

# POLYMERY S TVAROVOU PAMĚTÍ A JEJICH KOMPOZITY

Jana Strouhalová

---

Bakalářská práce  
2013



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav inženýrství polymerů

akademický rok: 2012/2013

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jana STROUHALOVÁ**  
Osobní číslo: **T08395**  
Studijní program: **B2808 Chemie a technologie materiálů**  
Studijní obor: **Chemie a technologie materiálů**  
Forma studia: **kombinovaná**

Téma práce: **Polymery s tvarovou pamětí.**

Zásady pro vypracování:

- Vypracujte literární rešerši na dané téma.
- Definujte základní pojmy.
- Popište jednotlivé mechanismy vyvolávající změnu tvaru SMP.
- Srovnajte polymery s tvarovou pamětí se slitinami s tvarovou pamětí.
- Dále se zaměřte na jejich zpracování, vlastnosti a možné aplikace.

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. Lendlein, A., Kelch, S. Shape-Memory Polymers. *Angew. Chem. Int. Ed.* 2002, **41**, 2034-2057.
2. Behl, M., Lendlein, A. Shape-memory polymers. *Materials today.* 10, 2007, 20-28.
3. Leng, J., Lan, X., Liu, Y., Du, S. Shape-memory polymers and their composites: Stimulus methods and applications. *Progress in Materials Science* 56, 2011, 1077-1135.
4. Xie, T. Recent advances in polymer shape memory. *Polymer* 52, 2011, 4985-5000.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Lenka Chvátalová, Ph.D.**  
Ústav inženýrství polymerů

Datum zadání bakalářské práce: **11. února 2013**

Termín odevzdání bakalářské práce: **31. května 2013**

Ve Zlíně dne 11. února 2013

  
doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.  
*děkan*



  
doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.  
*ředitel ústavu*

## PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že

- odevzdáním bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby <sup>1)</sup>;
- beru na vědomí, že bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí;
- na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 <sup>2)</sup>;
- podle § 60 <sup>3)</sup> odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 <sup>3)</sup> odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – bakalářskou práci - nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům.

Ve Zlíně ..... 9. 5. 2013

..... Strouhalová Jana

*1) zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47b Zveřejňování závěrečných prací:*

*(1) Vysoká škola nevýdělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.*

*(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.*

*(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.*

*2) zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:*

*(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).*

*3) zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:*

*(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst.*

*3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.*

*(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.*

*(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.*

## **ABSTRAKT**

Tato bakalářská práce se věnuje polymerům s tvarovou pamětí. V první části jsou popsány mechanismy vyvolávající změnu tvarové paměti u polymerů a jejich kompozitů. Dále poukazuje na rozdíly mezi polymery s tvarovou pamětí a slitinami s tvarovou pamětí. V současné době je věnována velká pozornost materiálům s paměťovým efektem a to nejen díky jejich zajímavým vlastnostem a aplikacím, ale také z ekonomického hlediska. Tato bakalářská práce se zabývá současným výzkumem a aplikacemi materiálů s tvarovou pamětí a jejich vyhlídkami do budoucnosti.

Klíčová slova: polymery s tvarovou pamětí, paměťový efekt, podnět.

## **ABSTRACT**

This Bachelor thesis deals with shape-memory polymers. The first part describes mechanisms of shape-memory effect of polymers and their composites. Next part highlights the differences between shape-memory polymers and shape-memory alloys. Currently, great attention is paid to materials with memory effect and not only for their interesting properties and applications, but also from an economic point of view. This thesis deals with current research and applications of shape-memory materials and their prospects for the future.

Keywords: shape-memory polymer, memory effect, stimulus.

Ráda bych touto cestou poděkovala vedoucímu bakalářské práce Ing. Lence Chvátalové Ph.D. za odborné vedení, cenné rady, připomínky a spolupráci při tvorbě bakalářské práce. Dále bych chtěla poděkovat své rodině, za trpělivost, kterou její členové projevili během mého studia.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>1 MATERIÁLY S TVAROVOU PAMĚTÍ</b> .....	<b>10</b>
1.1 MECHANISMY A VLIVY VYVOLÁVAJÍCÍ ZMĚNY TVARU POLYMERU.....	11
1.2 FAKTORY, KTERÉ PŮSOBÍ NA ZMĚNU TVARU POLYMERU .....	11
1.2.1 Teplem stimulovaný paměťový efekt .....	11
<i>Vliv teplot na změny tvaru SMP</i> .....	12
1.2.2 Podnět vyvolaný působením elektrické indukce.....	13
<i>Plniva v SMP a jejich kompozity</i> .....	14
1.2.3 Světlem indukované polymery s tvarovou pamětí .....	14
1.2.4 Působením vlhkosti .....	15
1.2.5 Působení magnetické síly .....	16
<b>2 DRUHY POLYMERŮ S TVAROVOU PAMĚTÍ A JEJICH KOMPONENTY</b> .....	<b>18</b>
2.1 TVAROVÁ PAMĚŤ U STYRENU .....	19
2.2 EPOXI-POLYMERY A JEJICH SMP .....	19
2.3 VÝZKUM NOVÝCH POLYMERŮ A JEJICH SMP .....	19
<b>3 SROVNÁNÍ POLYMERŮ S TVAROVOU PAMĚTÍ SE SLITINAMI S TVAROVOU PAMĚTÍ</b> .....	<b>21</b>
3.1 PAMĚŤOVÝ EFEKT U KOVŮ A SLITIN .....	21
3.2 PAMĚŤOVÝ EFEKT U POLYMERŮ .....	22
<b>4 APLIKACE PAMĚŤOVÝCH MATERIÁLŮ</b> .....	<b>23</b>
4.1 ODĚVNÍ MATERIÁLY .....	23
4.2 NEUROLOGIE .....	23
4.3 ENDOSKOPICKÁ CHIRURGIE.....	24
4.4 IMPLANTOVANÉ MATERIÁLY .....	25
4.5 VÝZTUHA PRO FLEXIBILNÍ REFLEKTOR .....	27
4.6 ELASTICKÁ PUR PĚNA S TVAROVOU PAMĚTÍ .....	28
4.7 AUTOMOBILOVÝ PRŮMYSL.....	29
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>30</b>
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY</b> .....	<b>31</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>35</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b> .....	<b>36</b>



## ÚVOD

Po tisíciletí zpracovávali lidé jen takové materiály, které jim skýtala příroda: dřevo, kámen, později kovy. Teprve věda s moderními nástroji se začala zajímat o strukturu polymerů. Velmi brzy se poznalo, že syntetické polymery svými vlastnostmi mohou nahradit nejen polymery přírodní, ale často i materiály kovové, keramiku, nebo sklo. A stále častěji se můžeme setkávat s materiály tvořenými na míru podle požadavků člověka. Zpravidla se používá obecný název „materiály s inteligencí“. [1] Od běžných materiálů se odlišují schopností cílené změny svých vlastností. Například materiál, který si pamatuje svůj tvar.

Co to vlastně jev tvarové paměti je? Tento jev z pohledu uživatele trochu připomíná „kouzelnický trik“. Princip tohoto triku je velmi prozaický. Působením teploty na daný materiál, začíná získávat požadovanou neboli naprogramovanou podobu. Po jeho ochlazení se tvar materiálu zafixuje a použije pro danou aplikaci. A po opětovném zahřátí je vrácen zpět do svého původního tvaru. Deformace materiálu může být velká s výraznou změnou tvaru a zároveň lze i vyvolat dosti rychlý návrat do své původní formy. Vše je odvislé od odvětví jeho využití resp. vlastností na něho kladených (vyžadovaných). [2]

Nejrozšířenější skupinou inteligentních materiálů jsou tzv. slitiny s tvarovou pamětí (shape-memory alloys–SMA). V posledních letech se velmi rychle vyvíjí další skupina paměťových materiálů a to polymery s tvarovou pamětí (shape-memory polymers–SMP). [1]

Těmto materiálům vědci předpovídají významnou roli v budoucnosti. Během posledních několika let, tento koncept našel rostoucí zájem v důsledku vzniku nové třídy polymerů. Tyto takzvané tvarově paměťové polymery, zdaleka předčí dříve používané kovové tvarově-paměťové slitiny zejména v jejich tvaru, paměti resp. jiných specifických rysech. [2] V důsledku relativně snadné výroby a programování tvarové paměti polymerů, představují tyto materiály levnou a efektivní alternativu k zavedeným tvarově-paměťovým slitinám.

## 1 MATERIÁLY S TVAROVOU PAMĚTÍ

První zmínka o polymerech s tvarovou pamětí (SMP) může být přisuzována Mathersovi a kol., kdy ve 40.tých letech 20. stolní byla v patentech vyslovena slova „elastická paměť“. Na druhou stranu, teplem smrštiteľné trubičky, které se objevovaly v 60.tých letech, reprezentovaly komerční aplikaci SMP ještě dříve, než tato terminologie začala být užívána. [3]

Počátky oficiálního užívání termínu polymery s tvarovou pamětí sahají do roku 1984, kdy byl vyroben první SPM – polynorbornen s teplotou skelného přechodu v rozmezí 35 až 40 °C. [4, 5]

Navzdory dlouhé historii SPM, fenomén polymeru s tvarovým efektem zůstal poměrně málo známý až do 90.tých let.

V roce 2002 Lendlein prokázal, že polymery s tvarovou pamětí mohou být využity v lékařské chirurgii, kdy poprvé byl použit samovázací uzel vyrobený z vlákna s tvarovou pamětí. [6]

O výzkum, byl a stále je velký zájem především z důvodů nahrazení výroby kovových materiálů s paměťovým efektem.

První zmínky o paměťovém efektu kovových materiálů se datují kolem roku 1932, kdy byl tento jev náhodně objeven na poněkud zvláštní slitině Au-Cd. Changa a Reda [7] zjistili, že se tato slitina zastudena chová plasticky a může být libovolně deformována a po jejím následném zahřátí se vrátí zpět do svého původního stavu. [1]

Zájem o jev tvarové paměti byl však dlouho pouze na akademické půdě. Teprve v roce 1959 William J. Buchler, zaměstnanec U. S. Naval Ordnance Laboratory, objevil obdobné chování u intermetalické sloučeniny NiTi. Tuto slitinu pojmenoval NiTiNOL (NickelTitanium Naval Ordnance Laboratory). I přes vynikající vlastnosti jako jsou vysoká stabilita a odolnost vůči korozi, se Nitinol jen velmi pomalu prosazoval v komerční praxi. Důvodem byla obtížná a drahá výroba. [8]

## 1.1 Mechanismy a vlivy vyvolávající změny tvaru polymeru

Polymery s tvarovou pamětí jsou schopny reagovat na specifické vnější podněty prostřednictvím určité významné makroskopické vlastnosti, jako je tvar. [9,10] Základní molekulová struktura SMP je tvořena polymerní sítí, umožňující aktivní pohyb. [11] Aby toho mohlo být docíleno, SMP se musí skládat z dvojích segmentů. Jeden je vysoce elastický a druhý, který je buď molekulární spínač, nebo na podnět citlivý je schopen snížit svoji tuhost na základě daného podnětu. [6]

## 1.2 Faktory, které působí na změnu tvaru polymeru

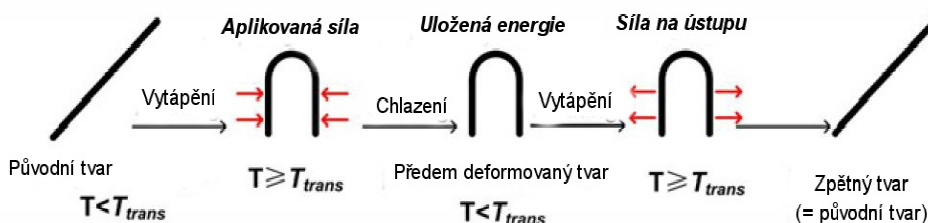
Polymery s tvarovou pamětí a jejich kompozity mohou obnovit své původní tvary po poměrně velkých deformacích a to díky vnějšímu podnětu, které jsou:

- teplo – nejběžnější
- světlo
- vlhkost
- magnetismus

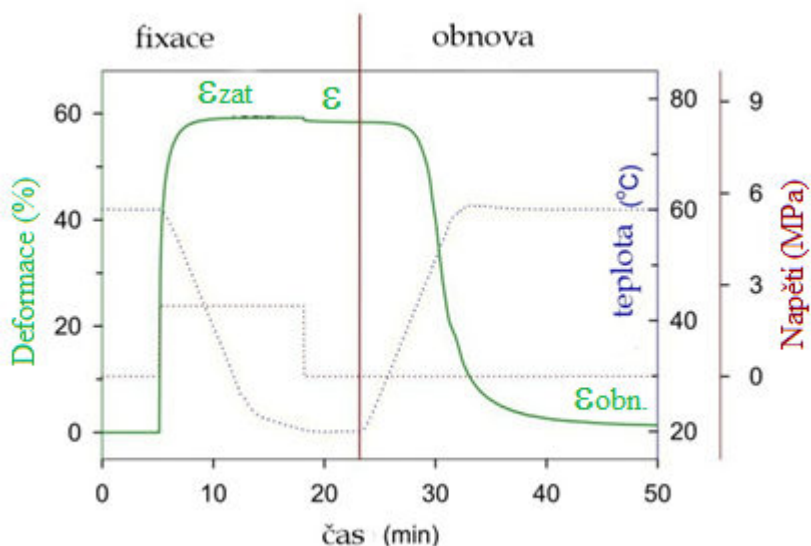
### 1.2.1 Teplem stimulovaný paměťový efekt

Na Obr. 1 je znázorněno schéma typického průběhu teplem stimulovaného paměťového efektu v polymeru. Na začátku máme původní tvar polymeru, kdy jeho teplota je nižší než teplota přechodová ( $T_{trans}$ ). Přechodovou teplotou rozumíme teplotu skelného přechodu ( $T_g$ ) nebo teplotu tání ( $T_m$ ). Po zahřátí polymeru nad teplotu  $T_{trans}$ , působením síly se polymer začíná deformovat do požadovaného tvaru, kterého chceme dosáhnout. Po jeho následném ochlazení pod teplotu  $T_{trans}$  si polymer nese požadovaný dočasný tvar. V případě potřeby dosáhneme původního tvaru polymeru opětovným ohřevem nad teplotu  $T_{trans}$ . [12]

Obr. 2 poskytuje komplexní informace o napětí, deformaci a teplotě v čase během cyklu proměny, což je důležité především pro složitější cykly tvarové paměti. [3]



Obr. 1 Schéma paměťového efektu [12]



Obr. 2 Grafické znázornění cyklu přeměny [3]

### Vliv teplot na změny tvaru SMP

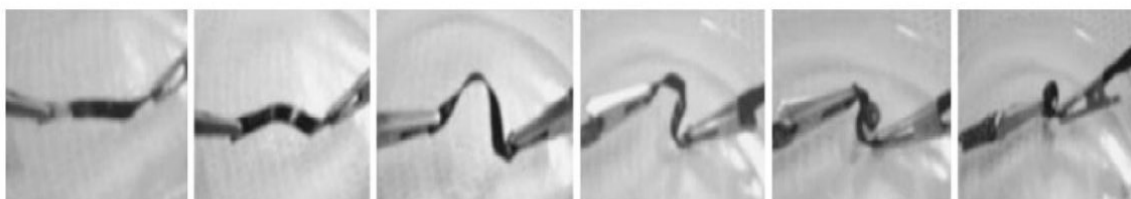
Jedním z faktorů, který vede ke změně tvaru a zároveň jeho zpětné obnově, tj. vzniku paměťového efektu v polymeru je teplota. Teplotní závislost pohybu částí řetězců je ohraničena dvěma charakteristickými teplotami polymeru: zdola  $T_g$  a shora  $T_m$ . [13]

- *teplota skelného přechodu*— pod ní zcela ustane tepelný pohyb segmentů v důsledku převahy mezimolekulárních sil. Pod teplotou  $T_g$  ve skelném stavu má amorfni polymer podobné vlastnosti jako krystalický, ale strukturu neuspořádanou jako kapalina.
- *teplota tání*— nad ní je pohyb segmentů natolik intenzivní, že se řetězce neudrží ve stabilní poloze (převaha tepelného pohybu).
- *tepelný přechod*— polymer dostává svůj dočasný tvar po následném zahřátí nad  $T_{trans}$ , nebo zpět počáteční tvar v důsledku jeho ochlazení pod teplotu  $T_{trans}$ . [13]

### 1.2.2 Podnět vyvolaný působením elektrické indukce

Polymery s tvarovou pamětí jsou charakteristické značnou schopností měnit tvar s paměťovým efektem, ale jejich mechanické vlastnosti, jako pevnost nebo modul jsou poměrně slabší. Naopak, kompozity založené na uhlíkových nanotrubičkách vykazují dobré mechanické vlastnosti a elektrickou vodivost. [14,15] Proto se v průběhu uplynulého desetiletí výzkum značně zabýval mechanismem, paměťovým efektem a elektrickými vlastnostmi SMP plněnými vodivými plnivými a jejich možnými aplikacemi. [16,17] Na základě těchto poznatků Goo [18] vyztužil polyuretan s tvarovou pamětí několikastěnnými uhlíkovými nanotrubičkami o průměru 10–20 nm a délce 20  $\mu$ m. Na Obr. 3 je znázorněn elektro-aktivně vyvolaný dočasný tvar polymeru působením elektrické indukce na tomto kompozitu. Na začátku je polymer přichycený vodivými sponami a je v rovném stavu. Jestliže na polymer začneme působit elektrickou indukcí, získává po 10ti sekundách zkroucený (dočasný) tvar při napětí 40 V. [11]

Vzorek polymeru naplněný 1,9 hm. % uhlíku lze obnovit téměř 100% ke své původní podobě jen v několika málo minutách pod napětím 200V. [19]



Obr. 3 Elektro-aktivně vyvolaný dočasný tvar polymeru [12]

Avšak Leng [20,21] prokázal, že SMP založené na styrenových termosetech vykazují lepší mechanické vlastnosti a odolnost proti vlhkosti než SPM na bázi termoplastického polyuretanu. Na základě toho vytvořil SMP založený na tomto termosetu plněného elektricky vodivými uhlíkovými částicemi (30 nm). Bylo dokázáno, že tepelná vodivost a elastický modul se značně vylepšily, zatímco teplota skelného přechodu slabě klesla.

### ***Plniva v SMP a jejich kompozity***

Termo-mechanické chování polymerů může být navrženo buď modifikací molekulární struktury polymeru, nebo přidáním funkčních plniv do polymeru jako matrice pro vícefázové kompozity. Kompozity s tvarovou pamětí (SMC) mohou být klasifikovány jako částice nebo vlákna v závislosti na typu plniva. SMC plněné částicemi např. (saze, uhlíková nanovlákna, Ni, antuka) [11] mohou splnit různé požadavky v praktických aplikacích. Obecně platí, že SMC plněné částicemi, nebo krátkými vlákny vytvoří určitou zvláštní funkci jako je vysoká elektrická vodivost, magnetický výkon, nebo vysokou tuhost na mikroúrovni.

Yang zkoumal termo-mechanické vlastnosti polyuretanové SMP naplněné uhlíkovým práškem. A jeho výsledky ukázaly, že začlenění uhlíkového prášku je účinným prostředkem ke zvýšení paměťového efektu. Kromě toho se Gall komplexně zabýval mechanismy a jejich kompozity, včetně SiC (zesílené epoxidové SMP) a zjistil, že mají vyšší modul pružnosti ve srovnání s čistým vzorkem SMP. [12]

SMP plněné pomocí uhlíkových nanotrubic (CNT) se vyznačují pozoruhodnou návratností, avšak jejich mechanické vlastnosti, jako pevnost a pružnost jsou nízké. Proto byly použity kompozity na bázi např. polystyrenu, nylonu a ty mají pozoruhodné mechanické vlastnosti s velkým modulem pružnosti a elektrické vodivosti. Čisté SMP nebo částicemi vyztužené SMP nejsou vhodné pro použití konstrukčních materiálů, obvykle jsou používány jako funkční materiál s přidáním některých zvláštních částic plniva. Například feromagnetický  $\text{Fe}_3\text{O}$ . [12]

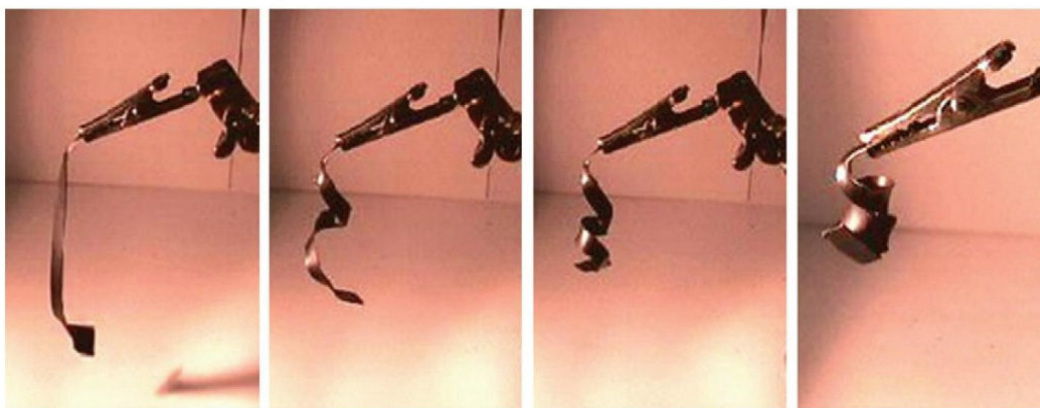
### **1.2.3 Světlem indukované polymery s tvarovou pamětí**

Ovládání tvaru za pomoci sálavé energie světla byla realizována dvěma metodami. Jedna metoda zahrnuje nepřímý ohřev, kdy je SMP plněný magnetickými částicemi a indukčního ohřevu je dosaženo prostřednictvím střídavého magnetického pole. [16,22] Druhá

možnost je využít energii při ozařování infra červeným světlem. Znázornění resp. působení tohoto faktoru ozařování polymerů je patrné z Obr. 4. Za použití infračerveného záření se narovnaný pásek z CNT se zkroutí do spirály. [11]

Infračervené záření má široké spektrum a jedinečný topný efekt, výhodou je možnost bezkontaktního ovládání, čímž se rozšiřují možnosti aplikací do “chytrých konstrukcí” vyrobených ze SMP.

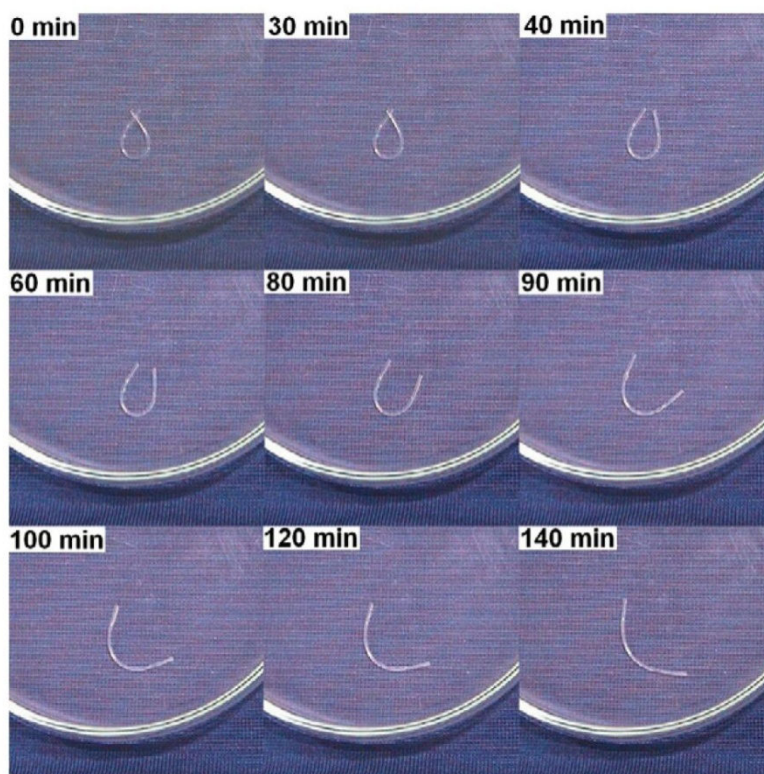
Laserem indikované SMP byly používány např. do lékařských přístrojů. [22,23]



Obr. 4 Využití infračerveného záření. Expozice zleva [12]

#### 1.2.4 Působením vlhkosti

Tvarově-paměťový efekt polyuretanů s tvarovou pamětí a jejich kompozitů s uhlíkovými nanotrubičkami byl vyvolán snížením přechodové teploty. [24, 25] Ponořením polymeru do roztoku, molekuly rozpouštědla difundují do vzorku a způsobí, že vzorek polymeru po 30ti minutách se začne chovat plasticky a měnit svůj dočasný tvar, což vede ke snížení teploty přechodu  $T_{trans}$  a vede k obnovení tvaru (k narovnání struny polymeru) viz. Obr. 5. Výsledky experimentů ukazují, že snížení  $T_g$  závisí na absorpci vlhkosti a ta je nepřímo závislá na době ponoření. Po 240 hodinách SMP je stále považován za polymer a ne za hydrogel. [5]



*Obr. 5 Paměťový efekt polymeru kruhového tvaru, který je ponořen do vodného roztoku [12]*

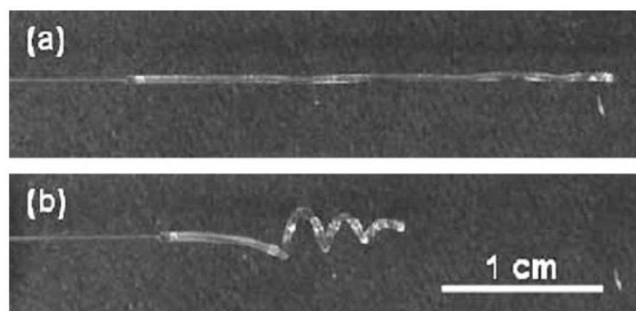
### 1.2.5 Působení magnetické síly

Při použití magnetického plniva např. železa v polymeru, dochází u magneticky citlivých SMP a kompozitů k dočasné změně jejich základního tvaru. Tato vlastnost je vyvolána působením vlivu magnetické síly, kdy díky své polaritě je schopen odpuzovat molekuly magnetického plniva v polymeru a tím změnit jeho původní tvar. Pro zlepšení přeměny tvaru mohou být nanočástice železa v polymeru potaženy silikagelem. [11]

Magnetické materiály citlivé na tvarovou paměť, mají dobré uplatnění v biomedicínských aplikacích. Vyvolanou energii za pomoci magnetické síly lze ovládat dálkově. Tím se rozšiřuje jejich potenciál pro použití v biomateriálech, jako například v nádorové terapii (magnetické fluidní hypertermii) i jako bezkontaktní magneticky spínané SMP(mikroaktivátory) pro odstranění krevní sraženiny v cévě. [12]



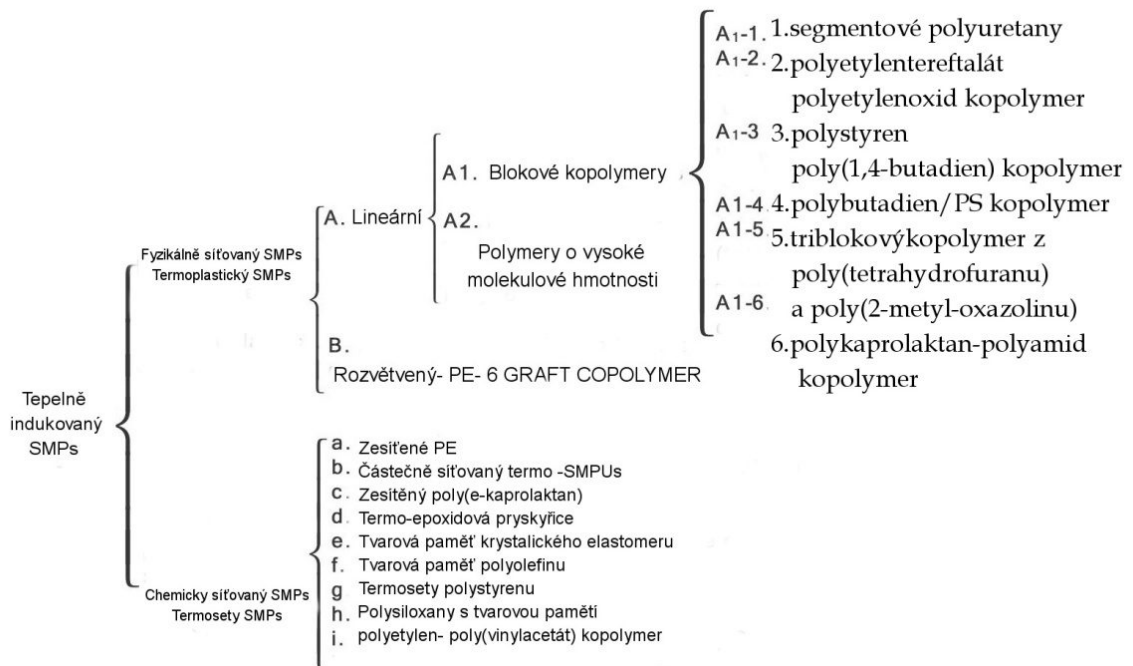
Obr. 6 znázorňuje změnu tvaru polymeru vyvolanou magnetickými silami, kde a) znázorňuje trvalý tvar tyčinky SMP, která je přichycena na kovové části, b) znázorňuje působení magnetické síly na tyčinku, SMP získává požadovaný tvar, čímž se zkrátí o 1 cm. [3]



*Obr. 6 Změnu tvaru polymeru vyvolaná magnetickými silami [3]*

## 2 DRUHY POLYMERŮ TVAROVOU PAMĚTÍ A JEJICH KOMPOZITY

V posledních letech bylo více než dvacet druhů SMP syntetizováno a široce probádáno. Na Obr. 7 je znázorněno klasifikační schéma pro stávající polymery, které vykazují paměťový efekt. [12]



Obr. 7 Schéma rozdělení polymerů [12]

Podle chování za zvýšené teploty dělíme polymery na:

- termoplasty (zahříváním se stávají plastickými a mohou se tvarovat)
- termosety (zahříváním se chemicky mění, tím ztrácejí plastičnost)

## 2.1 Tvarová paměť u styrenu

Tvarové paměti kopolymeru styrenu bylo využito pro formy při výrobě kontaktních čoček. Tato nová SMP se připravuje z reakčního produktu styrenu, nebo vinylové směsi jiné než styren. [12]

## 2.2 Epoxi-polymery a jejich SMP

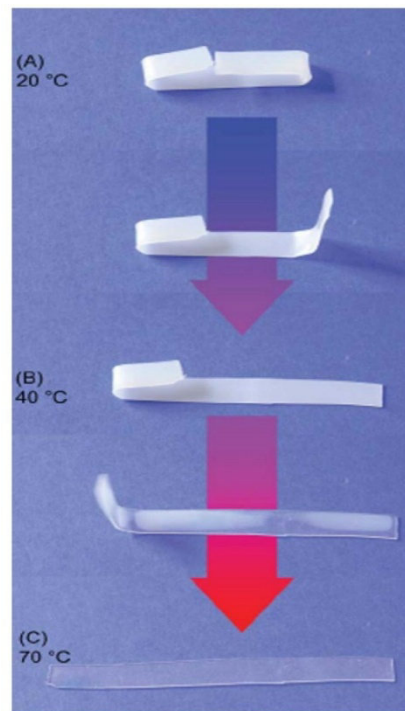
Zejména epoxidové SMP, např. pryskyřice má jedinečnou termo-mechanickou vlastnost s vynikajícím jevem tvarové paměti. Lendlein syntetizoval epoxidové SMP z epoxidové pryskyřice, tvrdidla a dalších monomerů. Epoxidová pryskyřice se mísí s tvrdidlem v poměru 1:1. Aktivní lineární epoxidový monomer se skládá z dlouhého řetězce skupiny C–O a dvěma epoxidovými skupinami na koncích řetězce. [12]

## 2.3 Výzkum nových polymerů a jejich SMP

Díky neustálému výzkumu biologicky rozložitelné SMP mají slibné pole působnosti. Mohou být syntetizovány z několika monomerů, které byly používány při ukončení syntézy rozložitelných materiálů. [34]

U poly( $\epsilon$ -kapolaktanu) byl prokázán potenciál v lékařských aplikacích. Mather [26] vyvinul obousměrné reverzibilní SMP v semikrystalické síti. V polymeru zesíťovaného poly(cykloktenu) pod napětím vede k velkému prodloužení a následným ohřevem způsobí opětovné smrštění. Krystalizací indukované prodloužení při chlazení a tavením indukované smrštění, se při ohřevu vytváří tzv. obousměrný tvarově paměťový efekt. Leng [27] vytvořil nový SMP dokonce se dvěma přechodovými teplotami.

Lendlein [28,29] prokázal deformaci trojího tvaru polymerní sítě s krystalickými segmenty a naroubovanými bočními řetězci. Efekt trojího tvaru vyžaduje aplikaci dvoukrokového naprogramování. Jak je patrné na Obr. 8, SMP je schopen přejít z tvaru (A) do druhého tvaru (B) a finálně se deformovat do třetího tvaru (C). V tomto případě je potřebným stimulem změna teploty. [6]



*Obr. 8 Triple tvarový efekt [6]*

### 3 SROVNÁNÍ POLYMERŮ STVAROVOU PAMĚTÍ SE SLITINAMI S TVAROVOU PAMĚTÍ

Polymery oproti slitinám mají lepší vlastnosti, zejména snadné tvarování, vysokou tvarovou stabilitu a nastavitelnou přechodovou teplotu.

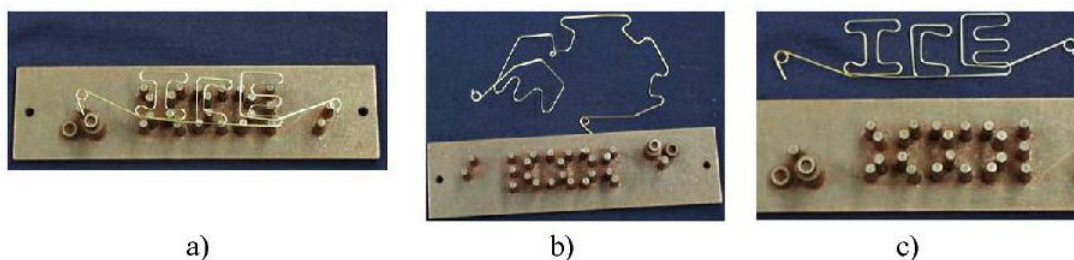
#### 3.1 Paměťový efekt u kovů a slitin

U běžných kovů a slitin dochází vlivem zatížení, v závislosti na velikosti napětí, k elastické nebo plastické deformaci. Pokud je napětí větší než mez kluzu, dojde k trvalé plastické deformaci a bez působení vnějších sil těleso není schopno získat svůj původní tvar.[1]

Materiály s tvarovou pamětí mají schopnost získat svůj původní tvar vlivem působícího tepla. Tento jev je způsoben tím, že kov, u kterého se vyskytuje tvarová paměť, přechází při určité teplotě z jedné krystalické struktury do jiné, která je za daných podmínek energeticky nejvýhodnější. [1]

Uvedení požadovaného tvaru do paměti se provádí deformováním vzorku do nastaveného tvaru, následně tento tvar je mechanicky fixován a vzorek je ohříván na určitou teplotu po určitou dobu. Po uplynutí této doby je možno vzorek ochladit a deformovat do libovolného tvaru. Následný ohřev na teplotu vyšší než transformační způsobí návrat materiálu do původně přiděleného tvaru. Tento proces je znázorněn na Obr. 9 [1], kde můžeme vidět:

- ohnutý drát na fixační podložce, který byl zahřátý na teplotu 500°C po dobu 15 min.
- následně byl drát ochlazen a deformován do jiného tvaru
- drát byl opět zahříván, což způsobilo návrat do původního tvaru



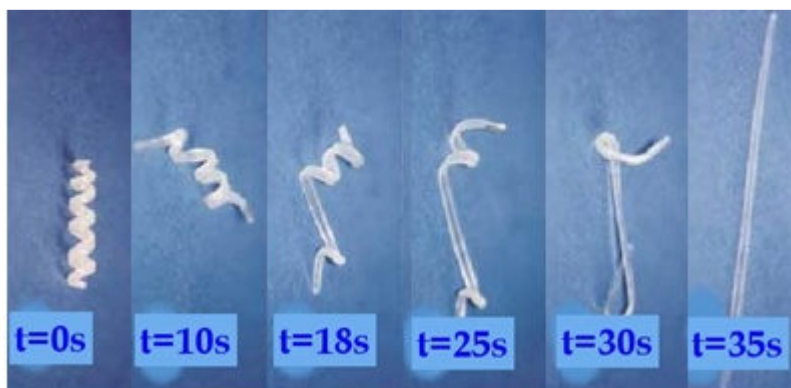
Obr. 9 Deformace drátu SMA [1]

### 3.2 Paměťový efekt u polymerů

Paměťový jev u polymerů navenek vypadá stejně jako u slitin. Materiál, který byl deformován, po zrušení působícího napětí a zahřátí nad teplotu skelného přechodu ( $T_g$ ), se vrací do původního stavu. Avšak u polymerů nedochází k martenzitické transformaci. Tento jev se vyskytuje v pevných látkách. Průběh martenzitické transformace je závislý na okolních podmínkách, jako je teplota, vnější síly a u některých slitin i magnetismus.[30]

Hnací silou paměťového jevu u polymerů jsou Brownovy pohyby, molekuly se v roztoku vlivem tepelného pohybu neustále srážejí, přičemž směr a síla těchto srážek jsou náhodné. Rychlost Brownova pohybu je úměrná teplotě kapaliny. [1]

Návrat do výchozího stavu je možný, je-li materiál zahříván, nebo působí-li na něj záření. Přechod z dočasného tvaru do trvalého tvaru je znázorněn na Obr. 10. Patří do skupiny vícefázových přechodů. Zde je ukázka přechodu dočasného tvaru (spirála) do trvalého tvaru (tyč). Pro tento pokus tvarové paměti byl použit poly( $\epsilon$ -kaprolakton), dimethakrylát a butylakrylát (2 komonomery). Spínací teplotou pro tento polymer je teplota  $46^\circ\text{C}$ . Celý proces trvá 35 sekund, po zahřátí na  $70^\circ\text{C}$ . [6]



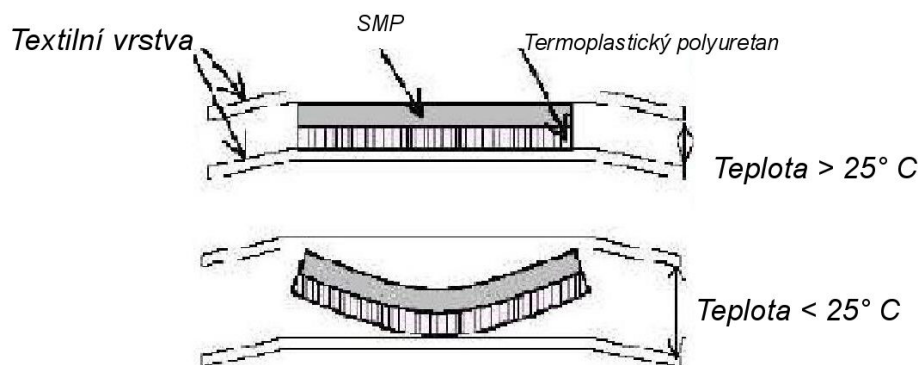
Obr. 10 Přechod z dočasného tvaru do trvalého tvaru [6]

## 4 APLIKACE PAMĚŤOVÝCH MATERIÁLŮ

### 4.1 Oděvní materiály

Paropropustnost SMP je vlastnost, která se využívá k výrobě konstrukčně prodyšných oděvů, oblečení do deště, včetně vnitřních podšívek bot.

Např. polyuretanové nátěry dodávají odolnost oděvům proti vodě. S kombinací SMP se propustnost vodních par z těchto povlaků výrazně zvyšuje. Materiály mají v různých stavech různé tvary. Ohřevem na transformační teplotu dochází k deformační schopnosti materiálu. Po ochladnutí se materiál stává tuhým. To propůjčuje zvýšenou prodyšnost při vyšších tělesných teplotách a zvyšuje pohodlí z nošení těchto oděvů (Obr. 11). [31]

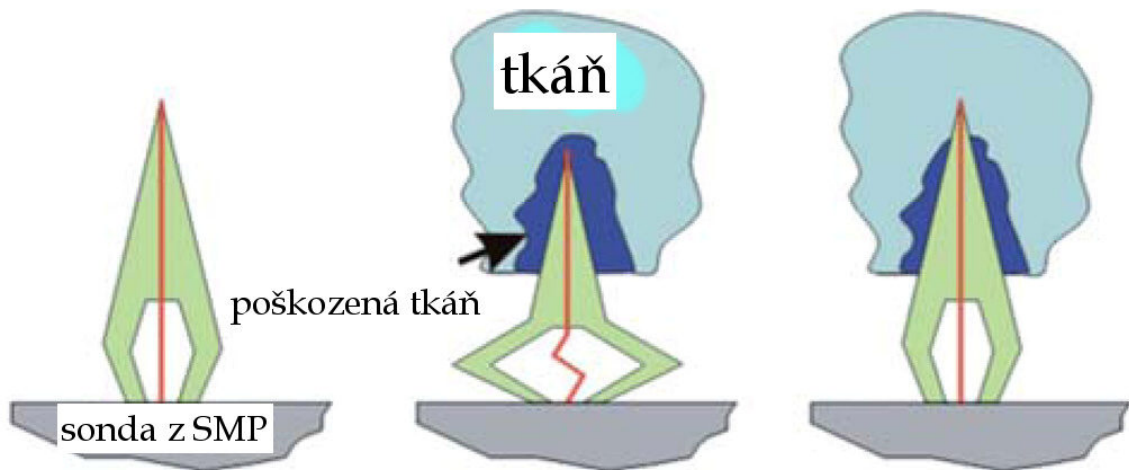


Obr. 11 Textilie s tvarovou pamětí [31]

### 4.2 Neurologie

Běžně používané neuronální sondy jsou při počátečním zavádění do narušené mozkové tkáně náchylné na velké poškození. Sondy jsou vyrobené z kovových nebo keramických materiálů. Způsobují při počátečním zavádění do mozkové tkáně astrocytické jizvy, čímž se zpomaluje výživa neuronů v mozku. Sharp [32] vynalezl sondu z měkkého polymeru, Obr. 12, která obsahuje mikroaktivátor z SMP, kdy se pomocí tělesného tepla sonda aktivuje a deformuje. Tím může být zavedena do mozkové části, aniž by způsobila velké poškození. Sonda byla nejdříve vyzkoušena na laboratorních myších, přičemž výsledky

ukázaly, že při pomalém zavádění (1mm za 40minut) se snížilo množství poškozené tkáně.

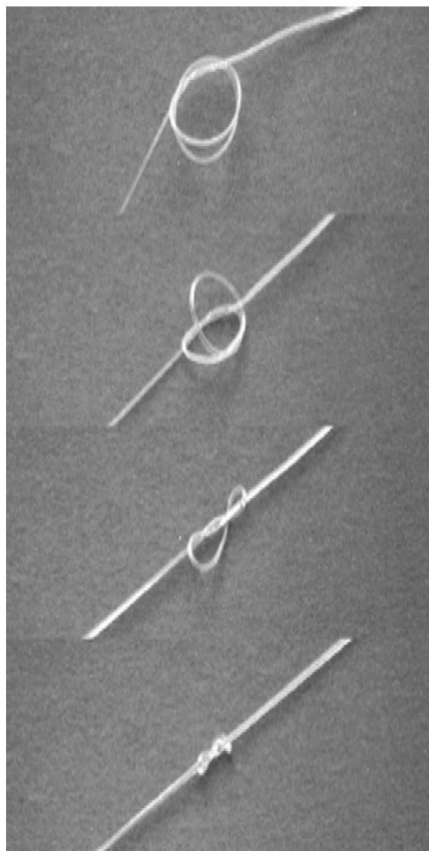


Obr. 12 Neuro sonda zSMP [32]

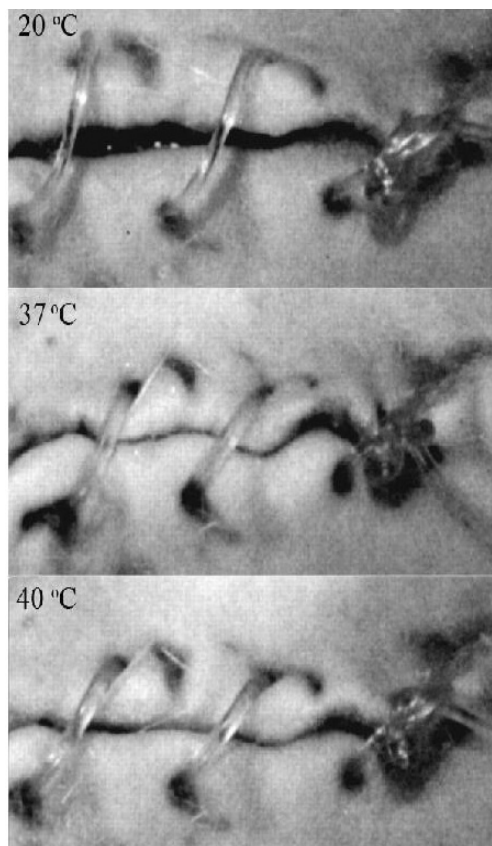
### 4.3 Endoskopická chirurgie

Výzkum, který provedli Leindlein a Langer [3] spočíval ve vývoji polymerních nití s tvarovou pamětí za účelem aplikace samovázacích uzlů při chirurgických operacích. Tyto uzly, tepelně reagující “vlákna“, byly vyrobeny z oligo( $\epsilon$ -kaprolaktanu)diolu na bázi SMP a následně aplikovány na chirurgický řez zvířecí kůže. Konstrukce chirurgických nití byla prozkoumána, tvar šicího vlákna pod dlouhodobým namáháním měl stále dočasný tvar (Obr. 13). Pokud se teplota zvýšila nad  $T_g$ , struktura šicí nitě se začala zmenšovat a tím došlo k utažení uzlu, přičemž byla použita optimální síla (Obr. 14). Jde o biologicky rozložitelný polymer. [6]





Obr. 13 Vlákno z termoplastického polymeru, uzel lze dotáhnout v 20sec. při zahřátí na 40°C [6]

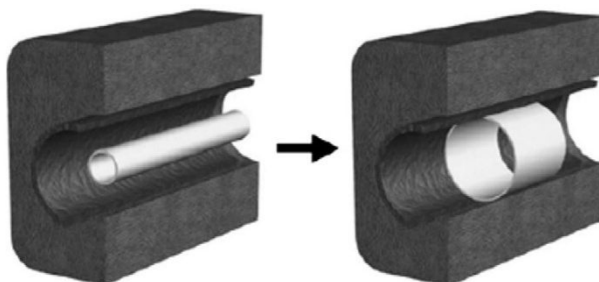


Obr. 14 Biologicky rozložitelný SMP  
Šev pro uzavírání ran [6]

#### 4.4 Implantované materiály

Lidské tělo a všechny jeho tkáně a tekutiny představují pro implantované materiály nepříznivé prostředí. V Georgia Institute of Technology vyvíjí materiály SMP, které jsou schopny tak náročné podmínky překonat beze ztráty funkčnosti, stability a biokompatibility. Podle Galla z Georgia Tech jsou tyto polymery vhodnými kandidáty pro biomedicínské aplikace. Mnohem lépe než kov totiž napodobují svými vlastnostmi měkké tkáně lidského těla a mohou být navrženy i tak, aby se postupně v těle rozložily. Gall a kol. vyvinuli výztuhu (stent) z polymeru s tvarovou pamětí, která může být stlačena podobně jako doposud používané stenty, a vpravena do blokové tepny. Působením tepla lidského těla se pak opět roztáhne a ucpanou tepnu uvolní. [33]

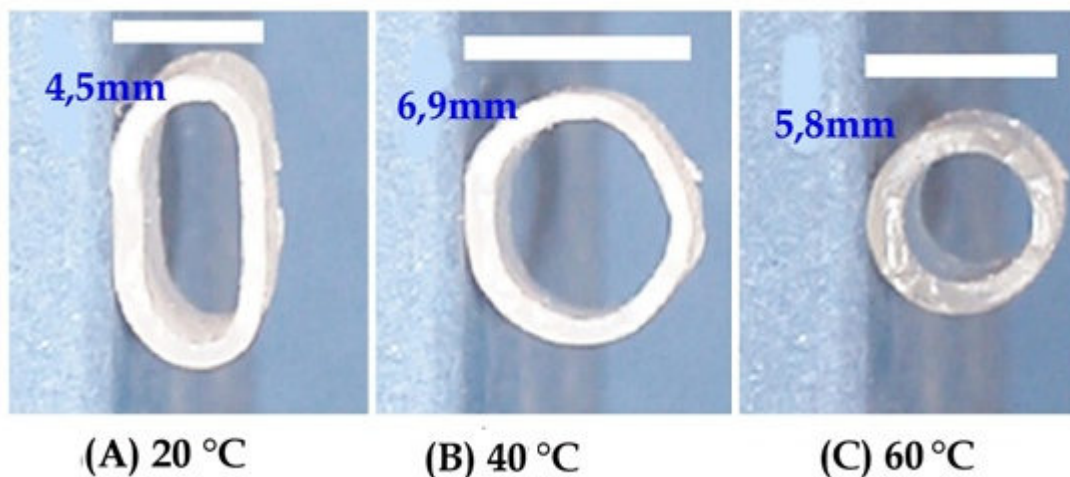
Wache a kol. se zaměřili na vývoj cévního stentu z SMP jako systém dodávky léků (viz Obr. 15). Použití stentu z SMP pro dodávky léků vede k výraznému snížení např. trombózy. Zlepšení biologické tolerance se očekává při použití biokompatibilních SMP materiálů. [12]



*Obr. 15 Schematické znázornění paměťového efektu při zavedení do těla (vlevo),  
(vpravo) po vyvolání změny tvaru [1]*

Další výzkum se zaměřuje na to, jak tyto polymery využít jako specificky umístěné neuronové sondy v mozku nebo možnost jejich aplikace při problémech s páteří. Vědci vyvíjí pružné polymery s tvarovou pamětí, které jsou podobně těžké jako skutečné lidské obratle. Je snaha vyvinout odolnější syntetický polymer, využitelný pro umělé obratle, který bude mít delší životnost a bude se snadněji implantovat. Kromě výzkumu polymerů vhodných pro různé biomedicínské aplikace zajímá vědce jejich průmyslová výroba s nízkými náklady. Zkouší různé materiály a postupy výroby, které by mohly být využity pro komerční produkci kvalitních polymerů a jejich cenově dostupné využití v medicíně. [34]

Nové SMP se může pohybovat od jednoho tvaru do druhého v reakci na podnět. Tak jsou SMP buď v dual-tvaru, nebo triple-tvaru polymeru. Jak je znázorněno na Obr. 16, SMP je možné změnit z původního tvaru (A) na druhý tvar (B) a nakonec deformovat do třetího tvaru (C). Poté může být vložen do těla, a rozšířit se na cílovém místě a následně odstraněn v pozdějším okamžiku, pokud bude nutné. V budoucnu se počítá s odbouratelnými materiály. [9]



Obr. 16 Triple-tvar polymeru od (A) 20°C, přes (B) 40 °C, na 60°C (C) [9]

#### 4.5 Výztuha pro flexibilní reflektor

Společnost Harris vyvinula nový druh povrchu reflektoru, který je podobný odpruženému reflektoru. Velké clony těchto teleskopů byly uloženy do těla vesmírných raket, což výrazně umožňuje podporu komunikace v satelitních systémech. Po nasazení reflektoru do kosmické lodi je působením tepla vyvolán konečný tvar s paměťovým efektem, který drží povrch v přesnosti mikro-systému. Nyní ve společnosti zvažují použití elastických materiálů pro lepší design. (Viz. Obr. 17). [12]



Obr. 17 Reflektor, u kterého byla vyvolána tvarová paměť [12]

(a) předem zdeformovaný tvar, (b) konečný tvar

#### 4.6 Elastická PUR pěna s tvarovou pamětí

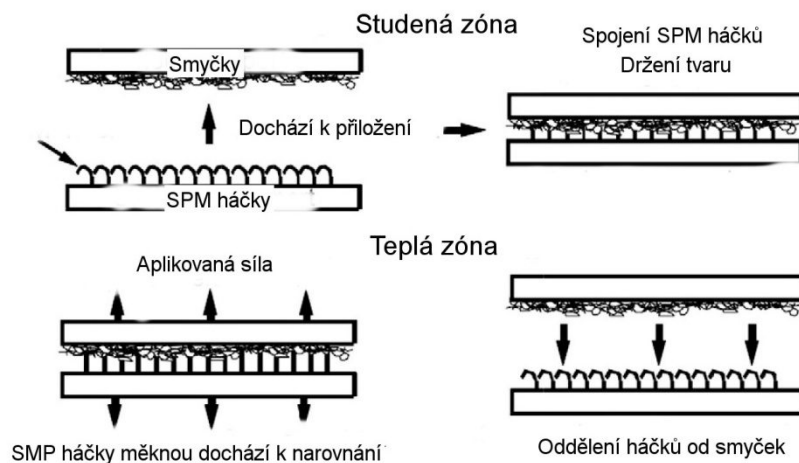
PUR pěna s tvarovou pamětí, nebo jinak nazývaná “líná pěna“ byla vyvinuta pro kosmický program NASA. Na počátku 70. let proto NASA navrhla materiály, které měly astronauty chránit před gravitačními silami během startu. Klíčem k úspěchu byla elastická paměťová pěna, která se dokázala přizpůsobit individuálním rozměrům a po stlačení se navrátila do původního tvaru. Toho se využívá pro výrobu matrací (Obr. 18). Díky efektu pomalého vracení se pěna dokonale přizpůsobí tvaru těla, podrží ho v optimální poloze a svou měkkostí dodá tělu příjemný pocit při ležení. Díky schopnosti buněk “líné pěny“ předávat si navzájem tlakovou energii, rozloží pěna váhu těla plynule na celý povrch těla. Tvrdost této pěny se mění v závislosti na teplotě. To znamená, že při kontaktu s tělesným teplem pěna měkne. Díky efektu tzv. pomalého vracení se do původní polohy nabízí rovnoměrné rozložení tlaku matrace na lidské tělo, což má pozitivní vliv na krevní oběh. Paměťová pěna je příliš měkká, aby mohla být použita na celou matraci, proto se k ní přidávají tvrdší materiály, které zajišťují správnou oporu těla a ergonomickou polohu páteře. [35]



*Obr. 18 Paměťový efekt matrace [35]*

## 4.7 Automobilový průmysl

SMP byly použity také v automobilovém průmyslu. Jejich paměťové chování, nízké náklady a snadná výroba jsou hlavní důvody, proč přitahují velkou pozornost v automobilovém průmyslu. Typickým příkladem ve vývoji je návrh pro použití reverzibilního přídavného zapojení, jako je znázorněno na Obr. 19. Plocha s háčky je vyrobena z materiálu SMP. Po spuštění systému dochází ohřevem a následným ochlazením k tvarování háčků, což umožňuje spojení dvou částí k sobě. Po následném zahřátí se opět háčky narovnají, a tím dochází k odpojení systému. [12]



Obr. 19 Reverzibilní zapojení [12]

## ZÁVĚR

V rámci této bakalářské práce byla formou literární rešerše zpracována tematika polymery s tvarovou pamětí. V práci je nastíněna historie vývoje těchto materiálů.

Významná část je věnována rozdělení a vysvětlení vlastností materiálů z pohledu konkrétních aplikací.

Již v úvodu je ukázáno, jak tvarová paměť funguje, a co ovlivňuje samotný proces deformace.

Doposud některé polymery s tvarovou pamětí byly pouze zkoumány, ale již brzy lze očekávat jejich uplatnění na trhu. Mnoho výzkumných laboratoří se zabývá výzkumem, vývojem a testováním těchto nových materiálů. Polymery a slitiny se neustále vyvíjejí ruku v ruce s vývojem doby, průmyslu a s ním spojených inovačních procesů.

Další a velice zajímavou součástí práce je porovnání polymerů se slitinami, které mají stejné schopnosti tvarově-paměťového efektu.

Ideální mechanické vlastnosti kovových slitin získané vhodnou kombinací pevnostních (tvrdost, houževnatost) a deformačních charakteristik, přináší velké množství využití v průmyslu. Slitiny mají široké uplatnění např. v medicíně, robotice a v dalších oblastech. Výhodou slitin je jejich obnova a recyklace. Jedním z vážných problémů neomezeného využití těchto materiálů je alergická reakce na složku Ni.

Polymery oproti slitinám mají lepší vlastnosti, zejména snadné tvarování, vysokou tvarovou stabilitu a nastavitelnou přechodovou teplotu. Jejich výroba a zpracování je méně nákladné než výroba slitin. Ve srovnání se slitinami mají mnoho výhod, jako nízká hustota, jsou odolné vůči organickým rozpouštědlům a UV záření. Nevýhodou je komplikovaná regenerace (recyklace) odpadů.

Oblast materiálů s tvarovou pamětí je v současné době jednou z nejaktuálnějších a nabízí ještě celou řadu neprobádaných, zajímavých a nekonvenčních využití.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] JOSIEK, R. *Paměťové materiály*. Brno, 2010. 10-20s. Diplomová práce Vysoké učení technické v Brně.
- [2] MAYO, I., KAUFFMAN, G. *The story of Nitinol: The serendipitous discovery of the memory metal and its applications*. Springer-Verlag New York, INC. 1996. Vol. 2, No. 2. ISSN 1430-4171.
- [3] XIE, T. *Polymer: Recent advances in polymer shape memory*. [online]. 2011 [cit. 2013-03-17], Dostupné z WWW: <[sciencedirect.com/science/article/pii/S0032386111006513](http://sciencedirect.com/science/article/pii/S0032386111006513)>.
- [4] LENG, J., DU, S. *Shape memory polymer and multifunctional composite*. editor. Shape memory polymer textile. CRC Press LLC; 2010. p. 293–314.
- [5] LIANG, C, ROGERS, C. Malafeew E. *Investigation of shape memory polymers and their hybrid composites*. J Intell Mater Syst Struct 1997;8:380–6.
- [6] MENG, Q., HU, J. *Composites: A review of shape memory polymer composites and blends*. [online]. 2009 [cit. 2013-02-17], s. 1661-1672 Dostupné z WWW: <[sciencedirect.com/science/article/pii/S1359835X09002498](http://sciencedirect.com/science/article/pii/S1359835X09002498)>.
- [7] KURSA, M., PACHOLEK, P. *Metalurgické charakteristiky tvarově paměťových materiálů na bázi Ni-Ti-Me*, In 11. mezinárodní metalurgická konference METAL 2002. Ostrava, Tanger, 2002, Paper No. 137. ISBN 80-85988-48-8
- [8] KLUSÁK, O. *Biokompatibilní materiály na bázi kovů a jejich aplikační využití*. Brno, 2010. 16s Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [9] LENG, J., LAN X., LIU Y., DU S. *Shape-Memory polymers and Multifunctional Composites*. 2010, s. 203-232. ISBN: 978-1-4200-9019-2.
- [10] LIU, C., MATHER, P. *Polymers for shape memory applications*. ANTEC Proc 2003:1962–6.
- [11] BEHL, M., LENDLEIN, A. *Actively moving polymers*. Soft Matter 2007; 3:58–67.
- [12] LENG, J., LAN, X., LIU, Y., DU, S. *Progress in materials science: Shape-memory polymers and Their composites: Stimulus methods and applications*. [online]. 2009 [cit. 2013-02-17], s. 1079-1124 Dostupný z WWW: <[elsevier.com/locate/pmatsci](http://elsevier.com/locate/pmatsci)>.
- [13] STOKLASA, K. *Makromolekulární chemie I*. UTB ve Zlíně, Krystalizace

polymerů. [studijní texty].

- [14] BIERCUK, M., LLAGUNO, M., RADOSAVLJEVIC, M., HYUN, J., JOHNSON, A., FISCHER, J. *Carbon nanotube composites for thermal management*. Appl. Phys. Lett. 2002; 80:2767–9.
- [15] CHANG, T., JENSEN, L., KISLIUK, A., PIPES, R., PYRZ, R., SOKOLOV, A. *Microscopic mechanism of reinforcement in single-wall carbon nanotube/polypropylene nanocomposite*. Polymer 2005; 46:439–44.
- [16] LV, H., LIU, Y., GOU, J., LENG, J., DU, S. *Electroactive shape-memory polymer nanocomposites incorporated with carbon nanofiber paper*. Int J Smart Nano Mater 2010; 1:2–12.
- [17] YANG, B., HUANG, W., LI, C., LI, L., CHOR, J. *Qualitative separation of the effects of carbon nano-powder and moisture on the glass transition temperature of polyurethane shape memory polymer*. Scripta Mater 2005; 53:105–7.
- [18] CHO, J., KIM, J., JUNG, Y., GOO, N. *Electroactive shape-memory polyurethane composites incorporating carbon nanotubes*. Macromol Rapid Commun 2005; 26:412–6.
- [19] LAN, X., WANG, X., LIU, Y., LENG, J. *Fiber in forced shape-memory polymer composite, its application in a deployable hinge*. [online]. 2009 [cit. 2013-04-17]. Dostupný z WWW:< [readcube.com/articles/10.1038/pj.2012.185](http://readcube.com/articles/10.1038/pj.2012.185)>
- [20] JI, F., ZHU, Y., HU, J., LIU, Y., YEUNG, L., YE, G. *Smart polymer fibers with shape memory effect*. Smart Mater Struct 2006; 15:1547–54.
- [21] LENDLEIN, A., KELCH, S. *Shape-memory polymers*. Angew Chem. – Int. Ed. 2002; 41:2034–57.
- [22] LIU, C., WU, J., MATHER, P. *Nonisothermal crystallization kinetics of polycyclo-octene: characterization using thermal and optical methods*. Abstr. Pap. Am. Chem. Soc. 2003; 226:U521.
- [23] BIERCUK, M., MONSMA, D., MARCUS, C., BECKER, J., GORDON, R. *Low-temperature atomic-layer-deposition lift-off method for microelectronic and nanoelectronic applications*. Appl Phys Lett 2003; 83:2405–7.



- [24] JUNG, Y., SO, H., CHO, J. *Water-responsive shape memory polyurethane block copolymer modified with polyhedral oligomeric silsesquioxane*. J. Macromol Sci Part B Phys 2006; 45:453–61.
- [25] YU, K., LIU, Y., LENG, J. *Conductive shape memory polymer composite incorporated with hybrid fillers: electrical, mechanical, and shape memory properties*. J. Intell Mater, Syst. Struct ,2011:1–11.
- [26] CHUNG, T., ROMO-URIBE, A., MATHER, P. *Two-way reversible shape memory in a semicrystalline network*. Macromolecules 2008; 41:184–92.
- [27] LIU, G., DING, X., CAO, Y, ZHENG, Z., PENG, Y. *Novel shape-memory polymer with two transition temperatures*. Macromol Rapid Commun 2005; 26:649–52.
- [28] BELLIN, I., KELCH, S., LENDLEIN, A. *Dual-shape properties of triple-shape polymer networks with crystallizable network segments and grafted side chains*. J Mate Chem 2007; 17(28):2885–91.
- [29] BELLIN, I., KELCH, S., LANGER, R., LENDLEIN, A. *Polymeric triple shape materials*. Proc Natl Acad Sci USA 2006; 103:18043–7.
- [30] MOHR, R., KRATZ, K., WEIGEL, T., LUCKA-GABOR, M., MONEKE, M., LENDLEIN, A. *Initiation of shape-memory effect by inductive heating of magnetic nanoparticles in thermoplastic polymers*. PNAS 2006, 3540-3545s.
- [31] *Inteligentní textilie* [online]. 2003 [cit. 2013-03-27]. Dostupné z WWW: <ft.tul.cz/depart/klm/files/inteligentní\_textilie.pdf>.
- [32] SMALL, W., SINGHAL, P., WILSON, T., MAITLAND D. *Biomedical Applications of Thermally Activated Shape Memory Polymers*. 2009, LLNL-JRNL-412712.
- [33] *Inovace.cz* [online]. 18.5.2008 [cit. 2013-03-19]. Umělé součástky v lidském těle mají již svou tvarovou paměť. Dostupný z WWW: <inovace.cz/novinky/556-umelé-soucastky-v-lidskem-tele-maji-jiz-svoji-tvarovou-pamet>.
- [34] *Biomedical applications of thermally activated shape memory polymers*. [online]. 14.5.2010 [cit. 2013-05-02]. Dostupný z WWW: <nebi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3023912/>.

---

[35] *Elastická PUR pěna s tvarovou pamětí*. [online]. [cit. 2013-04-27]. Paměťový efekt matrace. Dostupné z WWW: <<http://www.dormeo.cz/pruvodci-dormeomeo>>.

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

- SMP polymery stvarovou paměť
- SMA slitiny s tvarovou paměť
- Au-Cd slitina zlato kadmium
- As austenit
- T<sub>g</sub> teplota skelného přechodu
- T<sub>m</sub> teplota tání
- Mr molární hmotnost
- T<sub>trans</sub> tepelný přechod
- PU polyuretan
- CO<sub>2</sub> oxid uhličitý
- C-O- uhlíkový řetězec
- SiC karbit křemíku
- (CNT) nanotrubičky
- SMPs kopolymer polymeru s tvarovou paměť
- Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> oxid železitý
- MWNT uhlíková nanotrubičky
- PU- MWNT polyuretanová uhlíková nanotrubičky kompozity
- NASA Národní ústav pro letectví a kosmonautiku
- PUR polyuretanová pěna
- H-můstky vodíkové můstky
- Ni nikel

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

Obr. 1 Schéma paměťového efektu .....	12
Obr. 2 Grafické znázornění.....	12
Obr. 3 Elektro-aktivně vyvolaný dočasný tvar polymeru.....	14
Obr. 4 Využití infračerveného záření. Expozice zleva .....	15
Obr. 5 Paměťový efekt polymeru kruhového tvaru, který je ponořen do vodného roztoku .....	16
Obr. 6 SMP, který je spojen s kovovou částí tyčinky.....	17
Obr. 7 Schéma rozdělení polymerů .....	18
Obr. 8 Triple tvarový efekt .....	20
Obr. 9 Deformace drátu SMA.....	21
Obr. 10 Přechod z dočasného tvaru do trvalého tvaru .....	22
Obr. 11 Textilie s tvarovou pamětí .....	23
Obr. 12 Neuro sonda z SMP .....	24
Obr. 13 Vlákno z termoplastického polymeru, uzel lze dotáhnout v 20sec. při zahřátí na 40°C (vlevo).....	25
Obr. 14 Biologicky rozložitelný SMP šev pro uzavírání ran(vpravo).....	26
Obr. 15 Schematické znázornění tvaru-paměťovým efektem při zavedení do těla (vlevo) a (vpravo) po vyvolání změny tvaru .....	27
Obr. 16 Triple-tvar polymeru od (A) 20 °C, přes (B) 40 °C, na 60 °C (C) .....	27
Obr. 17 Reflektor, u kterého byla vyvolána tvarová paměť (a) předem zdeformovaný tvar, (b) konečný tvar .....	28
Obr. 18 Paměťový efekt matrace .....	29
Obr. 19 Reverzibilní zapojení.....	30