovaných měření – měřeno vždy na několika místech drátů a spirál pružiny (viz tab. 1–2). Hodnoty tuhosti pružin najdeme lineární regresí v naměřených závislostech (příklad měření viz. obr. 4–5) pomocí Excelové funkce LINREGRESE. Výsledky měření modulu pružnosti ve smyku jsou uvedeny v tab. 3–4.

Aktivační teplota 45 °C							
Drát \varnothing 0,5 mm, pružina \varnothing 4 mm						Průměr	Chyba
d/mm	0,49	0,47	0,47	0,48	0,48	0,48	0,01
D_V/mm	4,66	4,67	4,66	4,68	4,71	4,68	0,02
Drát \varnothing 0,5 mm, pružina \varnothing 5 mm						Průměr	Chyba
d/mm	0,48	0,48	0,46	0,46	0,49	0,47	0,01
D_V/mm	5,10	5,13	5,11	5,20	5,16	5,14	0,04
Drát \varnothing 0,5 mm, pružina \varnothing 6 mm						Průměr	Chyba
d/mm	0,49	0,48	0,46	0,47	0,49	0,48	0,01
D_V/mm	5,82	5,82	5,82	5,83	5,92	5,84	0,04
Drát \varnothing 0,5 mm, pružina \varnothing 8 mm						Průměr	Chyba
d/mm	0,48	0,47	0,47	0,47	0,47	0,472	0,004
D_V/mm	7,27	7,26	7,26	7,18	7,25	7,24	0,03
Drát \varnothing 1 mm, pružina \varnothing 10 mm						Průměr	Chyba
d/mm	0,98	1,00	0,97	1,00	1,00	0,99	0,01
D_V/mm	10,64	10,62	10,63	10,63	10,59	10,62	0,02
Drát \varnothing 1 mm, pružina \varnothing 12 mm						Průměr	Chyba
d/mm	0,98	0,99	0,98	0,98	0,98	0,982	0,004
D_V/mm	12,34	12,39	12,44	12,44	12,41	12,40	0,04
Drát \varnothing 1 mm, pružina \varnothing 16 mm						Průměr	Chyba
d/mm	0,99	1,01	0,98	0,98	0,98	0,99	0,01
D_V/mm	15,71	15,74	15,76	15,72	15,75	15,74	0,02

Tabulka 2 Rozměry pružin s aktivační teplotou 45 °C

2. Měření křivek deformace pružin

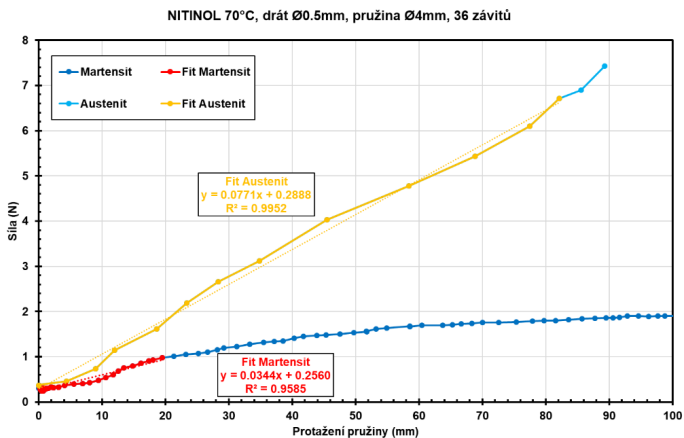
K měření křivky deformace byly použity školní pomůcky systému Vernier: čidlo polohy a pohybu Go!Motion Sonar, siloměr Dual-Range Force Sensor pro měření síly v tlaku i v tahu se dvěma rozsahy (-10 N až $+10\text{ N}$ s citlivostí $0,01\text{ N}$ a -50 N až $+50\text{ N}$ s citlivostí $0,05\text{ N}$), kruh z plastové podložky na psaní o tloušťce 1 mm a průměru 15 cm a pro určení teploty pružiny v austenitické fázi také termokamera FLIR E5. Čidlo polohy používá k měření vzdálenosti ultrazvuk, který se odráží od sledovaného předmětu, a čidlo registruje ultrazvuk z kužele pokrývajícího prostor asi $15\text{--}20^\circ$ od osy čidla. Siloměr Dual-Range Force Sensor byl připevněn asi do výšky 50 cm nad podložku na laboratorní stojan. Na háček siloměru byla zavěšena pružina, na jejíž druhý konec byl připevněn plastový kruh odrážející ultrazvuk z čidla polohy. Pod něj na podložku bylo umístěno čidlo polohy, registrující vzdálenost plastové desky (tj. konce pružiny) od čidla (viz obr. 3). Chyba měření síly siloměrem byla $\vartheta(F) \approx 0,01\text{ N}$.



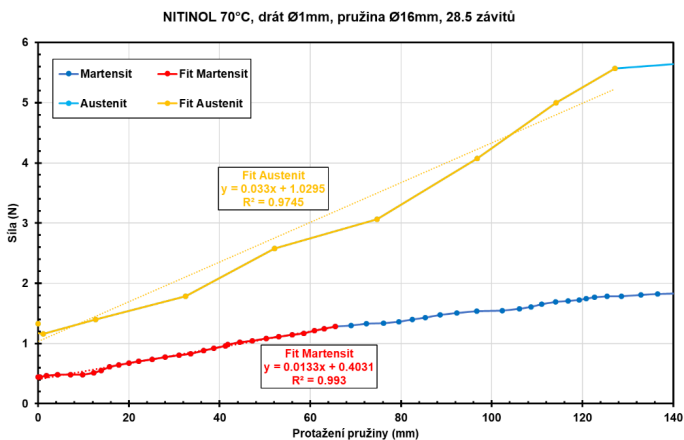
Obr. 3 Měření deformace pružiny při jejím natahování a měřicí senzory Vernier (síla, vzdálenost), uprostřed pružina s připojenými vodiči sloužícími k ohřátí pružiny průchodem proudu pro měření v austenitické fázi

Prodloužení pružiny Δl je počítáno jako rozdíl mezi následujícími načtenými polohami konce pružiny od ultrazvukového čidla polohy Go!Motion Sonar. Po spuštění měření (o frekvenci 20 záznamů za sekundu) byla pružina za plastový kruh rukou pomalu napínána. Siloměrem byla měřena působící síla a ultrazvukovým čidlem polohy konce pružiny, z nich je pak vy-

počtena deformace pružiny Δl . Chyba měření prodloužení pružiny je dvojnásobná než je rozlišení senzoru Go!Motion Sonar, tedy $\vartheta(\Delta l) \approx 2$ mm. Chyby jednotlivých naměřených bodů křivky deformace se tedy budou nejvýrazněji projevovat na jejím počátku, tj. pro malé deformace a malé působící síly. Chybové úsečky pro jednotlivé naměřené body nejsou vynešeny v grafech křivek deformací pružin, neboť jsou příliš malé.



Obr. 4 Příklad měření křivky deformace pro pružinu z nitinolového drátu o průměru 0,5 mm a aktivační teplotě 70 °C



Obr. 5 Příklad měření křivky deformace pro pružinu z nitinolového drátu o průměru 1 mm a aktivační teplotě 70 °C

Získané údaje byly zaneseny do grafu závislosti působící síly na deformaci, tj. křivky deformace. Byly vybrány lineární oblasti pro malé deformace a grafem byla proložena spojnice trendu, z jejíž rovnice byla odečtena tuhost pružiny, která je rovna podílu působící síly a deformace (1). Podle vztahu (3) byl poté pomocí zjištěné tuhosti dopočítán modul pružnosti ve smyku u martenzitu, zjištěné hodnoty jsou shrnuty v tab. 3.

Aktivační teplota 70 °C							
$\frac{d}{\text{mm}}$	$\frac{D}{\text{mm}}$	N	$\frac{k}{\text{N/m}}$	$\frac{\vartheta(k)}{\text{N/m}}$	R^2	$\frac{G}{\text{GPa}}$	$\frac{\vartheta(G)}{\text{GPa}}$
1	10	29	43,7	2,0	0,97	11,0	1,4
	12	28,5	27,9	0,5	0,99	11,6	1,1
	16	28,5	13,3	0,2	0,99	11,3	0,8
0,5	4	36	34,4	1,1	0,96	8,9	1,1
	5	36	21,9	0,4	0,99	9,6	0,7
	6	35,5	12,4	0,4	0,98	8,4	1,1
	8	36	6,7	0,3	0,96	8,7	1,2
Aktivační teplota 45 °C							
$\frac{d}{\text{mm}}$	$\frac{D}{\text{mm}}$	N	$\frac{k}{\text{N/m}}$	$\frac{\vartheta(k)}{\text{N/m}}$	R^2	$\frac{G}{\text{GPa}}$	$\frac{\vartheta(G)}{\text{GPa}}$
1	10	29	33,2	0,8	0,98	7,2	0,6
	12	30	17,3	0,4	0,99	6,7	0,3
	16	28,5	8,9	0,3	0,98	6,8	0,6
0,5	4	37	26,4	1,2	0,93	11,1	1,3
	5	36	23,0	1,3	0,95	13,3	2,4
	6	36,5	14,9	0,6	0,97	12,9	2,0
	8	35,5	7,1	0,3	0,95	12,6	1,2

Tabulka 3 Výsledky měření v martenzitické fázi (za teploty nižší než aktivační teplota)

Pro měření v austenitické fázi byly konce nitinolového drátu pružiny vodivě propojeny spojkami s vodiči, připojenými ke zdroji napětí. Po zapojení elektrického obvodu byl drát zahříván průchodem elektrického proudu

(jeho teplota byla sledována termokamerou FLIR E5) asi na teplotu 80 °C, pro pružiny s aktivační teplotou 45 °C, a na teplotu 100 °C pro pružiny s aktivační teplotou 70 °C. Poté bylo spuštěno měření (o frekvenci 2 záznamy za sekundu) a pružina byla za plastový kruh rukou napínána, podobně jako pro měření za pokojové teploty. Byla měřena působící síla a deformace pružiny. Měření trvala krátkou dobu (do 10 s) a během celé této doby byly tedy pružiny ve vysokoteplotní (austenitické) fázi. Stejně jako v martenzitické fázi, byly i zde určeny moduly pružnosti ve smyku z oblasti malých deformací na křivce deformace. Získané hodnoty jsou shrnuty v tab. 4.

Aktivační teplota 70 °C							
$\frac{d}{\text{mm}}$	$\frac{D}{\text{mm}}$	N	$\frac{k}{\text{N/m}}$	$\frac{\vartheta(k)}{\text{N/m}}$	R^2	$\frac{G}{\text{GPa}}$	$\frac{\vartheta(G)}{\text{GPa}}$
1	10	29	67,7	2,1	0,99	17,1	1,8
	12	28,5	60,2	3,7	0,97	25,2	3,5
	16	28,5	33,0	1,9	0,97	27,9	3,0
0,5	4	36	77,1	1,5	1,00	20,0	2,2
	5	36	39,8	1,4	0,99	17,3	1,6
	6	35,5	33,2	3,1	0,96	22,4	4,3
	8	36	15,7	1,6	0,95	20,6	4,2
Aktivační teplota 45 °C							
$\frac{d}{\text{mm}}$	$\frac{D}{\text{mm}}$	N	$\frac{k}{\text{N/m}}$	$\frac{\vartheta(k)}{\text{N/m}}$	R^2	$\frac{G}{\text{GPa}}$	$\frac{\vartheta(G)}{\text{GPa}}$
1	10	29	93,6	0,8	1,00	20,2	1,3
	12	30	57,2	0,8	0,99	22,0	0,9
	16	28,5	28,4	0,2	1,00	21,8	1,3
0,5	4	37	39,4	0,7	0,97	16,5	1,5
	5	36	32,7	2,7	0,96	19,0	3,9
	6	36,5	25,5	1,4	0,97	22,1	3,8
	8	35,5	14,0	0,7	0,98	24,8	2,4

Tabulka 4 Výsledky měření v austenitické fázi (při teplotě vyšší než transformační teplota)

3. Výsledky měření a diskuze

Výsledný modul pružnosti ve smyku (viz tab. 5) u martenzitické fáze nitinolu má hodnoty, které u většiny vzorků pružin leží v intervalu 6,9–12,5 GPa s 10–20% chybou, což se překrývá s očekávanými hodnotami [8]. Modul pružnosti ve smyku u austenitické fáze nitinolu má hodnoty, které leží v intervalu 20,1–23,4 GPa s 10% chybou, což také koreponduje velmi dobře s dříve publikovanou hodnotou 31 GPa [8]. Všechny dráty mají poměry modulů pružnosti ve smyku pro austenitickou a martenzitickou fázi v rozsahu 1,6–3,1. Chyby měření jsou vždy vypočteny jako součet chyb modulů pružnosti daných rozptylem hodnot od průměru (pro drát stejné tloušťky a stejnou aktivační teplotu) a chyb způsobených nepřesnostmi měření tuhosti pružiny a jejich rozměrů.

	Aktivační teplota 70 °C			Aktivační teplota 45 °C		
	$\frac{d}{\text{mm}}$	$\frac{G}{\text{GPa}}$	$\frac{\vartheta(G)}{\text{GPa}}$	$\frac{d}{\text{mm}}$	$\frac{G}{\text{GPa}}$	$\frac{\vartheta(G)}{\text{GPa}}$
Martenzit Austenit	1	11,3 23,4	1,6 8,1	1	6,9 21,3	0,8 2,1
Martenzit Austenit	0,5	8,9 20,1	1,7 6,1	0,5	12,5 20,6	3,2 7,0

Tabulka 5 Výsledky měření modulů pružnosti ve smyku

Na naměřených hodnotách pozorujeme zřetelně větší nelinearitu u křivky deformace pro austenitickou fázi nitinolu než je vidět u martenzitické fáze. Z hlediska našeho jednoduchého měření je problémem nestejnoměrná rychlost protahování pružiny při jejím natahování, což si přesně kontrolují komerční měřicí zařízení na mechanické zkoušky.

Hodnoty modulů pružnosti se obecně liší pro dráty s různými aktivačními teplotami a také pro dráty různých průměrů. Různá aktivační teplota znamená různé chemické složení slitiny, a tedy také obecně jiné vlastnosti v obou fázích. Naše měření neukazuje na průkazně jiné elastické moduly pro studované dráty různé aktivační teploty, což signalizuje, že tato vlastnost není příliš citlivá na chemické složení (na rozdíl např. od elektrických vlastností). Také závislost na různém průměru drátu pro stejnou aktivační teplotu není nijak extrémní, přestože rozdíly jsou vidět zvláště pro drát s aktivační teplotou 45 °C. V austenitické fázi pak mají všechny vzorky prakticky stejné hodnoty s velmi malým rozptylem.

Závěrem můžeme na předloženém měření demonstrovat rozdílné elastické vlastnosti v různých strukturách nitinolové slitiny jednoduchou školní měřicí metodou s využitím počítačem řízeného systému Vernier. Metoda je použitelná i pro měření libovolných jiných pružin (i bez jevu tvarové paměti). S vytvořenými pružinami z nitinolu mohou být dále realizovány efektní experimenty a demonstrace na tvarovou paměť, např. „smotání“ drátu zpět do spirály pružiny po jejím rozvinutí a vložení do horké vody (teplejší, než je aktivační teplota drátu). Tvar spirály má dále nespornou výhodu, že při jeho vytvoření máme konstantní velikost deformace podél celé délky drátu a nevnašíme do struktury další defekty vedoucí k nevratné deformaci při paměťové transformaci.

Literatura

- [1] Čech, J.: Pozorování hranic dvojčatění ve slitině Ni-Mn-Ga. Bakalářská práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Brno, 2017. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/66054>.
- [2] Petráš, R., Klusák, J.: Materiály s tvarovou pamětí. Ústav fyziky materiálů AV ČR [online], Brno. Dostupné z: <https://docplayer.cz/16971067-Materialy-s-tvarovou-pameti.html>.
- [3] Kursa, M., Pacholek, P.: Metalurgické charakteristiky tvarově paměťových materiálů na bázi Ni-Ti-Me. METAL, 2002, Ostrava.
- [4] Losertová, M.: Úvod do nauky o materiálu. VŠB-TU Ostrava [online], 2016. Dostupné z: <https://adoc.pub/uvod-do-nauky-o-materialu.html>.
- [5] Machek, V., Tatíček, F.: Kovové materiály s tvarovou pamětí. Povrcháři (2015), č. 5, s. 11–14.
- [6] Liu, P., Fullerton, E., Gutfleisch, O., Sellmyer, D.: Nanoscale Magnetic Materials and Applications, Springer, New York, 2009.
- [7] Lisotti, A. a kol.: Educational pathways through nanoscience: nitinol as a paradigmatic smart material. Physics Education, roč. 48 (2013), č. 3, s. 298–311.
- [8] Schwartz, M.: Encyclopedia of smart materials. J. Wiley, New York, 2002.
- [9] Santhanam, R., Krishna, Y., Sivakumar, M.S.: Behaviour of NiTi SMA helical springs under different temperatures and deflections. Internat. Scholarly Research Notices [online], 2013. Dostupné z: <https://www.hindawi.com/journals/isrn/2013/320370/#experimental-results-and-discussions>.
- [10] Zeman, R.: Pružiny. Onlineschool [online], 2022. Dostupné z: <https://onlineschool.cz/fyzika/pruziny/>.
- [11] Vybíral, B.: Mechanika pružného tělesa, Fyzikální olympiáda, [online]. Dostupné z: <http://fyzikalniolympiada.cz/texty/pruznost.pdf>.