



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

## SLITINY S TVAROVOU PAMĚTÍ

SHAPE MEMORY ALLOY

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jakub Sabela

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Karel Němec, Ph.D.

BRNO 2017

## Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav materiálových věd a inženýrství  
Student: **Jakub Sabela**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Základy strojního inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. Karel Němec, Ph.D.**  
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

### Slitiny s tvarovou pamětí

#### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Úkolem je zpracování přehledu materiálů s tvarovou pamětí na bázi kovů, zhodnocení výhod a nevýhod těchto materiálů a popis jejich typických aplikací. V závěru práce bude zmíněna budoucnost slitin s tvarovou pamětí.

#### Cíle bakalářské práce:

- zpracování přehledu materiálů s tvarovou pamětí na bázi kovů
- rozbor výhod a nevýhod těchto materiálů
- popis jejich typických aplikací
- budoucnost slitin s tvarovou pamětí

#### Seznam literatury:

Worden, K., Bullough, W. A. and Haywood, J. Smart Technologies. World Scientific, 2003. Online version available at:

<http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpST000006/smart-technologies/smart-technologies>.

Kursa, M., Szurman, I., Drápala, J., Losertová, M. a Greger, M. Paměťové materiály Ni-Ti-Me a možnosti řízení jejich transformačních charakteristik. 1.vydání. Ostrava: Vysoká škola báňská –Technická univerzita, 2005. 155 s. ISBN 80-248-0894-3.

Collings, E. W. and Welsch, G. Materials Properties Handbook - Titanium Alloys. ASM International, 1994. Online version available at:

<http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpMPHTA002/materials-properties/materials-properties>.

Davim, J. P. Materials Forming and Machining - Research and Development. Elsevier, 2016. Online version available at:  
<http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpMFMRD001/materials-forming-machining/materials-forming-machining>.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17.

V Brně, dne 7. 11. 2016



---

prof. Ing. Ivo Dlouhý, CSc.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **Abstrakt**

Cieľom bakalárskej práce je spracovať prehľad materiálov s tvarovou pamäťou na báze kovu. V prvej časti bakalárskej práce som sa vyjadril k histórii a problematike princípu materiálov s tvarovou pamäťou. V druhej časti som tieto materiály rozdelil podľa štruktúrneho hľadiska a zaoberal sa najpoužívanejším pamäťovým materiálom v praxi. Uviedol som jeho výhody a nevýhody. Ďalšia časť bola venovaná výrobe, tepelnému a mechanickému spracovaniu. Následne som uviedol najpoužívanejšie aplikácie v praxi. Na záver som sa vyjadril k budúcnosti materiálov s tvarovou pamäťou.

## **Kľúčové slová**

Materiál s tvarovou pamäťou, superelastická

## **Abstract**

The main aim is an overview of process in a shape memory metal-based materials. In the first part of the thesis, I commented on the issue of history and principle of shape memory materials. In the second part I have divided this materials by a structural point of view, dealing with the most widely used memory material in practice. I pointed out its advantages and disadvantages. Another part was devoted to the production, thermal and mechanical processing. Then I said the most used application in practice. Finally, I commented on the future shape memory materials.

## **Keywords**

Shape memory alloy - SMA, superelasticity

## **Bibliografická citácia**

SABELA, J. *Slitiny s tvarovou pamětí*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 27 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Karel Němec, Ph.D..



## **Prehlásenie**

Prehlasujem, že som bakalársku prácu na tému „Zliatiny s tvarovou pamäťou“ vypracoval samostatne, pod vedením vedúceho bakalárskej práce, s použitím odbornej literatúry a prameňov uvedených v zozname literatúry na konci bakalárskej práce.

V Brne, dňa 14.3.2017

.....

Jakub Sabela

## **Pod'akovanie**

Ďakujem vedúcemu bakalárskej práce Ing. Karlovi Němcovi, Ph.D. za pedagogickú a odbornú pomoc pri tvorbe mojej bakalárskej práce a taktiež rodine za materiálnu a morálnu podporu.

V Brne, dňa 14.3.2017

Jakub Sabela

## Obsah

Úvod.....	1
<b>1 História .....</b>	<b>2</b>
<b>2 Charakteristika materiálu .....</b>	<b>3</b>
2.1 Tvarová pamäť .....	3
2.1.1 Jednocestný tvarový efekt ( <i>Shape Memory Effect – SME</i> ).....	3
2.1.2 Dvojcestný tvarový efekt ( <i>Two-Way Shape Memory Effect, TWSME</i> ).....	4
2.1.3 Superelasticita.....	5
2.2 Druhy materiálov s tvarovou pamäťou.....	8
<b>3 Výrobný proces materiálu.....</b>	<b>16</b>
3.1 Odlievanie.....	16
3.2 Tepelné spracovanie .....	16
3.3 Mechanické spracovanie .....	17
3.4 Obrábanie .....	17
3.4.1 Konvenčné obrábanie.....	18
3.4.2 Nekonvenčné obrábanie .....	18
<b>4 Aplikácie pamäťových materiálov v praxi .....</b>	<b>19</b>
<b>5 Budúcnosť pamäťových materiálov .....</b>	<b>23</b>
<b>Záver.....</b>	<b>24</b>
<b>Zoznam použitej literatúry.....</b>	<b>25</b>
<b>Zoznam použitých skratiek a symbolov .....</b>	<b>27</b>

## Úvod

Pamäťové kovy sú materiály, ktoré si „pamätajú“ svoj pôvodný tvar. Zaraďujú sa do skupiny „chytrých materiálov“. Toto označenie vyplýva zo schopnosti materiálu reagovať predom určeným spôsobom na vybranú zmenu vonkajších podmienok.

Materiál s tvarovou pamäťou (shape memory alloy – SMA) je názov materiálu, ktorý má nezvyčajnú vlastnosť, zvanú tvarová pamäť. Podstatou je prechod materiálu z jednej kryštalickej štruktúry na druhú pri danej transformačnej teplote. Ide o martenzitickú transformáciu z pôvodnej austenitickej štruktúry. Pri mechanickom namáhaní vykazujú tieto kovy ďalšiu zaujímavú vlastnosť - superelasticitu (pseudoelasticitu). Obrovskou prednosťou je elastická (vratná) deformácia. U bežných kovov nepresiahne hodnotu väčšiu ako 1 %, u materiálov s tvarovou pamäťou môže dosiahnuť hodnotu 15 % [1].

K týmto materiálom patrí aj NiTi. Je to intermetalická zlúčenina, ktorá má široké uplatnenie v množstve odvetví, ako sú napríklad lekárstvo, robotika, spojovacia technika a iné.

# 1 História

V roku 1932 A. Ölander ako prvý pozoroval pseudoelastické správanie pamäťových materiálov na Au-Cd zliatine. V roku 1938 Greninger a Mooradian sledovali vznik a zánik martenzitickej fázy pri znižovaní a zvyšovaní teploty Au-Cd zliatiny. Avšak, bolo to oveľa neskôr, keď Chang a Read ako prví uverejnili slovné spojenie „zotavenie tvaru“, pri skúmaní Au-Cd zliatiny [2].

V roku 1963 William J. Buehler, zamestnanec U. S. Naval Ordnance Laboratory, uverejnil termín „tvarová pamäť“ ako materiálovú vlastnosť Ni-Ti zliatiny. Túto intermetalickú zlúčeninu nazval podľa zloženia a miesta objavu ako NiTiNOL [2]. Jej znamenité vlastnosti boli objavené úplnou náhodou. V skutočnosti to bol objav, ktorý našťastoval záujem vo využití pamäťových materiálov. Cez šesťdesiate roky dvadsiateho storočia sa postupne laboratórne pokusy začali aplikovať do inžinierskej praxe.

T. W. Duerig rozdelil metódy pamäťových tepelných účinkov do troch kategórií:

## **Voľné zotavenie:**

- Zliatina je trvalo napätá a pôsobením tepla sa zotavuje jej pôvodný tvar až do následného ochladenia [2].

## **Obmedzené zotavenie:**

- Úplnému uzdraveniu tvaru zliatiny je zabránené, a tým sa vytvára tlak na obmedzený prvok [2].

## **Zotavenie aktivátoru:**

- Zliatina je schopná obnoviť svoj tvar, ale pôsobí proti pôsobiacemu zaťaženiu. Výsledkom je, že zliatina koná prácu [2].

Duerig taktiež uvažoval použitie superelastivity nasledujúcim spôsobom:

## **Zotavenie superelasticitou**

- Superelastické obnovenie zahŕňa ukladanie potenciálnej energie cez pomerne veľké, ale zotaviteľné deformácie. Ide o jedinú izotermickú aplikáciu pamäťového efektu [2].

Ďalšiu skupinu tvoria feromagnetické zliatiny s tvarovou pamäťou (FSMA – ferromagnetic shape memory alloys), ktoré majú v silnom magnetickom poli schopnosť meniť tvar. Magnetická reakcia týchto materiálov je efektívnejšia a rýchlejšia ako pri materiáloch, ktoré reagujú na tepelné zmeny.

Rýchle rozvíjajúcou sa skupinou sú aj polyméry s tvarovou pamäťou (shape memory polymers – SMP). Používanie tohto termínu sa datuje od roku 1984 [3]. Je to pomerne mladý typ materiálu, ktorý má ale veľký prísľub do budúcnosti vďaka nižšej cene ako SMA, jednoduchšej výrobe a lepšej pamäťovej schopnosti.

## 2 Charakteristika materiálu

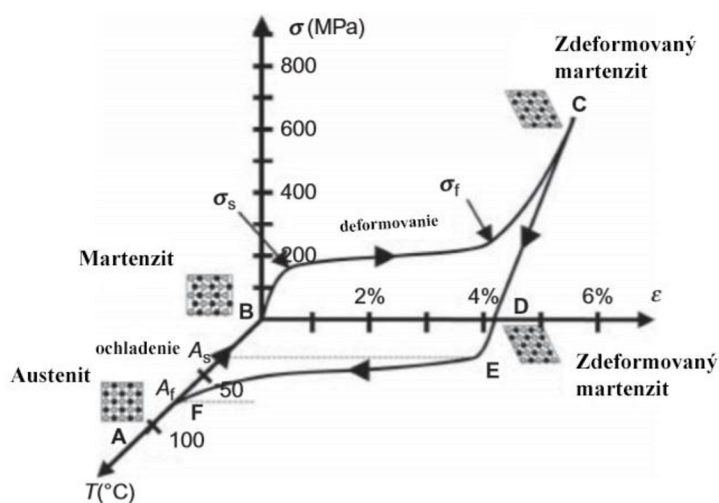
### 2.1 Tvarová pamäť

Tvarová pamäť je jav, pri ktorom dochádza k zotaveniu plastických pretvorení v pôvodne deformovanom nízkoteplotnom materiáli (pod  $M_s$  resp. pod  $M_f$ , teda pod teplotu počiatku, respektíve konca martenzitickej fázovej transformácie) a to prostredníctvom austeniticko-martenzitickej fázovej premeny. Teda, deformovaný materiál martenzitickej štruktúry sa môže vrátiť späť do nedeformovateľného stavu zohriatím do prvotného vysokoteplotného austenického stavu [1].

Pamäťový efekt môže byť jednocestný alebo dvojcestný. Taktiež sa vyznačuje pozoruhodnou vlastnosťou zvanou superelastickosť (pseudoelastickosť).

#### 2.1.1 Jednocestný tvarový efekt (Shape Memory Effect – SME)

Ide o najjednoduchší prípad pamäťového efektu. Princíp jednocestného tvarového efektu je ilustrovaný na NiTi drôte, testovanom pod jednoosovým ťahovým napätím. Znázorňuje ho obr. 2.1. Počiatočná austenitická štruktúra materiálu je charakteristická vysokou teplotou (bod A). Ochladením pod teploty  $M_s$  (martenzit štart) a  $M_f$  (martenzit finiš) sa austenitická štruktúra mení na martenzitickú, pričom nedochádza k makroskopickej zmene rozmeru (bod B). Martenzit je v pamäťových materiáloch oproti martenzitu v uhlíkových oceliach mäkký a tvárny. Vzorka je následne namáhaná jednoosovým ťahovým napätím. Napätie vo vzorke postupne narastá, až dosiahne hodnoty, pri ktorej dôjde k reorientácii zŕn materiálu ( $\sigma_s$ ). Je nutné dodať, že napätie potrebné pre tento proces je ďaleko menšie než je plastická medza klzu martenzitu. Proces reorientácie zŕn je ukončený pri konečnom napätí ( $\sigma_f$ ). Pamäťový efekt je možné opakovať až po deformácii martenzitu (bod C). Táto deformácia však nesmie prekročiť určitú medzu, pri ktorej by už došlo ku generácii dislokácií (prekročením tejto medze je deformácia nevratná, takže následným ohrevom nevymizne). Zamedzením pôsobenia vonkajšieho napätia na zdeformovaný martenzit zmizne elastická zložka deformácie, kým plastická deformácia ostáva (bod D). Zahriatím tejto štruktúry nad teplotu  $A_s$  (austenit štart – bod E) a teplotu  $A_f$  (austenit finiš – bod F) sa štruktúra transformuje na vysokoteplotnú austenitickú štruktúru [1].



Obr. 2.1 Jednoosové zaťažovanie NiTi vzorky [1]

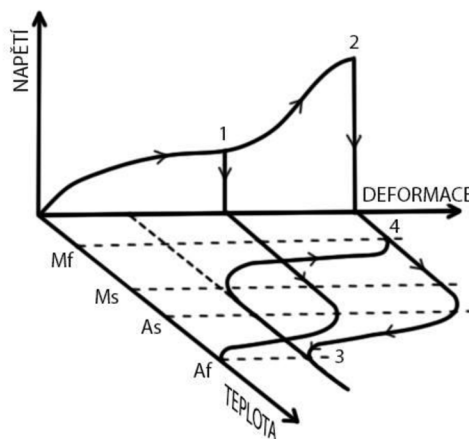
### 2.1.2 Dvojcestný tvarový efekt (Two-Way Shape Memory Effect, TWSME)

Počas jednocestného pamäťového javu je zapamätateľný iba jeden tvar zliatiny, a to konkrétne vysokoteplotná austenitická fáza. Pamäťové materiály môžu byť spracované tak, aby boli schopné zapamätať si obidve štruktúry, austenitickú aj martenzitickú.

Dvojcestný efekt sa spolieha plne na mikroštruktúralne zmeny cez martenzitickú premenu vplyvom vonkajšieho zaťaženia. Ochladením materiálu sa štruktúra zmení na zdeformovaný martenzit (dochádza k zmene makroskopického rozmeru), v ktorom pôsobia vnútorné pnutia a ohriatím nad transformačné teploty sa zdeformovaný martenzit mení opäť na austenit. Tento jav je znázornený na obr. 2.2 (body 3-4 a 4-3) [4].

Je zjavné, že dvojcestnému efektu chýba martenzitický tvar v nedeformovateľnom stave. To je zapríčinené práve pôsobiacim vonkajším zaťažením. Vratná deformácia pri TWSME je menšia ako v prípade SME, preto je jej využitie v praxi menšie.

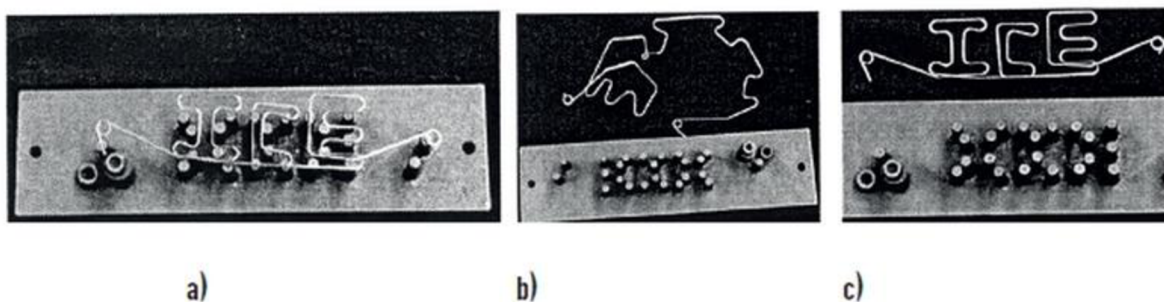
Na princípe dvojcestného tvarového efektu pracujú predovšetkým pamäťové pružiny. Dvojcestný tvarový efekt je možné získať niekoľkonásobným opakovaním jednocestného tvarového efektu, takzvaným tréningom. Ak je však odpor materiálu voči zmene tvaru vysoký, dvojcestná tvarová pamäť sa môže stratiť [4].



Obr. 2.2 Znáozornenie tvarovo pamäťového javu a vratného tvarovo pamäťového javu [4].

## „Tréning“ pamäťových materiálov

„Tréningom“ sa rozumie deformácia materiálu s tvarovou pamäťou do požadovaného tvaru. Takto zdeformovaný materiál sa mechanicky zafixuje a žiha pri určitej teplote. Čas žihania závisí na štruktúre materiálu, nakoniec nasleduje ochladenie. Výsledkom je rýchla zmena austenitickej štruktúry na martenzitickú bez makroskopickej zmeny tvaru. Tento proces je znázornený na obr. 2.3 [5].



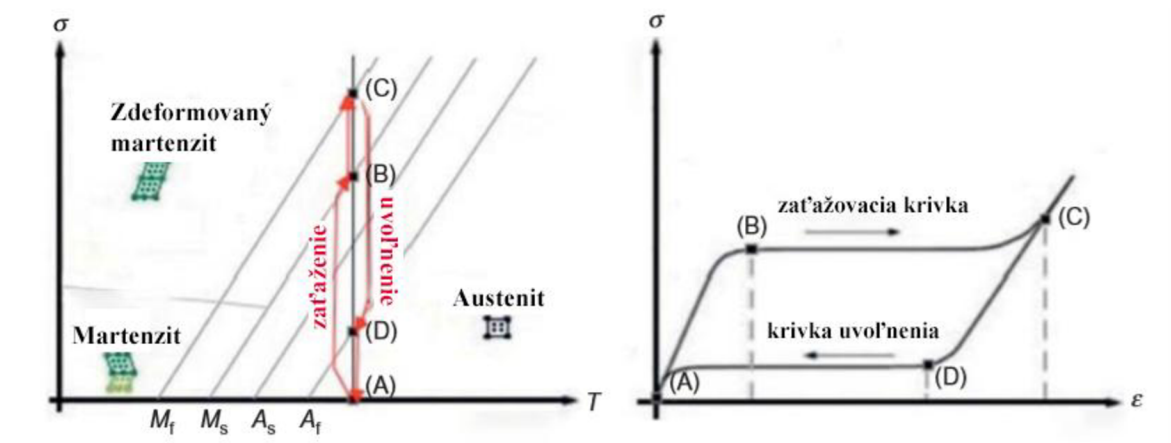
Obr. 2.3

- a) zafixovaná a vyžihaná vzorka zo SMA materiálu, žihaná 15 min na 500°C
- b) ochladená a zdeformovaná vzorka
- c) zahriata vzorka nad transformačné teploty  $A_s$  a  $A_f$  [5].

### 2.1.3 Superelasticita

Superelasticita (tiež nazývaná ako pseudoplasticita) je jednou z najdôležitejších vlastností, ktorú vlastní SMA materiály. Superelastické materiály sa pôsobením vonkajšieho zaťaženia začínajú deformovať. Po odstránení deformačného napätia sa znova vrátia do pôvodného tvaru. Tento druh deformácie sa nazýva vratná deformácia. Dôvodom obnovy tvaru materiálu je zotavenie deformačného pretvorenia. Takýto úkaz je charakteristický pre transformáciu zdeformovaného martenzitu na austenit. Transformácia prebieha za konštantnej teploty, ktorá je nad  $A_f$ . Pre lepšie objasnenie slúži obr. 2.4. Z grafu je viditeľné, že z bodu A je materiál zaťažený pri konštantnej teplote, je v stave stabilnej austenitickej fázy. Do bodu B je deformácia elastická, v tomto bode začína martenzitická premena. Premena prebieha pod stálym vonkajším napätím, zatiaľ čo sa napätie v štruktúre neustále zvyšuje, až dosiahne bod C. Tým je transformácia austenitu na martenzit dokončená. Krivka medzi bodmi B a C je nazývaná ako napäťové „plató“. Plató predstavuje dodatočnú napäťovo indukovanú nepružnú deformáciu súvisiacu s reorientáciou variant martenzitu za vzniku určitého oneskorenia na zázname. Rozdielne správanie zaťažovacej krivky medzi bodmi B a C spôsobuje teplotná hysterézia. Pokračujúce zaťažovanie z bodu C by viedlo iba k pružnej deformácii zdeformovaného martenzitu. Nakoniec, po odstránení zaťaženia, sa materiál vracia do austenitickej stabilnej štruktúry, po tom, čo sa plne transformuje v bode D [1].

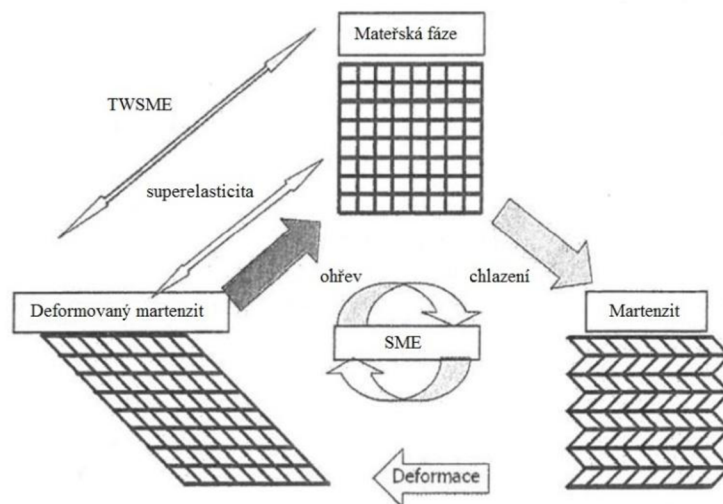




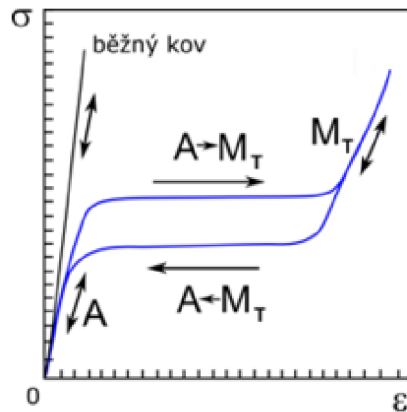
Obr. 2.4 Závislosť napätie – teplota (vľavo), závislosť napätie – deformácia (vpravo) [1].

K pseudoelasticite dochádza iba ak je matrica na začiatku v plno austenitickom zložení, a to len do určitej teploty  $M_d$ . Nad teplotou  $M_d$  sa už martenzit nebude vytvárať, aj keby bolo zaťaženie akokoľvek veľké [6].

Superelasticita sa výrazne odlišuje od elasticity množstva materiálov, líši sa ich mechanizmus. Na rozdiel od mechanizmu popísaného vyššie, sa mechanizmus typických používaných materiálov riadi Hookovým zákonom – obr.2.6. Hodnoty elasticity väčšiny typických materiálov sú nad 0,5 %. Feromagnetické materiály s tvarovou pamäťou SMA majú elasticitu vyššiu než 13 %. Jednoduché kryštalické materiály môžu dosiahnuť hodnotu 15 % a vyššie [1].



Obr. 2.5 Znázornenie jednocestného, dvojcestného tvarového efektu a superelasticity [4].



Obr. 2.6 Porovnanie elasticity [5].

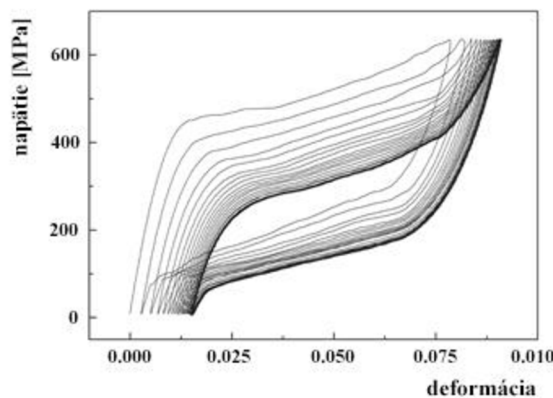
### Únava materiálov s tvarovou pamäťou (SMA)

Opakujúce sa tepelno-mechanické cykly spomenuté vyššie, ako aj superelasticita či tepelné fázové premeny pod vplyvom vonkajšieho zaťaženia, sú zdrojom predčasnej únavy materiálu. Únava je prisudzovaná viacerým faktorom. Medzi ne patria tepelné spracovanie materiálu (odlievanie, tepelné spracovanie, ...), pracovné podmienky (napätie, deformácia, ...), transformáciou indukované mikroštrukturálne zmeny (defekty na hraniciach zŕn) a environmentálne faktory (teplota, vlhkosť) [1].

Opakovaným zaťažovaním materiálu, či už mechanicky alebo tepelne, sa objavujú mikroštrukturálne zmeny. Tie pomaly degradujú správanie pamäťových materiálov (SMA).

Ďalšie faktory, ktoré majú veľký vplyv na únavu sú kryštalografická orientácia a veľkosť precipitátov. Za určitých podmienok môžu byť tieto faktory odstránené tepelným spracovaním. Je potrebné poznamenať, že podmienky, ktoré nie sú optimálne, môžu indukovať procesy ako sú korózia a oxidácia. Tie vedú k veľmi rýchlemu kryštalografickému poškodeniu, a teda k nižšej únavovej životnosti pamäťových materiálov SMA [1].

Podľa obr. 2.7 sa napäťové platá znižujú v dôsledku cyklickej záťaže. Vrchné plató sa znižuje rýchlejšie ako spodné. Takýto druh správania vychádza z opakovanej plastickej deformácie, ktorá vzniká počas premeny pevnej fázy na pevnú fázu (austenit na martenzit) [7].



Obr. 2.7 Závislosť napätia na predĺžení a počtu cyklov pamäťových materiálov [7].

## 2.2 Druhy materiálov s tvarovou pamäťou

V súčasnosti narastá počet objavených materiálov s tvarovou pamäťou, ale iba zliatiny s tvarovou pamäťou na bázy Cu a NiTi boli využívané v praxi. Zďaleka najvyužívanejšie zliatiny v súčasnosti sú NiTi zliatiny. Vďaka ich skvelej odolnosti voči korózii a širokým pamäťovým vlastnostiam sa radia na vrchol v komerčnom využití.

Dôkladné odliatie a spracovanie materiálov umožňuje presnejšiu kontrolu ich vlastností, ktorými sú hlavne aktivačná teplota (teploty fázových premien), pevnosť a ich pracovný výkon [2].

Materiály založené na bázy Cu majú vyššie aktivačné teploty (v rozpätí  $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) než NiTi zliatiny. Vďaka tomu sa využívajú v prostredí s vysokou teplotou. Prakticky zotaviteľná deformácia u polykryštalických materiálov sa pohybuje od 3 % u Cu-Al-Ni zliatinách, u Cu-Zn-Al zliatinách do 4 %. Negatívom je slabá korózna odolnosť a nízka pevnosť. Priaznivá je však cena a proces výroby [2].

NiTi zliatiny vykazujú najlepšiu schopnosť zotavenia deformácií, ale všeobecne majú nízky rozsah aktivačnej teploty (v rozpätí  $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). S týmito zliatinami sú ľahko dosiahnuteľné plne zotaviteľné pretvorenia pri 7 %. Pozitívom je aj vysoká korózna odolnosť a pevnosť [2].

Ďalšie zliatiny vyznačujúce sa pamäťovými efektmi sú v tab. 1 [4]:

Tab. 1 Zliatiny s tvarovou pamäťou.

Zliatina	Zloženie	Teplotná hysterezia	Teplotná oblasť použitia
Ag-Cd	44 – 49 at. % Cd	$15\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-190$ až $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$
Au-Cd	46,5 – 50 at. % Cd	$15\text{ }^{\circ}\text{C}$	$30$ až $100\text{ }^{\circ}\text{C}$
Cu-Al-Ni	28 29 at. % Al, 3 – 4,5 at. % Ni	$35\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-140$ až $100\text{ }^{\circ}\text{C}$
Cu-Sn	15 at. % Sn		$-120$ až $30\text{ }^{\circ}\text{C}$
Cu-Zn	38,5 – 41,5 at. % Zn	$10\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-180$ až $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$
Cu-Zn-Me (Si, Mn, Al)	niekoľko at. % Me	$10\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-180$ až $200\text{ }^{\circ}\text{C}$
In-Tl	18 – 23 at. % Tl	$4\text{ }^{\circ}\text{C}$	$60$ až $100\text{ }^{\circ}\text{C}$
Ni-Al	36 – 38 at. % Al	$10\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-180$ až $100\text{ }^{\circ}\text{C}$
Ni-Ti	49 – 51 at. % Ni	$30\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-50$ až $110\text{ }^{\circ}\text{C}$
Fe-Pt	25 at. % Pt	$4\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-130\text{ }^{\circ}\text{C}$
Mn-Cu	5 – 35 at. % Cu	$25\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-250$ až $180\text{ }^{\circ}\text{C}$
Fe-Mn-Si	30 hm. % Mn, 5 % Si	$100\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-200$ až $150\text{ }^{\circ}\text{C}$

## Nitinol

### Kryštalická štruktúra

Ako už bolo uvedené na začiatku, Nitinol je názov pre intermetalické zlúčeniny vykazujúcich výbornú tvarovú pamäť. Sú založené na NiTi bázy. Tieto intermetalické zlúčeniny kryštalizujú vo vychádzajúcej fáze B2. Ide o kubickú, priestorovo centrovanú štruktúru. Po zakalení alebo pomalom ochladení zostáva B2 fáza až do pokojových teplôt. Za tejto teploty má B2 fáza štruktúru s mriežkovou konštantou 0,3015 nm [4]. Táto vysokoteplotná fáza sa ochladzovaním mení na nízokoteplotnú monoklinickú martenzitickú štruktúru označovanú ako B19' alebo romboedrickú fázu – R-fázu.

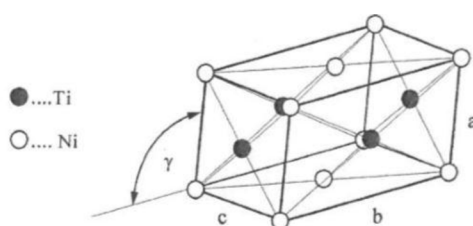


Obr. 2.8 Kryštalická mriežka B2 fáze [4].

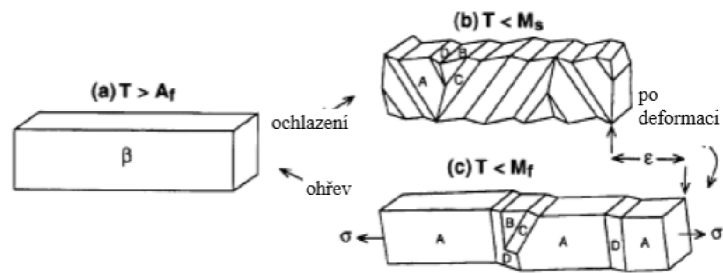
#### a) Martenzitická B19' fáza

Vratná deformácia monoklinického B19' martenzitu je dôležitou súčasťou pamäťového efektu u NiTi zliatinách. Pri deformačných procesoch vznikajú rôzne varianty martenzitu (až 24) a sú aktivované rôzne dvojčatové systémy. Aplikovaním napätia sa všetky varianty zrna zlúčia do jednej varianty (obr. 2.10). Transformácia B2 fázy na B19' fázu je sprevádzaná výrazným znížením napäťovej deformácie materiálu. V dôsledku menšej súmernosti martenzitu a vysokoteplotného austenitu je deformácia vratná pri ohreve na vysokú teplotu.

Mriežkové parametre sú:  $a=0,2885$  nm,  $b=0,4622$  nm,  $c=0,4120$  nm,  $\gamma=96,8^\circ$  [4].



Obr. 2.9 Elementárna bunka martenzitickej fázy s monoklinickou B19' štruktúrou [4].



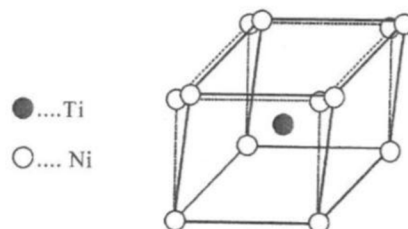
Obr. 2.10 Schéma zmien v mikroštruktúre.  $\beta$  fáza (B2 fáza) sa mení na:

- (a) martenzit so samo-prispôsobivými dvojčatovými variantami A,B,C,D
- (b) pri aplikácii napätia sa stáva dominantná varianta A
- (c) pri ohreve sa materiál vracia na  $\beta$  fázu (B2 fázu) a obnovuje svoj pôvodný tvar [8].

### b) Romboedrická R-fáza

Pri ochladzovaní B2 fázy dochádza za určitých podmienok k vzniku romboedrickej fázy. Je to martenzitická premena, ktorá konkuruje premene  $B2 \leftrightarrow B19'$ , vďaka dobrej superelastícite a tvarovej pamäti [4].

R-fáza vzniká pretiahnutím bunky B2 v smere  $\langle 1 \ 1 \ 1 \rangle$  (obr. 2.11). Premena je sprevádzaná malou hystereziou a nízkym napätím. Výskyt R-fázy v NiTi zliatine závisí na chemickom zložení zliatiny alebo na napätových poliach, ktoré sa indukujú pri vznikajúcich dislokáciách alebo koherentných precipitátov v dvojzložkovej zliatine [4].



Obr. 2.11 Romboedrická R-fáza (plná čiara) a B2 štruktúra vysokoteplotnej fázy (čiarkované) [4].

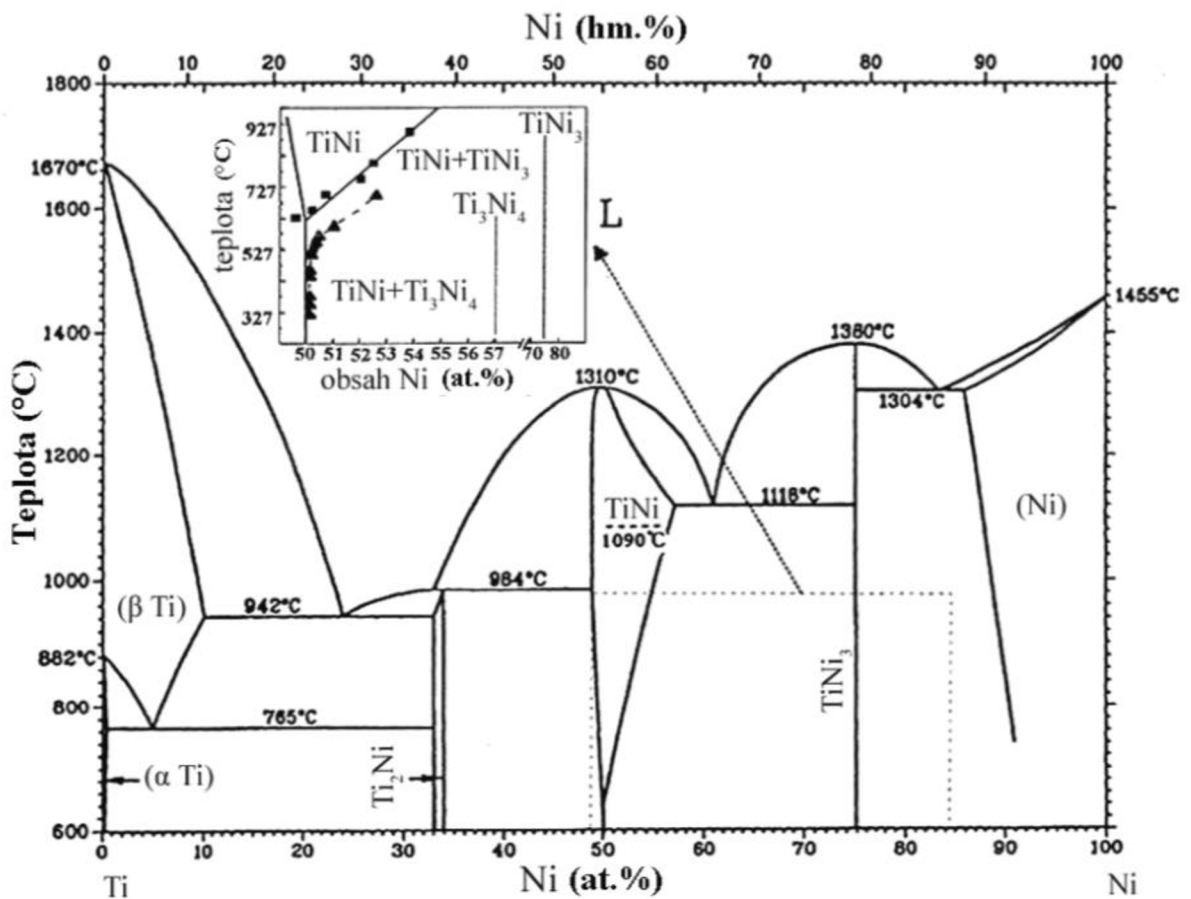
Martenzitická transformácia však nie je nutná pre jav tvarovej pamäti. Aby došlo k javu tvarovej pamäti, sú nutné nasledovné podmienky:

- vratnosť martenzitickej transformácie,
- hysterezia javu nesmie byť príliš veľká,
- interval teplôt nesmie byť príliš veľký.

## Všeobecná charakteristika

Vlastnosti materiálu na bázy NiTi sú oveľa viac citlivejšie ako vlastnosti bežných materiálov na chemické zloženie, tepelno-mechanické spracovanie a štruktúru. Na zmenu transformačnej teploty  $M_s$  o niekoľko stupňov stačí veľmi malá odchýlka v chemickom zložení. Napríklad, zmena obsahu Ni o 0,1 at. % vyvolá zmenu teploty  $M_s$  o 10 – 15 °C. Zmenou zloženia zliatiny v rozmedzí 49 až 51 at. % Ni možno takýmto spôsobom meniť teplotu  $M_s$  od -200 °C do 120 °C. Teploty fázových premen závisia taktiež na počiatocnej deformácii. So zvyšujúcim množstvom deformácií v štruktúre sa zväčšuje teplotný interval začiatku a konca martenzitickej premeny. Počas tepelného spracovania sa môžu dostať do materiálu aj nečistoty. Medzi škodlivé prvky patria napríklad kyslík, dusík, uhlík, vo väčšom množstve tvoria vmestky ako  $Ti_4C$ ,  $TiN$ . V dôsledku ich vzniku dochádza k zmene chemického zloženia, pretože na seba viažu Ti a jeho množstvo v matrici sa znižuje [4].

## Rovnovážny binárny diagram Ni-Ti



Obr. 2.12 Rovnovážny binárny diagram Ni-Ti [6]

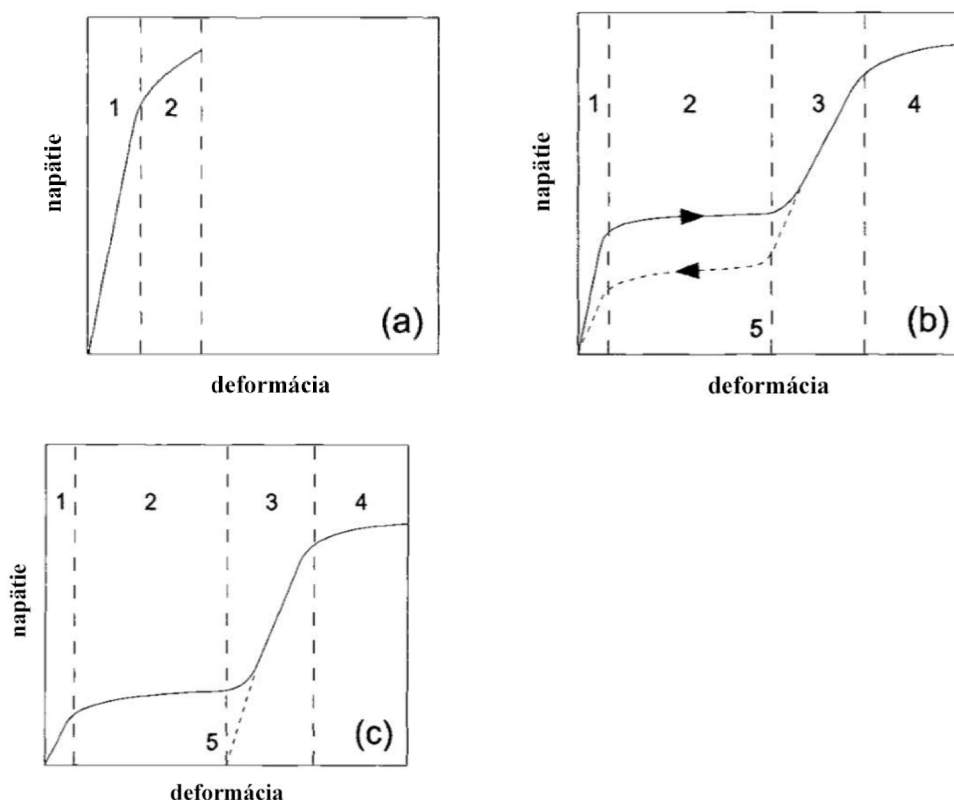
## Mechanické vlastnosti

Mechanické vlastnosti NiTi zliatin sú závislé na okolitej teplote prostredia, fáze zliatiny a jej transformačných teplotách.

Obr. 2.13(a) reprezentuje správanie zliatiny v materskej – austenitickej fáze pri teplote nad  $M_d$  (netvorí sa martenzit napät'ovou indukciou). Krivka v časti 1 zastupuje lineárnu deformáciu, elastická deformácia je približne 0,5 %. V časti 2 dochádza k plastickej deformácii. Takýto typ chovania je charakteristický pre bežné kovové zliatiny [2].

Obr. 2.13(b) charakterizuje správanie zliatiny pri teplote nad  $A_f$ , ale zároveň pod  $M_d$ . Štádium 1 znázorňuje prvotné elastické zaťažovanie v materskej fáze. Ďalšia deformácia vedie k indukcii martenzitu. Ak je zliatina uvoľnená, dôjde k zotaveniu v štádiu 2. V štádiu 3 vzniká elastická deformácia napät'ovo-indukovaného martenzitu, až kým sa neobjaví prvá plastická deformácia – štádium 4 [2].

Obr. 2.13(c) znázorňuje zliatinu testovanú pri teplote pod teplotou  $M_f$ . Počiatočnou štruktúrou je nezdeformovaný martenzit. Štádium 1 sa vyznačuje veľmi malou záťažou, martenzit sa deformuje elasticky. Varianty martenzitu sa preskupujú pri konštantnom napätí, až kým nie je reorientácia dokončená v štádiu 2. Následné zaťažovanie spôsobí elastickú deformáciu martenzitických variant v štádiu 3. Eventuálna trvalá plastická deformácia vzniká v štádiu 4. Ak je zliatina uvoľnená v štádiu 2 alebo 3, elastická deformácia zmizne (štádium 5) a ostane iba trvalá deformácia, ktorá sa následne uzdraví zohriatím, vid' jednocestný tvarový efekt [2].



Obr. 2.13 Deformačné správanie NiTi zliatin pri teplotách: (a) nad  $M_d$ ; (b) nad  $A_f$ , no pod  $M_d$ ; (c) pod  $M_f$  [2].

## **Korózne vlastnosti a biokompatibilita**

Medzi výhody NiTi zliatin spomedzi komerčných pamäťových materiálov je výborná odolnosť voči korózii. Na povrchu materiálu sa vytvára oxidická vrstva  $\text{TiO}_2$  (oxid titaničitý), ktorá chráni materiál pred koróziou. Tento ochranný film je rovnaký ako ten, ktorý sa vytvára u čistého titánu. Vrstva je odolná voči veľkému množstvu korózných napadnutí a je stabilná. Poškriabaním vrstvy na základný materiál je oxidická vrstva schopná obnoviť povlak, je to však zdĺhavé [2].

Korózna odolnosť NiTi zliatin viedla k rozsiahlym štúdiám na biokompatibilitu týchto materiálov a množstvu aplikácií v medicíne. Využitie našli v ortodoncii, ortopédii a kardiovaskulárnej chirurgii. Prvé aplikácie sa objavili už v 70-tych rokoch [4]. Napriek uvedeným pozitívam sa používanie zliatin brzdilo v dôsledku nedostatku znalostí o ich biokompatibilite. Biokompatibilné materiály nesmú spôsobovať žiadne reakcie s ľudským telom, nesmú byť karcinogénne ani toxické, musia byť chemicky stabilné.

Ak je pasivačná vrstva porušená, dochádza vplyvom korózie k zvýšenému uvoľňovaniu Ti a Ni zo štruktúry. V prípade čistého Ti neprichádza v ľudskom tele k nežiaducim účinkom. Na druhej strane Ni vyvoláva v ľudskom tele rakoviny a vznik nekrózy tkanín. Ni vyvoláva väčšie alergické reakcie ako iné kovy. K zamedzeniu uvoľňovania prvkov sa používa v praxi povlakovanie [4].



Tab. 2 Porovnanie vlastností intermetallickej zliatiny Ni-Ti so zliatinami na báze Cu-Zn-Al [4]:

Vlastnosti	Jednotky	Ni-Ti	Cu-Zn-Al
Fyzikálne			
Teplota topenia	°C	1240 – 1310	950 – 1020
Hustota	g.cm <sup>-3</sup>	6,4 – 6,5	7,64 – 8,0
Tepelná vodivosť pri 293K	W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>	10 – 18	120
austenit	W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>	18	120
martenzit	W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>	8,6	/
Koef. tepelnej rozťažnosti	10 <sup>-6</sup> .K <sup>-1</sup>	6,6 – 10	17
austenit	10 <sup>-6</sup> .K <sup>-1</sup>	10 – 11	/
martenzit	10 <sup>-6</sup> .K <sup>-1</sup>	6,6	16 – 18
Merné teplo	J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>	450 – 620	390 – 400
Transformačná entalpia	J.kg <sup>-1</sup>	(19 – 28).10 <sup>3</sup>	(7 – 9).10 <sup>3</sup>
Odolnosť voči korózii	-	výborná, porovnateľná s čistým Ti	nízka, podobná hliníkovým bronzom
Biologická kompatibilita	*	výborná	zlá
Odolnosť voči opotrebeniu	*	dobrá	/
Mechanické			
Youngov modul E	GPa	70 – 98	70 – 100
austenit	GPa	70 – 98	70 – 100
martenzit	GPa	/	70
Šmykový modul G (austenit)	GPa	27	/
Medza klzu	MPa	410	/
austenit	MPa	100 – 800	150 – 350
martenzit	MPa	50 – 300	80 – 300
Pevnosť v ťahu	MPa	800 – 1500	400 – 900
Martenzit	MPa	700 – 1100 (žiháný) 1300 – 2000 (nežiháný)	/
Predĺženie pri utrnutí	%	30 – 50	10 – 15
austenit	%	15 – 20	/
martenzit	%	20 – 60	10 – 15
Únavová pevnosť N=1000000	MPa	350	270

Vlastnosti	Jednotky	Ni-Ti	Cu-Zn-Al
Mechanické			
Veľkosť zrna	μm	1 – 100	50 – 150
Elastická anizotropia 2.C44.(C11-C22)-1	*	2	15
Technologické			
Topenie, odlievanie a kontrola zloženia	*	zložité, vo vákuu	uspokojivé, vzduch
Tvárenie (valcovanie, pretlačovanie)	*	za tepla, zložité až veľmi zložité	za zvýšených teplôt, celkom ľahké až ľahké
Tvárenie za studena	*	Uspokojivé, podľa niektorých zdrojov zložité	obmedzené
Obrábateľnosť	*	zložitá, zlá	dobrá, jednoduchá

### 3 Výrobný proces materiálu

#### 3.1 Odlievanie

Veľké množstvo SMA materiálov je odlievané vo forme polotovaru. Druh polotovaru rozhoduje o tom, aká odlievacia metóda sa použije. Medzi najbežnejšie druhy patria ingoty, tabule, pásy, drôty, tyče a fólie. Väčšina z týchto druhov polotovarov vzniká kontinuálnym liatím s rýchlym tuhnutím, ako je napríklad tavné zvlákňovanie a odlievanie medzi dvomi valcami [9].

Tavenina je pripravená osobitným roztavením jednotlivých komponentov v príslušných stechiometrických pomeroch. Malé zmeny v množstve jednotlivých prvkov vedú k zmene požadovanej štruktúry, a tým aj k veľkým odlišnostiam jej vlastností. To isté platí, aj keď do štruktúry zavádzame prídavný, tretí prvok. Keď sú prvky v správnom množstve, sú zmiešané v jednu zmes a následne odliate príslušnou metódou na požadovaný tvar. Aby mal výsledný materiál vhodnú homogenitu, občas sa niekoľkokrát pretavuje [1].

Veľkou hrozbou pri spracovaní zliatiny je prítomnosť znečisťujúcich faktorov. Nízka čistota originálneho materiálu uľahčuje nečistotám vstúpiť do ich štruktúry počas výrobného procesu. Avšak, vysoká čistota materiálu potlačuje tento problém. Aby sa zabránilo kontaminácii, tavenie a odlievanie prebieha v ochrannej atmosfére obsahujúcej argón alebo iný vzácny plyn vytvárajúci plazmu. Okrem toho sa používa aj vákuum. Jeho využitie je praktickejšie z dôvodu vysokej reaktivity titánu. Pri metóde vo vákuu hrá rozhodujúcu rolu na kvalitu ingotu kelímok, do ktorého sa tavenina odlieva. Kelímky z  $\text{Al}_2\text{O}_3$  a  $\text{MgO}$  sa nepoužívajú z dôvodu obsahu kyslíka. Kyslík zapríčiňuje nežiadúci vznik oxidov pri tuhnutí taveniny. Vhodný kelímok pozostáva z grafitu. Nečistoty majú značný efekt na kvalitu vyrobeného polotovaru, robia materiál nepredvídateľným a menia tranzitné teploty  $M_s, M_f, A_s, A_f$  [4][1].

Po odliatí materiálu nasleduje tuhnutie taveniny. Tepelný tok z taveniny je vysoký vďaka ochladzovaciemu médiu, ktoré cirkuluje po vyňatí z formy alebo rýchlym namáčaním formy s taveninou v chladiacom médiu. Ako médiá sa používajú voda a kvapalný dusík. Veľmi rýchle ochladenie však môže spôsobiť vznik úplnej martenzitickej fázy. Extrémnym ochladením taveniny vznikajú vady. Homogenita vzniknutého polotovaru sa zhoršuje tým viac, čím je rýchlosť ochladzovania väčšia. Preto nasleduje po stuhnutí tepelné spracovanie [1].

#### 3.2 Tepelné spracovanie

Podstatou tepelného spracovania je zmena mikroštruktúry tak, aby boli dosiahnuté požadované vlastnosti SMA materiálu, menia sa fyzikálne a chemické vlastnosti. Mechanizmus, akým sa riadia SMA materiály, je vysoko ovplyvnený práve tepelným spracovaním. Ako už bolo uvedené, po odliatí nie je homogenita štruktúry dostatočne vysoká. Čím je materiál menej homogénny, tým je jeho tvrdosť vyššia, a tým pádom sa znižuje kujnosť. Preto sa polotovar žiha. Žihaním sa homogenita materiálu zvyšuje. Je to proces, pri ktorom sa polotovar zahreje na určitú teplotu a prebieha výdrž pri tejto teplote na určitý čas. Homogenita je závislá na čase výdrže. Negatívnym účinkom môže byť zmena teploty  $A_s$  materiálu. Polotovar sa žiha aj po nízkotepeľnom spracovaní, pretože sa narušuje rovnorodosť štruktúry a materiál sa spevňuje. Spevňovaním sa znižuje kujnosť, čo má za dôsledok následnú ťažkú obrábateľnosť. Žihaním sa štruktúra obnoví tak, ako bola pred spracovaním. V prípade že je materiál podrobený viacerým tvarovacím procesom, medzi každým z nich sa môže polotovar žihať.

Najdôležitejšiu rolu, akú zohráva tepelné spracovanie, je nastavenie austenitického tvaru materiálu. Ide o takzvaný tréning, ktorého princíp už bol vysvetlený.

Cyklickým opakovaním tepelno-mechanického zaťažovania vznikajú mikroštruktúrne zmeny v materiáli. Dochádza k degradácii pamäťového správania, takzvaná únava. Tepelným žiňaním niektoré mikroštruktúrne zmeny vymiznú a obnovujú sa pôvodné vlastnosti, žiňanie však nedokáže obnoviť všetky.

Materiál podlieha aj procesu starnutia, ktorý je, taktiež, niekedy potrebný. Starnutím sa myslí vylučovanie precipitátov v štruktúre. Tie majú za následok výrazné zvýšenie teploty  $A_f$ . Materiál sa pevne zafixuje a zohrieva na určitú teplotu. Potom sa rýchlo ochladí v chladiacom médiu. Proces je rovnaký ako pri žiňaní, s rozdielom dĺžky trvania a maximálnej teploty výdrže [1].

### 3.3 Mechanické spracovanie

Tvárenie materiálu je závislé na jeho tvrdosti a kujnosti. Čím je materiál kujnejší, tým je materiál ľahšie deformovateľný. Napríklad pamäťové materiály založené na Cu báze sú všeobecne kujnejšie ako tie založené na Ti báze, a teda aj jednoduchšie vyrobitel'né. V prípade použitia nástrojov a strojov na spracovanie sa vyžaduje ich výroba z tvrdých materiálov. V prípade NiTi zliatin, ktoré vykazujú vysokú tvrdosť, sa spracávajú tieto zliatiny diamantovými a karbidovými nástrojmi. Používajú sa mazivá na báze oleja, vody a grafitu, disulfidu molybdénu a iné. Mechanické spracovanie zliatin využíva podobné princípy ako spracovanie ich jednotlivých zložiek. Takže spracovanie Nitinolu je celkom podobné ako spracovanie Ti zliatin.

Medzi bežné deformačné procesy patria:

- vysokoteplotné a nízkoteplotné kovanie,
- vysokoteplotné a nízkoteplotné valcovanie,
- ťahanie za studena,
- pretlačovanie [1].

### 3.4 Obrábanie

Je to proces, pri ktorom sa z polotovaru odstraňuje nežiaduci materiál v podobe triesok a súčiastka získava svoj žiadaný tvar. Polotovar sa počas procesu obrábania nazýva obrobok. Nástroj uberá materiál z obrobku v dôsledku ich vzájomného pohybu. Základné obrábacie operácie sú:

- konvenčné,
- brúsenie,
- nekonvenčné.

V dnešnom modernom priemysle sa usiluje o čo najlepšiu presnosť súčiastky s malou drsnosťou za čo najnižšiu cenu. Pri pamäťových zliatinách sú tieto nároky obtiažne splniteľné. Sú kladené vysoké nároky na obrábacie nástroje, pretože musia byť tvrdšie ako opracovávaný materiál, s čím sú spojené vysoké náklady. Aj preto spočiatku našli pamäťové materiály uplatnenie len v leteckom a biomedicínskom priemysle [1].

### 3.4.1 Konvenčné obrábanie

Druh obrábania, pri ktorom je obrobok vo fyzickom kontakte s nástrojom. Trením materiálov o seba dochádza k odoberaniu materiálu. Patrí tu sústruženie, frézovanie a vŕtanie.

Titán sa vyznačuje vysokou pevnosťou pri zvýšených teplotách, nízkou tepelnou vodivosťou a vysokým dynamickým zaťažením. Reaktivita s rezným nástrojom spôsobuje obrovské teploty na rozhraní nástroj – trieska a rýchle opotrebenie nástroja [1].

Podobne zliatiny na báze niklu majú vysokú pevnosť a sú ťažko obrábatel'né. Vďaka austenitickej štruktúre rýchlo tvrdnú v procese obrábania a tvorí sa trieska, ktorá je ťažko kontrolovateľná [1].

Výsledkom vyššie uvedených vlastností je rýchle opotrebenie chrbta nástroja, vydroľovanie a vznik vrubov. Aby sa tomu vyhlo, je nutné zaviesť nízke rezné rýchlosti, kvalitné rezné materiály a rezné kvapaliny [1].

Všetky uvedené vlastnosti pre jednotlivé zliatiny platia aj pre NiTi zliatiny. Obrábaním sa tupí nástroj a nedosahuje sa vhodná kvalita obrobku kvôli adhéziám medzi obrobkom a nástrojom, vedie to k mikroštruktúrnym zmenám, trhlinám na povrchu obrábaného obrobku v dôsledku vysokých teplôt, ktoré pri obrábaní vznikajú. Formujú sa biele vrstvy, ktoré sú plné mikrotrhlín. S cieľom zlepšenia obrábania sa preto prešlo na nekonvenčné metódy obrábania [1].

### 3.4.2 Nekonvenčné obrábanie

Ide o druh obrábania, pri ktorom k odberu materiálu z obrobku nedochádza priamym kontaktom nástroja s obrobkom. Vďaka tomu je eliminovaná možnosť opotrebenia nástroja, aj keď povrch obrobku môže byť tepelne ovplyvnený. Je to však najvyužívanejší druh obrábania pamäťových materiálov [1].

Patrí tu elektroiskrové (EDM), laserové, elektrochemické obrábanie a obrábanie vodným lúčom [1].

V štúdiách sa preukázalo, že čím je pracovná energia vyššia, tým sa zhoršuje drsnosť povrchu obrobku, a zároveň zvyšovaním prúdu, napätia a časového impulzu sa natavuje širšia vrstva materiálu. Drsnosť tiež závisí na tepelnej vodivosti a teplote topenia. Pri obrábaní sú pozorované zmeny tesne pod povrchom materiálu. Ich príčinou je vysoké teplo potrebné na obrábanie [1].

Štúdiá predpovedajú dobrú budúcnosť nekonvenčného obrábania pamäťových materiálov a zlepšenie ich kvality obrábania.

## 4 Aplikácie pamäťových materiálov v praxi

Využitie SMA materiálov v praxi je v súčasnosti pomerne široké. Vysoká cena bola nepriaznivý faktor pre viaceré odvetvia, preto reálne využitie bolo v oblastiach, kde cena nebola eliminujúcim faktorom. To sa týkalo najmä leteckého priemyslu a medicíny. Uplatnenie si našli predovšetkým dobrými tlmiacimi vlastnosťami, ich malou veľkosťou a odolnosťou voči korózii.

### Letectvo

Spojovacie elementy: Spojky z NiTi zliatiny sa využívajú pri spájaní ťažko zvariteľných trubiek. Spojka, ktorá má vnútorný priemer menší ako je priemer trubiek, sa rozťahne na požadovaný priemer. Do spojky sa zasunú trúbky a spojka sa zohreje nad  $A_c$ , čím sa zmrští. Vznikne pnutie medzi spojkou, ktorá sa snaží zmenšiť vnútorný priemer a trúbkami, ktoré zmene bránia. Takýto typ tesnenia našiel uplatnenie v hydraulických spojoch pri stíhačkách F-14 Grumman [2].

Konštruktéri z NASA v spolupráci s Boeingom vyrobili súčiastku zvanú Chevron. Jej hlavnou úlohou bolo znížiť hlučnosť leteckého motora zamedzením turbulencie vzduchu počas vzletu. Nachádza sa na odtokovej hrane horúceho vzduchu motora. Chevron má tvar trojuholníka, ktorý obsahuje NiTinové pásiky (obr. 4.1). Pri štarte lietadla, keď je motor horúci, sa Chevrons ohnú dovnútra, čím znížia hluk lietadla. Po výstupe do výšky sa teplota zníži a Chevrons sa vrátia do rovnej polohy. Tým sa zaručil hladký odtok plynov z motora [10].



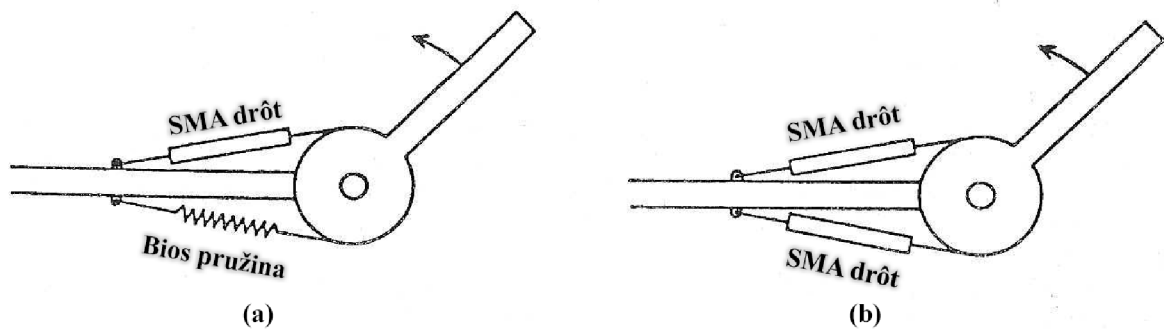
Obr. 4.1 Detail trojuholníkového Chevronu [10]

NiTi súčiastky tvoria súčasť malého vozidla Sojourner, ktoré letelo na Mars. Ich úlohou bolo sklápať sklíčko, na ktoré dopadal prach. Pod sklíčkom bolo čidlo, ktoré meralo dopadajúce žiarenie. Sojourner pristál na Marse 4. júla 1997. Plánovaná dĺžka misie Sojourneru bola 7 dní, no v skutočnosti vydržal až 85 dní [11].

### Robotika

V robotike našli pamäťové materiály uplatnenie ako aktuátory. Aktuátorom sa myslí súčiastka vyrobená z pamäťového materiálu, ktorá sa používa ako pohonná jednotka v automatickom riadení robotov. Aktuátory sú spoľahlivé, konštrukčne jednoduché a efektívne v pomere výkon/hmotnosť do 100 g [12]. Pohyb sa riadi elektrickým ohrevom aktuátora. SMA pohony sú vo viacerých prevedeniach, môžu to byť pružiny, drôty, pásiky a iné. Na obr. 4.2 je vysvetlený ich princíp.

Obr. 4.2 a) znázorňuje pohon, ktorý využíva SMA pružinu a vratnú bios pružinu. SMA pružina mení svoj tvar riadeným elektrickým ohrevom. Rozťahovaním a zmršťovaním dochádza k pohybu aktuátora. Na obr. 4.2 b) je mechanizmus náročnejší na riadenie, no má lepšie prevedenie silových a výkonových možností ako v prípade a) [12].



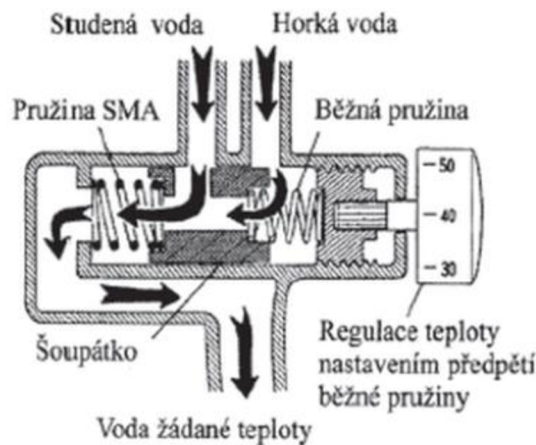
Obr. 4.2 Znázornenie 2 typov aktuátora:

prevedenie bios pružiny a SMA pružiny (vľavo), dvoch SMA pružín (vpravo) [12].

SMA materiály sa uplatnili v aplikácií kĺbového spojenia robotической ruky. Sila zovretia ruky je ovládateľná zmenou elektrického prúdu. Robotické ruky sa využívajú predovšetkým v prostredí, ktoré je pre človeka nebezpečné alebo kde je prístup človeku znemožnený [12].

### Zmiešavacie vodné batérie

Sú to batérie, ktoré udržujú stálu teplotu vytekajúcej vody. Vďaka NiTi pružine, ktorá je citlivá na teplotu a napätie sa reguluje množstvo vtekajúcej teplej a studenej vody. Žiadaná teplota sa nastaví predpätím bias pružiny. NiTi pružina vyvíja tlak na pohyblivú súčiastku a nastavuje pomer teplej a studenej vody – obr. 4.3 [5].



Obr. 4.3 Termostatická zmiešavacia vodovodná batéria využívajúca Ni-Ti batériu [5].

### Šport

V športe sa využila SMA zliatina z CuZnAl na výrobu lyží. Dôvodom boli skvelé tlmiace schopnosti zliatiny. Tlmiaci mechanizmus sa spolieha na malé pohyby medzi martenzitickými štruktúrami, pričom zmenami sa energia utlmuje reorientáciou martenzitického materiálu. Ak sa teplota okolia zníži a sneh namrzne, martenzitická transformácia zvýši tlmiacu schopnosť lyží [2].

Sľubné sú SMA materiály pracujúce na rovnakom princípe, ktoré by mali tlmiť vibrácie vysokých budov. Financie do tohto výskumu investovali krajiny ako USA, Japonsko či Taliansko.

### Biomedicína

NiTi zliatina sa používa na výrobu implantátov, ktoré zachraňujú životy ľudí. Medzi najbežnejšie aplikácie patrí:

- Zrastanie zlomených kostí

Zliatinová doštička sa upevní na obidva konce zlomeniny. Transformačná teplota doštičky je skoro rovnaká ako teplota ľudského tela. Po implementácii doštičky dochádza k jej zmršťovaniu. Vyvíja silu, ktorou sa kosti priťahujú k sebe. Liečba je rýchlejšia aj vďaka tomu, že je zrastená kosť pri rehabilitácii spevňovaná [13].



- Stent

Stent je výstuž z ultratenkých drôťkov vyrobená z NiTi zliatiny. Tá sa zdeformuje a následne implementuje do ciev a žíl. Jej transformačná teplota je blízka teplote tela. Výstuž sa transformáciou narovná a rozšíri cievu, zabezpečuje rýchlejšie prúdenie krvi. Po niekoľkých týždňoch sa stent zrastie s cievou [14][15][5].

- Vena-cava filter

Filter sa implementuje do srdcovej komory. Je vyrobený z NiTi drôťkov. Zachytáva krvné zrazeniny a zabraňuje ich šíreniu do pľúc, pretože spôsobujú pľúcnu embóliu. Filter má valcovitý tvar a pripomína dáždnik [15].

- Strojčeky na rovanie zubov

Drôťtik z pamäťového materiálu má schopnosť narovnať krivo rastúce zuby. Drôť má v nedeformovateľnom stave oblúkovitý tvar. Zdeformovaním sa pripevní na zuby a počas transformácie sa snaží nadobudnúť pôvodný tvar, čím sa zuby narovnávajú. Tvarový efekt produkuje mierny, jemný tlak na zuby vďaka elastickým vlastnostiam drôťtu. Pacient tak nepocíti bolesť zubov. V minulosti sa používal materiál z nehrdzavejúcej ocele, značné sily pôsobiace na zuby však nepôsobili pohodlne. Ich príčinou bolo hookovské správanie ocele [15].

Medzi ďalšie aplikácie SMA materiálov patria: termostatické spínače, protipožiarne ističe, rámy na okuliare, endoskopy, klimatizačné regulátory, mikromotory, v solárnej technike, automobilovom priemysle, v bojových lietadlách, v elektrotechnike a podobne [4].

V Austrálii bola NiTi zliatina použitá ako ochranná súčiastka na poklopoch od smetných košov. V prípade vzplanutia ohňa v odpadkovom koši sa poklop zatvorí a oheň sa uduší.

## 5 Budúcnosť pamäťových materiálov

S príchodom poznatkov o NiTiNOLe sa začalo s jeho praktickým využitím. Dôvodom jeho praktickej aplikácie sú výborné tlmiace schopnosti, odolnosť voči korózii, jednoduchý mechanizmus a pri správnej výrobe výborná predvídateľnosť jeho správania v závislosti na okolitej teplote.

Limitujúcim faktorom je jeho cena. Tá sa odzrkadľuje vo vysokých nárokoch na výrobný proces. Sťažením procesu je nutnosť jeho spracovania v ochrannej atmosfére a použitie vysokopevnostných materiálov na tvárenie.

Materiály s tvarovou pamäťou majú aj v súčasnosti veľký prísľub do budúcnosti. Predovšetkým v spojení s kompozitnými materiálmi. Implementáciou SMA do kompozitných materiálov získava nový materiál špecifické vlastnosti. Tie sú príležitosťou pre nové inovácie. Nároky na novšie, presnejšie a spoľahlivejšie inteligentné technológie zvýšili záujem vývoja v oblasti pamäťových materiálov.

V súčasnosti je neustále dost' aplikácií, ktoré sa musia preskúmať. Ide napríklad o plynové ventily do horákov, ventily do kávovarov alebo núdzové vypínanie spotrebičov.

## Záver

Niektoré kovové materiály, plasty alebo keramika majú schopnosť vrátiť sa po deformácii do počiatočne definovaného tvaru pri zmene vonkajších podmienok. Tento jav má súvislosť s fázovými premenami v tuhom stave a medzi jeho ďalšie prejavy patrí superelastická. Ide o progresívne materiály, ktoré majú neustále veľký potenciál v praktických aplikáciách. Za „kráľa“ medzi zliatinami s tvarovou pamäťou je označovaná zliatina NiTi známa pod pojmom Nitinol. Jej pozitívnymi vlastnosťami sú, okrem predvídateľného správania v závislosti na okolitej teplote, tiež skvelá biokompatibilita a odolnosť voči korózii. Všetky tieto vlastnosti sú ovplyvnené technológiou prípravy a spracovania, ktoré je vysoko náročné a to nie len technologicky, ale aj ekonomicky. Titán je drahý, pevný, ťažko spracovateľný a pri vysokých teplotách reaktívny, preto je nutné spracovanie v ochrannej atmosfére. Vysoké pevnostné nároky sú kladené aj na nástroj pri obrábaní. Musí byť tvrdší ako titán, a zároveň odolný voči vysokej teplote pri vysokých rezných rýchlostiach. Ekonomické hľadisko prípravy zliatin NiTi nezlepší ani nikel, ktorý je tiež pomerne drahý. Vlastnosti výsledného tovaru sú závislé na presnom chemickom zložení štruktúry.

Najbežnejšie uplatnenie pamäťových materiálov na báze kovu bolo spočiatku vo sfére letectva a biomedicíny. Príčinou bola veľká finančná náročnosť výroby, ktorú si mohli dovoliť iba tieto dve odvetvia. Postupom času sa jej využitie rozšírilo do viacerých oblastí, akými sú regulačná a istiacia technika, mikromotory, rámy na okuliare, súčiastky v solárnej technike, automobilovom priemysle a podobne.

Hoci výskum zliatin s tvarovou pamäťou trvá už cez šesťdesiat rokov, implementácia týchto materiálov v praxi je stále pomerne obtiažna. Na druhú stranu, tento fakt robí produkt unikátnym a konkurencieschopným, pretože vyniká vo svojom odbore.

## Zoznam použitej literatúry

- [1] Manufacturing processes of shape memory alloys, c2016. Materials forming and machining: research and development [online]. Athens: Elsevier, s. 156 [cit. 2017-02-26]. ISBN 9780857094834 .Dostupné z: <http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpMFMRD001/materials-forming-machining/materials-forming-machining>
- [2] c2003. WORDEN, K., W. A. BULLOUGH a J. HAYWOOD. *Smart technologies* [online]. River Edge, N.J.: World Scientific, s. 109-139 [cit. 2017-03-06]. ISBN 98-102-4776-1. Dostupné z: <http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpST000006/smart-technologies/smart-technologies>
- [3] Polymery s tvarovou paměti a jejich kompozity, 2013. Zlín. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce Ing. Lenka Chvátalová, Ph.D.
- [4] KURSA, Miroslav, 2005. Paměťové materiály Ni-Ti-Me a možnosti řízení jejich transformačních charakteristik. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství. ISBN 8024808943.
- [5] MACHEK, Václav a František TATÍČEK, 2015. Kovové materiály s tvarovou paměti. Strojárstvo/Strojírenství [online]. 28-29 [cit. 2017-03-06]. Dostupné z: <http://www.engineering.sk/strojarsstvo-extra/2742-kovove-materialy-s-tvarovou-pameti>
- [6] LOSERTO VÁ, Monika, 2012. *Progresivní materiály: učební text*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita. ISBN 978-80-248-2575-5.
- [7] Energy-based fatigue model for shape memory alloys including thermomechanical coupling, 2016. *Smart Materials and Structures* [online]. 25(3), 4 [cit. 2017-03-05]. Dostupné z: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0964-1726/25/3/035042>
- [8] ODSTRČIL, M. a T. ODSTRČIL, 2008. *Slitiny s tvarovou paměti* [online]. Praha: FJFI - ČVUT [cit. 2017-04-22]. Dostupné z: <http://fyzsem.fjfi.cvut.cz/2007-2008/Zima07/proc/slitiny.pdf>
- [9] MOHYLA, Miroslav, 1994. *Nekonvenční strojírenské materiály I*. Ostrava: VŠB-Technická univerzita. ISBN 80-707-8236-6
- [10] Smart Materials Application: Variable Geometry Chevron for Noise Reduction, 2012. *Aerospace Engineering* [online]. Bristol: Rainer Groh [cit. 2017-02-26]. Dostupné z: <http://aerospaceengineeringblog.com>
- [11] Sojourner (rover), 2001-. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation [cit. 2017-03-06]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Sojourner\\_\(rover\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Sojourner_(rover))
- [12] SMA pohony pre roboty, c2000-2012. *Avir* [online]. Bratislava: Ivan Kormoš [cit. 2017-03-05]. Dostupné z: [http://www.avir.sk/robotika/historia\\_kar/roboti/SMA.html](http://www.avir.sk/robotika/historia_kar/roboti/SMA.html)
- [13] Applications for Shape Memory alloys, 2003. *Material Science & Technology* [online]. Washington: Savannah Swardz [cit. 2017-03-05]. Dostupné z: [https://depts.washington.edu/matseed/mse\\_resources/Webpage/Memory%20metals/applications\\_for\\_shape\\_memory\\_al.htm](https://depts.washington.edu/matseed/mse_resources/Webpage/Memory%20metals/applications_for_shape_memory_al.htm)
- [14] Technologie a budoucnost: Chytré materiály, které mění svět, 2011. *21. STOLETÍ* [online]. Praha: Michal Andrie [cit. 2017-03-05]. Dostupné z: <http://21stoleti.cz/2011/03/23/technologie-a-budoucnost-chytre-materialy-ktere-meni-svet/>

[15] ANSON, Tony, 1999. Shape Memory Alloys - Medical Applications. *Materials World* [online]. 7(12), 745-747 [cit. 2017-03-05]. Dostupné z: <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=134>

## Zoznam použitých skratiek a symbolov

$\text{Al}_2\text{O}_3$	oxid hlinitý	
$A_s$	austenit štart	[°C]
$A_f$	austenit finiš	[°C]
at. %	atómové percento	
Cu-Al-Ni	zliatina medi, hliníku a niklu	
Cu-Zn-Al	zliatina medi, zinku a hliníku	
MgO	oxid horečnatý	
$M_s$	martenzit štart	[°C]
$M_f$	martenzit finiš	[°C]
NiTi	nikel – titanová zliatina	
obr.	obrázok	
SMA	materiál s tvarovou pamäťou (Smart Memory Alloy)	
SME	jednocestný tvarový efekt (Shape Memory Effect)	
tab.	tabuľka	
$\text{Ti}_4\text{C}$	karbid titanu	
TiN	nitrid titanu	
TWSME	dvojcestný tvarový efekt (Two - Way Shape Memory Effect)	