



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

SMART MATERIÁLY

SMART MATERIALS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ludmila Valenová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Eva Molliková, Ph.D., Paed IGIP

BRNO 2018

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav materiálových věd a inženýrství
Studentka: **Ludmila Valenová**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Eva Molliková, Ph.D., Paed IGIP**
Akademický rok: 2017/18

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:

Smart materiály

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce pojednává rešeršní formou o smart materiálech. V úvodu práce bude zmíněna stručná charakteristika smart materiálů a jejich rozdělení do jednotlivých skupin. V hlavní části práce pak budou popsány jejich vlastnosti a na příkladech dokumentováno využití smart materiálů v praxi.

Cíle bakalářské práce:

- charakteristika smart materiálů,
- rozdělení smart materiálů,
- rozbor jednotlivých skupin smart materiálů,
- popis vlastností smart materiálů,
- využití smart materiálů v praxi.

Seznam doporučené literatury:

SCHWARTZ, M. M. Encyclopedia of smart materials. New York: J. Wiley, 2002. ISBN 0471177806.

WANG, Z. L. a Z. C. KANG. Functional and smart materials: structural evolution and structure analysis. New York: Plenum Press, 1998. ISBN 0306456516.

OŽTSUKA, K. a C. M. WAYMAN. Shape memory materials. 1998. New York: Cambridge University Press, 1998. ISBN 05-214-4487-X.

SCHWARTZ, M. M. Smart materials. Boca Raton: CRC Press, 2008, 1 sv. (různé stránkování). ISBN 978-1-4200-4372-3.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18.

V Brně, dne 26. 10. 2017



prof. Ing. Ivo Dlouhý, CSc.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá smart materiály. Souhrnně popisuje obecné rozdělení smart materiálů do jednotlivých skupin, uvádí vlastnosti jednotlivých skupin a využití těchto materiálů v praxi. Detailněji jsou popsány skupiny materiálů s tvarovou pamětí, materiály měnící barvu za působení vnějšího podnětu, materiály vyzařující světlo a materiály fungující na principu piezoelektrického jevu.

Klíčová slova

smart materiály, tvarová paměť, luminiscence, chromické materiály, piezoelektrický jev

ABSTRACT

The bachelor thesis deals with smart materials. In summary, it describes the general classification of smart materials into individual groups. Describing the properties of individual groups and using these materials in practice. In more detail, there are described groups of shape memory materials, color changing materials under the external stimulus, light emitting materials and materials based on piezoelectric effect.

Key words

smart materials, shape memory, luminescence, chromic materials piezoelectric effect

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

VALENOVÁ, L. *Smart materiály*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 35 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Eva Molliková, Ph.D., Paed IGIP.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Smart materiály** vypracovala samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Jméno a příjmení

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Evě Mollikové, Ph.D., Paed IGIP za cenné připomínky a rady, které mi poskytla při vypracování závěrečné práce.

OBSAH

ÚVOD.....	11
1 Charakteristika smart materiálů.....	12
1.1 Rozdělení smart materiálů	12
1.1.1 Magnetostrikce	13
1.1.2 Reologické tekutiny.....	13
1.1.3 Elektrostrikce	13
1.1.4 Teplotně reagující polymery	13
1.1.5 Samouspořádatelivé materiály	14
1.1.6 Samo-regenerační materiály.....	14
1.1.7 Polymerní gely	15
2 Materiály s tvarovou pamětí	16
3 Materiály vyzařující světlo	21
3.1 Fluorescence	21
3.2 Fosforescence.....	22
3.3 Elektroluminiscence.....	22
4 Materiály měnící barvu.....	24
4.1 Termochromní efekt	24
4.2 Fotochromní efekt.....	25
4.3 Elektrochromní efekt	26
4.4 Chemochromní efekt.....	27
5 Piezoelektrické materiály	28
ZÁVĚR.....	31
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	32

ÚVOD

V dnešní době se velmi často setkáváme s materiály, které jsou označovány jako smart materiály. Od běžných materiálů se liší tím, že mění své vlastnosti za působení vnějších podnětů. Tyto materiály nachází široké využití v praxi, například v lékařství, letectví, robotice, kosmonautice a v mnoha dalších odvětvích. Myslím si, že v budoucnu budou tyto materiály ještě mnohem více využívány.

Cílem této bakalářské práce je seznámit se s problematikou smart materiálů. Provést základní rozdělení těchto materiálů. U každé skupiny uvést použití v praxi a na jakém principu daný materiál funguje. Dále bude uveden podrobnější popis čtyř hlavních skupin.

První skupinou budou materiály s tvarovou pamětí. U těchto materiálů bude popsán základní paměťový efekt, jednocestný i dvoucestný a vlastnosti paměťových materiálů - superelasticita, pseudoplasticita. Následuje přehled nejzákladnějších slitin a využití v praxi, hlavně v lékařství a letectví.

Druhou skupinou budou materiály vyzářující světlo. Bude popsán princip fluorescence, fosforescence, elektroluminiscence a jejich využití v praxi.

Další skupinu tvoří materiály měnící barvu, mezi které patří fotochromní, elektrochromní, termochromní a chemochromní materiály.

V poslední kapitole bude následovat seznámení s materiály pracujícími na principu piezoelektrického jevu, včetně principu tohoto jevu, zástupců těchto materiálů a využití v praxi.

1 Charakteristika smart materiálů

Smart materiály jsou definovány jako materiály, které jsou schopny výrazně a vratně měnit své vlastnosti působením vnějších podnětů. Mezi vnější faktory například patří teplota, světlo, napětí, vlhkost, pH, tlak, elektrické, magnetické pole. V závislosti na typu materiálu a vnějším podnětu se mohou měnit následující vlastnosti - tvar, velikost, barva, magnetická, tepelná, elektrická vodivost, viskozita. Smart materiály se stávají velmi populárními a nacházejí využití v mnoha oblastech, například v lékařství, letectví, robotice, elektrotechnice, stavebnictví, automobilovém průmyslu, ve sportu, ale také v zábavním průmyslu. [1]

1.1 Rozdělení smart materiálů

Na zobrazeném schématu 1.1 [1] lze vidět základní rozdělení smart materiálů. Jedná se o několik hlavních skupin a podskupin. V následujících kapitolách budou popsány materiály s tvarovou pamětí, piezoelektrické materiály, chromogenní systémy a světélkující materiály. Do budoucna se bude toto rozdělení určitě rozšiřovat z důvodu objevení a používání nových smart materiálů.

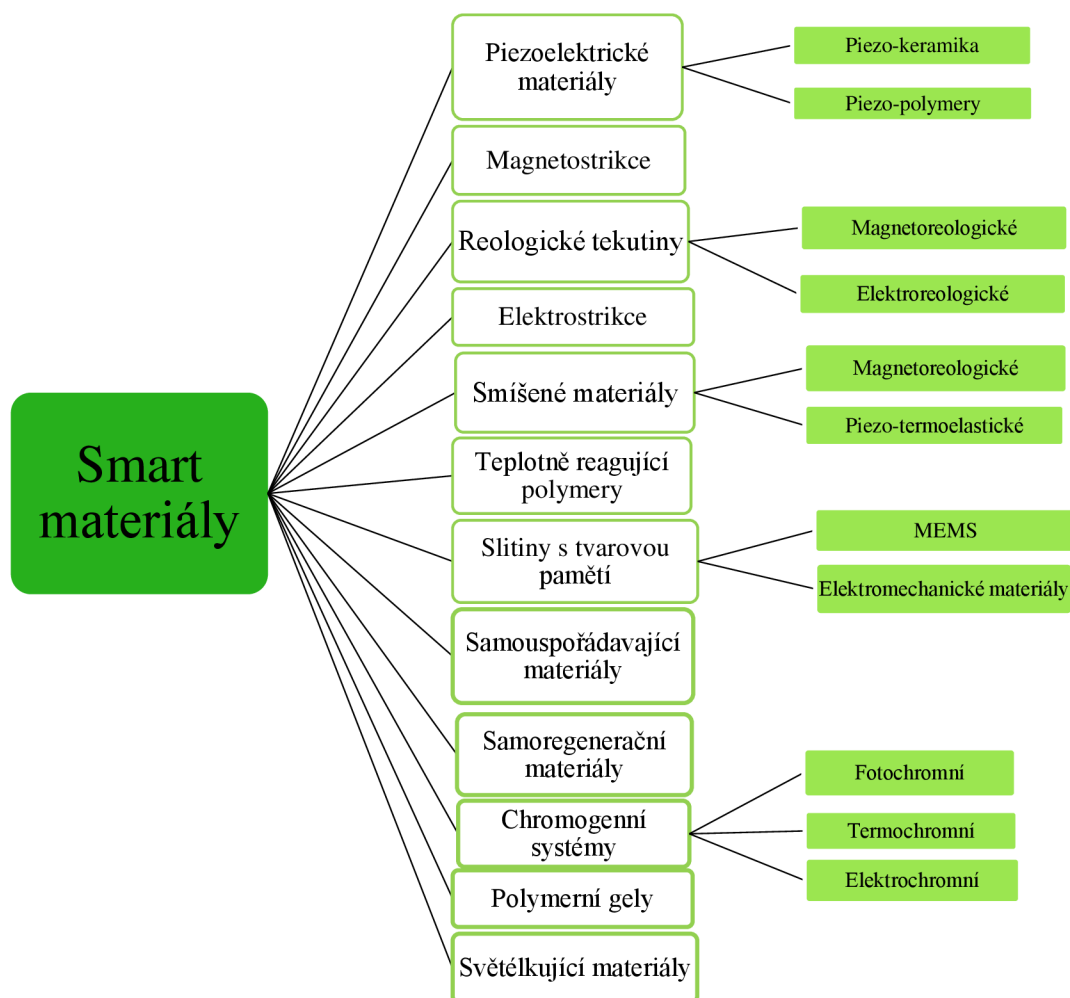


Schéma 1.1 Typy smart materiálů [1]

1.1.1 Magnetostrikce

Magnetostrikce je fyzikální vlastnost feromagnetických materiálů (železo, nikl, kobalt a jejich slitiny). Princip je takový, že těleso z feromagnetického materiálu, změny v magnetickém poli své rozměry. Nejčastěji se magnetostrikce využívá k rychlému a velmi přesnému zjištění polohy (obr. 1.1.1 [3]) a vzdálenosti, ale také u snímačů úhlu a náklonu vůči svislé ose. [2]



Obr. 1.1.1 Magnetostrikční tyčový snímač polohy [3]

1.1.2 Reologické tekutiny

Mezi reologické tekutiny patří elektroreologické tekutiny a magnetoreologické tekutiny. Při vystavení tekutiny elektrickému/magnetickému poli se u lineárně viskózní tekutiny během několika sekund zvyšuje viskozita a z kapaliny se stává látka podobající se pevné látce.

Tohoto jevu se dá využít u zařízení, kde je potřeba řídit viskozitu. Také k vývoji ovladatelných zařízení, která budou kontrolovat tuhost a předcházet tím následkům po zemětřesení a vichřicích. Využití elektro/magneto reologických zařízení s použitím nízké energie je například u konstrukčních tlumičů, kde lze nastavovat různý tlumící účinek. [4]

1.1.3 Elektrostrikce

Elektrostrikce je fyzikální jev, při kterém vlivem vnějšího elektrického pole dochází k deformaci ve všech dielektrických materiálech, na rozdíl od opačného piezoelektrického jevu, který se vykytuje pouze u piezoelektrických materiálů. Využití najdeme u sonarů v ponorkách nebo aktuátorech (pohonech). [5]

1.1.4 Teplotně reagující polymery

Teplotně reagující polymery jsou schopny reagovat na změnu teploty, převážně ve vodných roztocích. Teplotně citlivé polymery, které vykazují dolní kritickou rozpouštěcí teplotu (zkratka LCST; lower critical solution temperature), se stávají nerozpustnými po zahřátí. Horní kritická teplota UCTS (upper critical solution temperature), teplota patřící k systémům, které se rozpouštějí po zahřátí. Těchto vlastností je využito v mnoha oblastech - kontrola léčiv, tkáňové inženýrství, kapalinová chromatografie. [6,7]

1.1.5 Samouspořádvající materiály

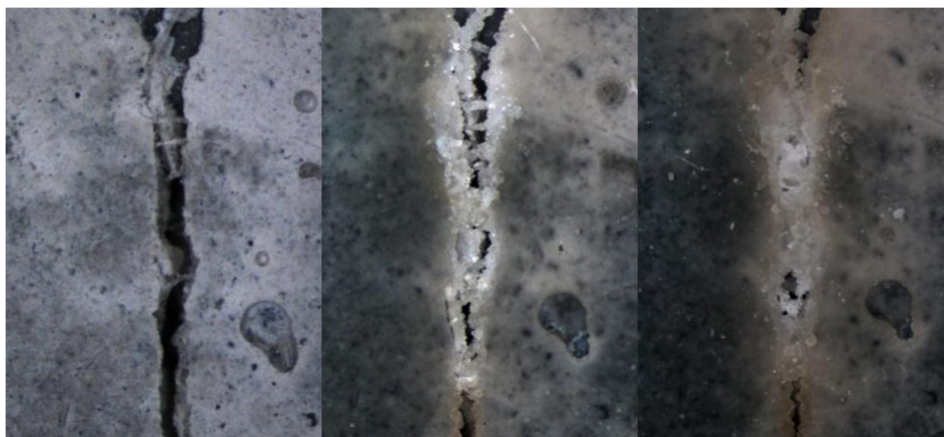
(Self-assembly materials)

Samouspořádvající materiály mají schopnost se sami přesunout z neuspořádané struktury do uspořádané struktury díky lokálním interakcím, ale bez vedení nebo řízení z vnějšího zdroje nebo se tato schopnost vyskytuje spontánně v přírodě. Self-assembly materiály mají širokou škálu aplikací, včetně povrchového smáčení, elektrochemie, odolnosti proti korozi, sestavení DNA nebo u buněčných interakcí [8]

1.1.6 Samo-regenerační materiály

Jedná se o různé typy materiálů, například polymery, elastomery, ale i kovy, keramiky a různé cementy. Tyto materiály jsou schopny se samy zregenerovat bez lidského zásahu. Samo-regenerační proces u polymerů může být aktivován vnějším podnětem, jako je změna teploty nebo světla.

Pokud se v materiálu objeví první trhliny, je materiál schopen se zcela obnovit a trhliny se mohou zcela uzavřít. Tohoto procesu se může využít například u kovů, aby se zabránilo vzniku koroze nebo u budov využitím vhodného cementu a příměsí. [9]



Obr. 1.1.6 Samoregenerující biobeton [10]

Na obr. 1.1.6 lze vidět biobeton, u kterého vědci využili určitého typu bakterií. Bakterie přežívají několik let a pokud dojde k porušení betonu, v tu chvíli se díky nim začne beton "sám léčit". Díky tomuto principu by se výrazně prodloužila životnost mostů, tunelů a silnic. [11]

1.1.7 Polymerní gely

Jsou trojrozměrné sítě tvořené řetězci makromolekul, které jsou na vybraných místech k sobě navzájem vázány. [12] Polymery reagují na vnější podněty nejčastěji na teplotu, světlo, pH, elektrické síly. Hydrogely jsou polymery s vysokým obsahem vody. Nachází využití v lékařství, kde jsou schopny zvlhčovat rány a zároveň absorbovat nadbytečný sekret. Dále mohou být využity při aplikaci léčiv, která se sama uvolňují do těla nebo jako látka, která má chladivý a zklidňující účinek. [13] Dlouhodobé kontaktní čočky (obr. 1.1.7, [15]) jsou vyrobeny z hydrogelů a silikonu, protože stále musí zůstat vlhké. Nejběžnější použití hydrogelů je v jednorázových plenkách. V průmyslu se uplatňují tzv. třepací gely, které reagují na síly a stávají se pevnými. [14]

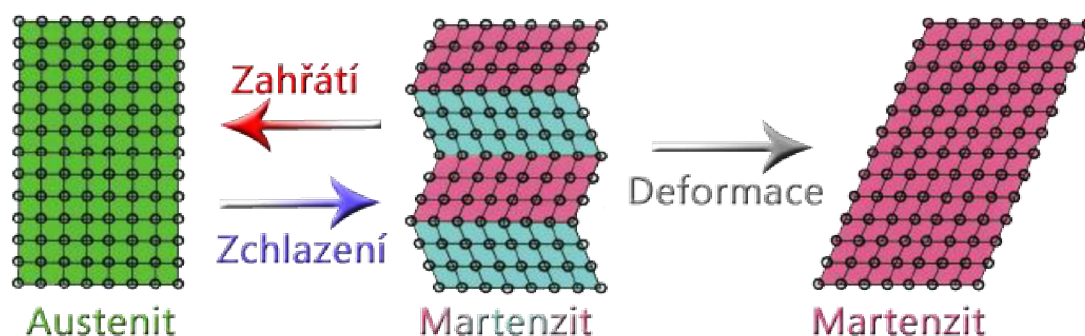


Obr. 1.1.7 Kontaktní čočky [15]

2 Materiály s tvarovou pamětí

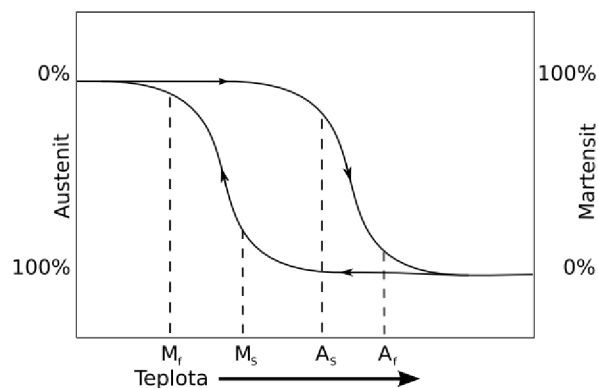
Materiály s tvarovou pamětí patří mezi velmi rozšířené smart materiály. Jedná se o schopnost materiálu vrátit se po deformaci do svého původního tvaru, spontánně nebo po zahřátí. U běžných kovových materiálů, pokud dojde k trvalé plastické deformaci, nelze obnovit původní tvar. Tyto materiály tedy nevykazují efekt tvarové paměti. [16]

Paměťový jev je způsoben martenzitickou transformací. Při zahřátí na určitou teplotu se mění vnitřní struktura z jedné krystalické struktury na druhou. Materiály s tvarovou pamětí se za každých okolností snaží dostat do stavu, který je pro ně v danou chvíli nejvýhodnější - energeticky nejúspornější. Při nižších teplotách se jedná o strukturu martenzitu. Martenzit má tetragonální, monoklinickou nebo ortorombickou krystalografickou strukturu. Hmota v martenzitické fázi vypadá celkově měkce, poddajně a snadno se deformuje. Při vyšších teplotách se struktura změní na austenit. Austenit je tuhý roztok uhlíku v γ železe, který má vysoce symetrickou krystalickou mřížku. Hmota je pevně vázána ve struktuře a jeví se pevně a tvrdě. Přechod z austenitu do martenzitu vypadá jako když je snaha původní krychli složit z kosých kvádrů, různě orientovaných k původní krychli. [16,17]



Obr. 2-1 Martenzitická transformace [18]

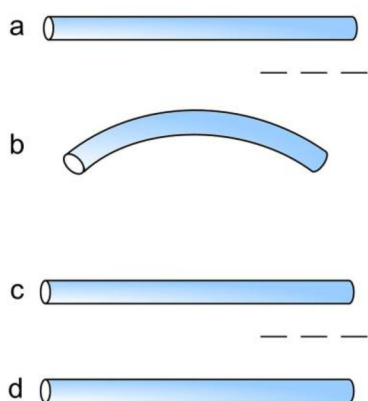
Martenzitická transformace (obr. 2-1 [18]) je bezdifúzní přeměna, u které dochází v látce k posunu atomů na vzdálenost menší než je meziatomární. I když se nejedná o žádné velké posunutí, dochází ke změně celkového tvaru slitiny. Přechod mezi martenzitem a austenitem se zobrazuje pomocí hysterézní smyčky, průběh hysterézní smyčky je zobrazen na obr. 2-2 [17]. Martenzit start M_s je teplota, kdy při ochlazování austenitu se začíná tvořit struktura martenzitu. Martenzit finish M_f je teplota konce přeměny austenitu na martenzit. Austenit start A_s je teplota, kdy při zahřívání se začíná tvořit austenit. Austenit finish A_f je teplota, která vyjadřuje konec přeměny martenzitu na austenit. [16,19]



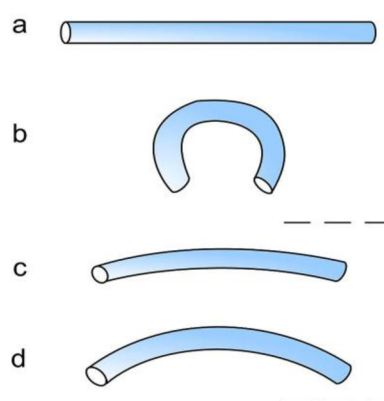
Obr. 2-2 Podíl martenzitu a austenitu v slitině [17]

Paměťový efekt bývá jednocestný nebo dvoucestný. Jednocestný cyklus je zobrazen na obr. 2-3 [21]. Pokud se materiál nachází pod teplotou A_s , můžeme ho libovolně deformovat. Při zahřívání nad teplotu přechodu se materiál bude dostávat do své původní formy, probíhá transformace z martenzitu na austenit. Při ochlazování na pokojovou teplotu se tvar materiálu již nemění. Ochlazení tedy nemá vliv na makroskopické změny tvaru. [19]

U dvoucestného cyklu, který je na obr. 2-4 [22], probíhá změna při zahřívání i při ochlazování na rozdíl od jednocestného. Materiál si tedy dokáže zapamatovat dva různé tvary, jeden při nízké teplotě v martenzitické fázi a druhý při vysoké teplotě v austenitické fázi. Dvoucestný paměťový efekt může materiál i získat, pokud je mnohonásobně opakovan jednocestný paměťový efekt a během něj se na vzorek působí deformací větší, než je mez kluzu martenzitu. Velikost síly, kterou vyvine materiál s dvoucestnou pamětí při přechodu mezi fázemi, je mnohem menší než při jednocestném efektu. Velikost vratné deformace je u materiálů s dvoucestným efektem menší, pouze okolo 1%. Tento efekt může materiál získat, ale také o něj může přijít, pokud se materiálu příliš silně brání ve změně tvaru. [19, 20]

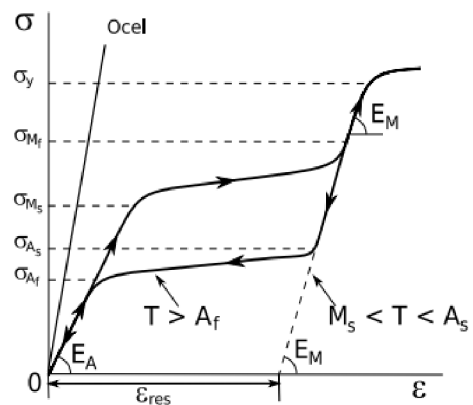


Obr. 2-3 Jednocestný paměťový efekt [21]



Obr. 2-4 Dvoucestný paměťový efekt [22]

Vlastnost, která se vyskytuje u materiálů s tvarovou pamětí, je superelastická. Průběh superelasticity je zobrazen na obr. 2-5 [17]. Ta se vyskytuje při deformaci za teploty vyšší než A_f , tedy v austenitické fázi. Pokud budeme v tomto případě působit na součást tahem nebo tlakem, přetransformuje se do martenzitu. Po odtažení se součást okamžitě vrátí do austenitu a do svého původního tvaru. Tato vratná (elastická) deformace může dosáhnout až 18%. [16]



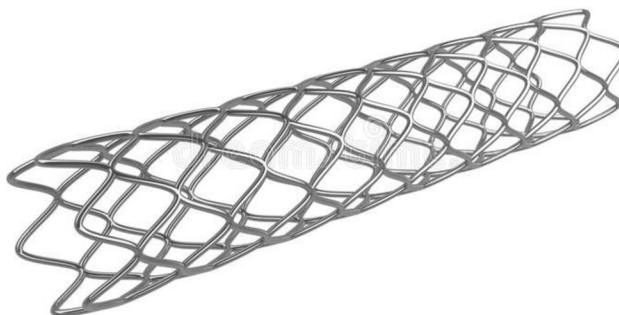
Obr. 2-5 Superelastická [17]

Další vlastností je pseudoplasticita. Vyskytuje se naopak při teplotě nižší než M_s , pokud se na slitinu s tvarovou pamětí při dané teplotě působí silou. Martenzit se snadno přetransformuje v rozmezí $\pm 5\%$ a vytvoří při daném zatížení ten nejvhodnější stav. U pseudoplasticity nedochází k pohybu skluzových systémů, ale pouze k pohybu fázových vnitřních rozhraní typu dvojčat. Po zahřátí se opět vrátí z martenzitu do austenitu a tím se vrátí i jev tvarové paměti. [17]

Nejznámější a nejpoužívanější slitinou s tvarovou pamětí je Nitinol, slitina niklu a titanu, která je velmi dobře odolná proti kyselinám a zásadám, proto se velmi často používá v lékařství. Na bázi mědi se používají slitiny CuAlNi nebo CuZnAl. Právě u měděných slitin může docházet při přechodu z jedné struktury do druhé také k přeměně barvy. Například u slitiny CuAlZn má austenit typicky měděnou barvu - načervenalá, ale martenzit je zbarven do žluta. Dalšími slitinami jsou například NiTiCr, NiTiFe, AuCd, u té byl poprvé pozorován jev tvarové paměti. [23]

Velmi často se s materiály s tvarovou pamětí setkáváme v lékařství. Při fixaci komplikovaných zlomenin, operacích nohou do O nebo X, zlomenin žeber se používají osteosyntetické svorky z materiálu s tvarovou pamětí, kdy je možnost pevně a blízko sebe spojit poškozené kosti. Tím dochází k rychlejšímu a účinnému srůstání. Při velmi komplikovaných zlomeninách se používají celé desky, které jsou upevněny z obou stran zlomené kosti a připevněny šrouby. [1]

Další využití materiálů s tvarovou pamětí je na výrobu chirurgických nástrojů, filtrů na zachycení krevních sraženin, dále při výrobě stentů (obr. 2-6 [24]). Jedná se o zdravotnický prostředek trubicovitého tvaru, který se za pokojové teploty zdeformuje do tvaru menšího, než je průřez tepny. Po zavedení do tepny se při zahřátí na tělesnou teplotu začne vracet do svého původního tvaru a tím se dosáhne rozšíření tepny a krev může zase bez problémů protékat. [19]



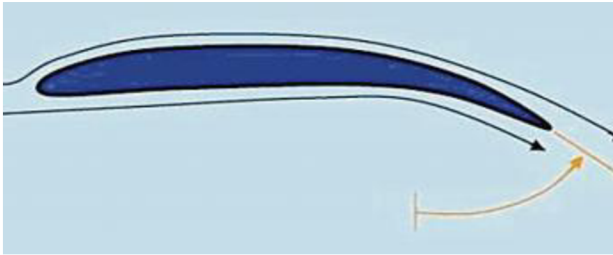
Obr. 2-6 Stent [24]

Ze slitiny NiTi se vyrábějí zubní rovnátka (obr. 2-7 [25]), která přináší mnoho výhod pro pacienta, který je musí nosit. Použitím tohoto materiálu s tvarovou pamětí lze dosáhnout stále stejné síly, která působí na zub a tím zkrátit dobu nošení. V tomto případě nejsou nutné tak časté kontroly u specialisty a celkově zahrnují větší pohodlí pro pacienta. [1] Brýlové obroučky, které jsou schopny odolávat poškození, jsou vyrobeny také z materiálu s tvarovou pamětí.

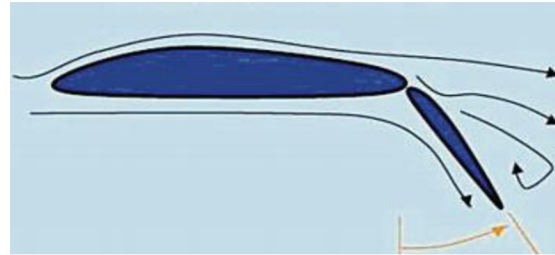


Obr. 2-7 Rovnátko [25]

V letectví jsou použity spojky z materiálu s tvarovou pamětí na spojování nesvařitelných materiálů, například u stíhaček. Vědci se snaží vytvořit letadla, u kterých je možné během letu dle daných podmínek změnit tvar křídla a to jen díky materiálům s tvarovou pamětí, dosáhlo by se tak lepšího odporu vzduchu. Rozdíl ve tvaru křídla je vidět na obr. 2-8 [1], obr. 2-9. [1] Materiály s tvarovou pamětí se již objevily i ve vesmíru. Obrovské antény jsou dopraveny složené a podchlazené do vesmíru, kde se vlivem slunečního záření samy rozvinou. [26]



Obr. 2-8 Křídlo vyrobené ze smart materiálů[1]



Obr. 2-9 Křídlo vyrobené z běžně používaných materiálů[1]

V robotice se vyrábějí ze smart materiálů různá miniaturní zařízení schopná vykonávat pohyb. Materiály s tvarovou pamětí jsou také vhodné jako tlumící zařízení v základech budov v oblastech s častými zemětřeseními. Byl sestaven také nitalolový motor, na kterém jsou nitalolové smyčky, které se na jedné straně ohřívají a na druhé ochlazují, tím se střídavě roztahují a smršťují a pohánějí tím rotor. V aktuátorech, některých spínačích kávovarů, okenních pantech u skleníku se také objevují materiály s tvarovou pamětí. [26, 27]

3 Materiály vyzařující světlo

Materiály z této skupiny, fungují na principu luminiscence. Luminiscence je jev, při kterém atomy nacházející se v excitovaném stavu vyzařují světlo. Atom se vyskytuje v základním stavu a má minimální energii. Pokud se v blízkosti atomu objeví záření ve formě fotonu, atom záření absorbuje, dochází ke zvýšení energie. Elektronu atomu přeskočí na vyšší energetickou hladinu, tento stav je nestabilní a po nějaké době se atom vrací do základního stavu. Aby mohla nastat tato změna, musí být vyzářena nadbytečná energie ve formě světla. Vyzářený foton má menší energii, respektive větší vlnovou délku než foton absorbovaný a z toho důvodu dochází ke změně barvy. [28] Luminiscenci můžeme rozdělit na fosforescenci a fluorescenci. Další dělení je podle způsobu excitace např. termoluminiscence, chemiluminiscence, elektroluminiscence, bioluminiscence.

3.1 Fluorescence

Jedná se o fyzikální jev, kdy látka, která pohltí budící elektromagnetické záření, je schopná nashromážděnou energii následně vyzářit v podobě světla. Návrat z excitovaného stavu do základního stavu trvá jen chvíli, řádově okolo 10^{-8} sekund. Platí, že excitační elektromagnetické záření má kratší vlnovou délku a tedy vyšší energii, než záření emitované. Mezi typické představitele excitačního záření patří viditelné světlo, ultrafialové světlo nebo Röntgenovy paprsky. [28, 29]



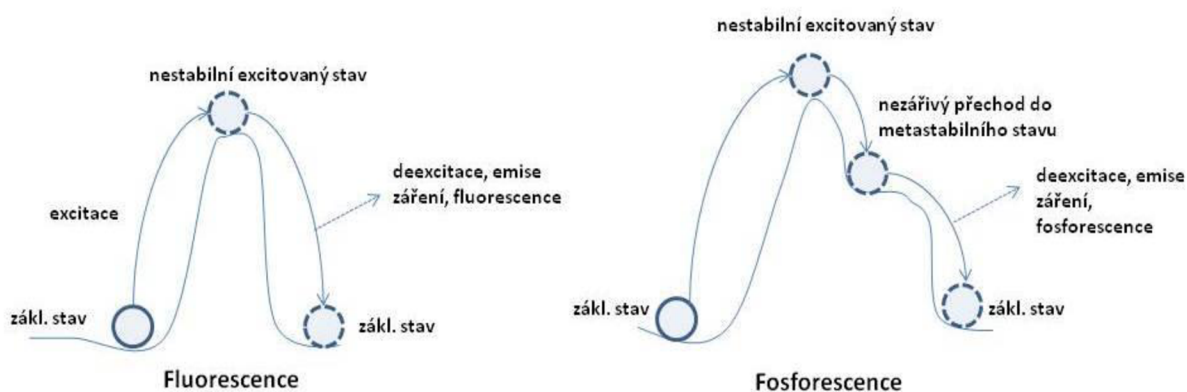
Obr. 3.1 Fluorescenční roztoky pod UV světlem [30]

Fluorescence je velmi využívána v praxi. Nejčastěji se s ní setkáváme u osvětlovací techniky například u úsporných zářivek. Ručičky hodinek, které ve tmě svítí, také fungují na principu fluorescence. Každý den se setkáváme s fluorescenčními barvami u bankovek, jedná se o jeden z ochranných prvků, ale i u různých cenných dokumentů, jízdenek a kolků. Při osvětlení UV lampou v zatemněné místnosti lze odhalit pomocí speciálních fluorescenčních barviv únik oleje a provozních kapalin z automobilu. Další využití najdou fluorescenční barviva při hydrogeologickém průzkumu podzemních vod a následném sledování jejich toků. V praxi to vypadá tak, že se do země vsříkne roztok netoxického barviva a na několika místech je sledováno, zda dojde k detekci fluorescence. Pokud ano, je ukázán detailní obraz podzemní struktury. Fluorescenční barviva se také využívají při zkoumání vzorků tkání pod mikroskopem. Pomocí barviv lze rychleji zjistit tkáňové změny a obecně studovat děje v buňkách. [29]

3.2 Fosforescence

Fosforescence funguje na stejném principu, jako fluorescence, hlavní rozdíl nastává v době návratu z excitovaného stavu, tato doba je mnohem delší a trvá řádově od sekund až po několik hodin až dní. V tomto případě se elektrony dostanou do energetické hladiny, ze které je těžký návrat. [28]

Na obrázku 3.2 [31] lze vidět rozdíl mezi fluorescencí a fosforescencí. U fluorescence se částice z nestabilního excitovaného stavu okamžitě dostává do stabilního stavu, naopak u fosforescence se částice z nestabilního excitovaného stavu dostane nejdříve do metastabilního stavu, ve kterém je schopna chvíli vydržet a až poté se dostane do stabilního stavu, tento děj tedy trvá delší dobu než u fluorescence.



Obr. 3.2 Mechanismus fluorescence a fosforescence [31]

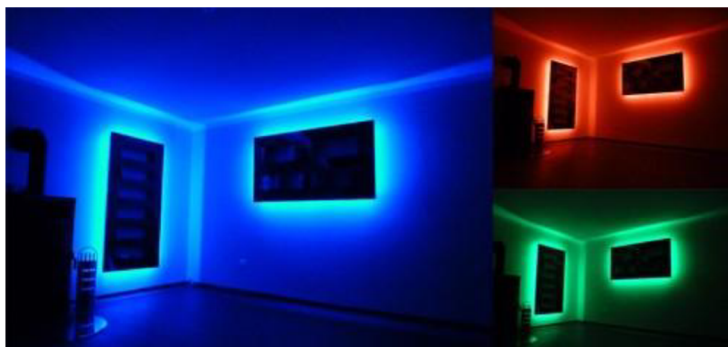
S fosforescencí se běžně setkáváme u cedulí, které například ukazují nouzové východy, pokud je tato cedule osvětlena, jsme schopni ještě několik minut poté vidět tuto ceduli. Všechny předměty, které jsou označovány jako svítící ve tmě, fungují na principu fosforescence. Také do signalizačních nátěrů se často přidávají fosforescenční látky v pigmentech. [28, 33]

3.3 Elektroluminiscence

V dnešní době asi nejrozšířenější skupinou materiálů vyzařující světlo používané v běžném životě a hlavně v elektrotechnice jsou materiály fungující na principu elektroluminiscence. Jedná se o luminiscenci generovanou přiloženým elektrickým polem nebo protékajících proudem.

Často používané jsou elektroluminiscenční fólie. Jedná se o fólii, která je tvořena několika vrstvami, nejdůležitější je vrstva sloučeniny fosforu, která je umístěna mezi dvěma elektrodami, oddělenými dielektrikem, kde jedna z elektrod je vždy transparentní. Po přivedení střídavého napětí na elektrody se mezi elektrodami generuje proměnlivé elektrické pole, které způsobí, že se začne vyzařovat světlo. [33, 34]

Elektroluminiscenční diody známé pod zkratkou LED (elektroluminiscenční dioda), které se vyznačují vysokou účinností přeměny elektrické energie na světlo, jsou velmi populární (obr. 3.3 [36]). [28] V dnešní době se začíná také pracovat s tzv. OLED osvětlením, které je rovnoměrné, spotřebovává minimum energie a může nabývat různých tvarů, má tedy široké uplatnění. Jedná se o elektroluminiscenční látku, která využívá organické materiály. [35] Bez elektroluminiscence by nebyly podsvícené televize, telefony, GPS, palubní desky, domovní zvonky, různé informační, orientační nebo nouzové tabule. V dnešní době se také často využívá tento jev v reklamním průmyslu a u dekorativních předmětů.



Obr. 3.3 LED osvětlení [36]

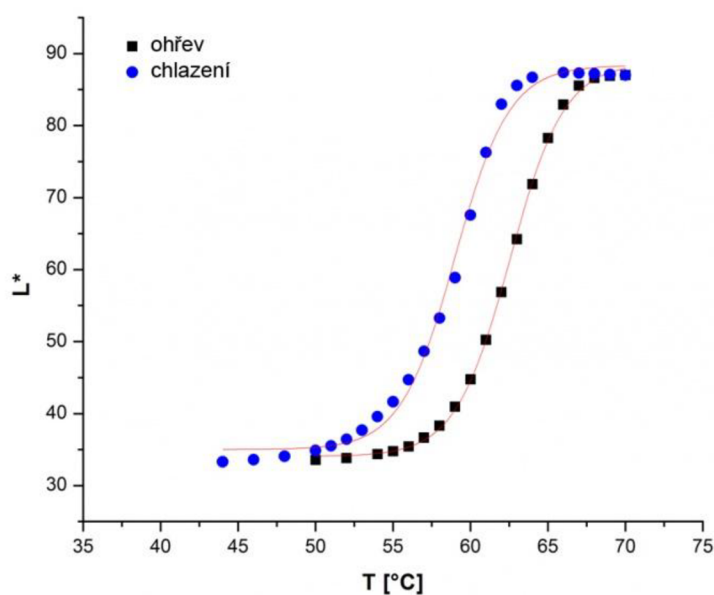
4 Materiály měnící barvu

Mezi další skupinu smart materiálů patří materiály, u kterých dochází ke změně barvy. Tyto materiály mohou být souhrnně pojmenovány jako chromické. Dělí se do jednotlivých skupin dle druhu vnějšího podnětu. Materiály, které mění barvu působením světla jsou označovány jako fotochromické. Termochromické jsou materiály měnící barvu pod vlivem změny teploty. Další skupinou jsou elektrochromické materiály, které mění barvu za působení elektrického proudu, a chemochromické materiály, jejichž barva se mění při působení daného chemického prostředí. Ke změně barvy může docházet i za působení ostatních vlivů jako je tlak, kyselost prostředí, vlhkost a mnoho dalších jiných vlivů.

4.1 Termochromní efekt

Termochromické materiály mění barvu materiálu pod vlivem změny teploty, této změny lze dosáhnout několika způsoby. V dnešní době je často využíváno tekutých krystalů. Tekutý krystal je stav hmoty, který má vlastnosti mezi pevným a kapalným skupenstvím. Vyskytuje se v cholesterickém upořádání, v tomto uspořádání jsou osy molekul navzájem rovnoběžné, ale směr os molekul je oproti osám molekul v předchozí vrstvě pootočen. Vrstva cholesterických kapalných krystalů mění barvu odraženého světla v závislosti na teplotě s velmi velkou citlivostí. [41]

Dalším způsobem jsou pigmenty na bázi molekulárních komplexů s přenosem náboje. Základem těchto pigmentů je tříložková směs vhodného barviva, nejčastěji leuko barviva, vývojky a odpovídajícího rozpouštědla. Zahřátím této tříložkové směsi dochází k tání rozpouštědla. Teplota tání rozpouštědla je faktorem, který určuje aktivační teplotu, při které dochází ke změně barevnosti. Volba vhodných chemikálií je důležitá pro správné fungování termochromního jevu. Změna jako u jiných smart materiálů je reverzibilní. Nejedná se o skokovou změnu, průběh ohřevu a chlazení zobrazen na obr. 4.1-1 [41]. Graf zobrazuje závislost měrné světlosti L^* na teplotě. [40, 41]



Obr. 4.1-1 Hystereze termochromní směsi [41]

Termochromické kapalné krystaly se používají při měření teploty například u páskových čelových teploměrů, jsou levné, bezpečné, snadno použitelné. Na stejném principu pracují testery baterií, které měří elektrickou energii nepřímo měřením teploty. Speciální pigmenty mohou být aplikovány na textil, papír a při dotyku změni svou barvu, většinou jsou používány jako propagační předměty (obr. 4.1-2 [42]).



Obr. 4.1-2 Keramický hrnek měnící barvu [42]

4.2 Fotochromní efekt

Fotochromismus je jev definovaný jako světelně indukovaná reverzibilní reakce molekuly. Tato změna v absorpčním spektru je doprovázena barevnou změnou dané molekuly. Výchozí látka je bezbarvá, po působení UV záření se z ní stává barevná látka, která může být absorpcí viditelného záření a nebo teplem převedena zpět na původní látku. [37, 38]

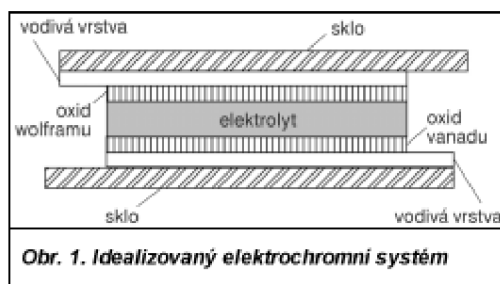
Nejčastěji jsou použity fotochromní materiály u samozabarvovacích brýlových čoček (obr. 4.2 [39]). Tyto čočky reagují na kontakt s UV zářením, po odstranění UV záření dochází k vratné změně, jelikož se jedná o reverzibilní proces a materiál se dostává opět do své původní formy. Tento jev se dále vyskytuje u skel automobilů, v oknech domů, dozimetrických materiálů a speciálních barevných nátěrů.



Obr. 4.2 Sluneční brýle [39]

4.3 Elektrochromní efekt

Elektrochromní látky mění vratně optické vlastnosti při průchodu elektrického proudu nebo vložení do elektrického pole. Jsou rozlišovány dvě skupiny látek, které mohou být využity pro elektrochromní zařízení. První skupinou jsou pevné látky a druhou skupinou látky rozpuštěné jako roztok. Elektrochromní jev látek je založen na interkalaci, tyto látky mohou do své krystalové struktury přijímat a opět z ní uvolňovat ionty nebo atomy dostatečně malých rozměrů. Typickým představitelem je oxid wolframový WO_3 . Krystalová struktura wolframu obsahuje dutiny, které jsou navzájem propojeny kanály. Proces lze celkem snadno řídit elektrickým proudem a tento proces je doprovázen výraznou změnou barvy.



Obr. 4.3-1 Idealizovaný elektrochromní systém [44]

Na obr. 4.3-1 [44] je zobrazen idealizovaný elektrochromní systém, ve kterém probíhá interkalační reakce oxidu wolframového. Základ je tvořen dvěma deskami, nejčastěji se jedná o sklo. Z jedné strany jsou desky opatřeny elektricky vodivou deskou, na které je příslušný elektrodový materiál. Desky jsou přiloženy k sobě přes vrstvu elektrolytu. Pracovním materiálem je oxid wolframový na jedné elektrodě a na druhé je oxid vanadičný, který nepodléhá skoro žádné barevné změně. Elektrolytem je například roztok lithné soli. Ke změně dochází během krátkého časového úseku 10-20s. Změna vyžaduje výkon v řádu desítek miliwattů na centimetr čtverečný. Velkou výhodou těchto látek je jejich výdrž. V daném stavu beze změny zůstávají po dobu několika hodin až dní.

Aby nastal opačný stav, musí být přivedena přibližně stejně velká energie opačného směru. Pokud je elektrodová látka rozpuštěna v elektrolytu, jedná se o druhou skupinu látek, které mohou být využity jako elektrochromní zařízení. Nejčastěji jsou využity látky zvané viologen, u kterých lze reverzibilně měnit barvu. Velmi často se používají v kombinaci s interkalační protielektrodou, aby se dosáhlo co nejlepšího výsledku. [43, 44]



Obr. 4.3-2 Ztmavovací okna [43]

V praxi jsou nejznámější elektrochromní skla (obr. 4.3-2 [43]), u kterých lze elektronicky ovládat optickou propustnost oken. U budov vede funkce samozřejmě k velké úspoře energie. Přes den se uspoří energie na chlazení místnosti, která je vystavena slunečnímu záření, a v noci jsou omezeny ztráty tepla sáláním z místnosti ven. Na principu elektrodové látky rozpuštěné v elektrolytu se vyrábějí zpětná zrcátka pro luxusnější auta, kdy se při dopadu světla přicházejícího odzadu zatmí a zabrání oslnění řidiče. Dále je možné z těchto materiálů vyrábět okna v letadlech. [44]

4.4 Chemochromní efekt

Chemochromické materiály mění optické vlastnosti při působení specifického chemického prostředí. Elektron, který byl dříve součástí jedné chemické vazby v určité poloze, může být umístěn znovu do jiné polohy uvnitř molekuly, kde přítomnost nebo nepřítomnost elektronu způsobuje, že molekula absorbuje určitou barvu světla a dochází tedy ke změně barvy.

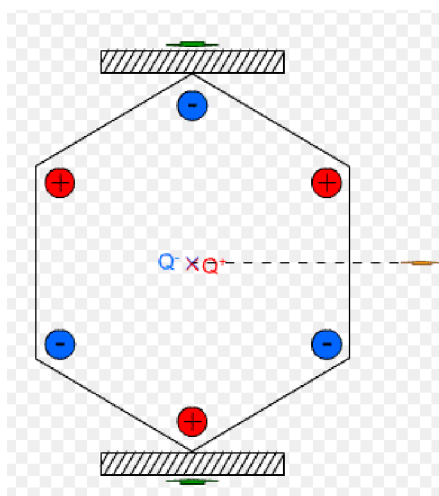
Využití bylo nalezeno u lakmusových papírů (obr. 4.4 [45]), které jsou určeny na zjištění kyselosti nebo zásaditosti chemické látky. U těhotenských testů chemikálie reagují na hormon HCG, kdy při obsažení tohoto hormonu v moči nastane změna barvy. NASA na principu chemochromické technologie vynalezla chemochromický senzor pro detekci úniku plynného vodíku. [46]



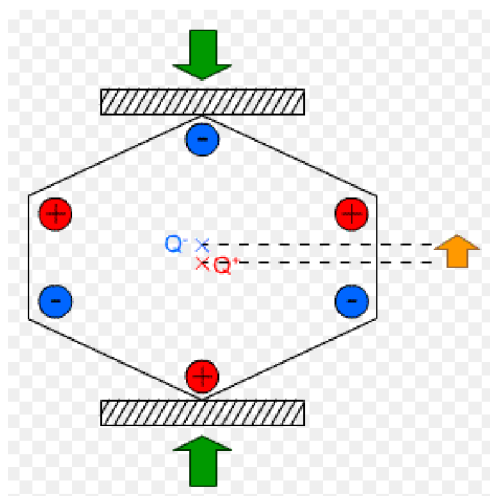
Obr. 4.4 pH indikátor [45]

5 Piezoelektrické materiály

Piezoelektrické materiály pracují na principu piezoelektrického jevu. Nejdříve byl objeven přímý piezoelektrický jev. Jedná se o schopnost krystalu generovat elektrické napětí při jeho deformování, například při působení tahem, tlakem, ohybem nebo krutem. Při dalším zkoumání se přišlo na opačný jev, kdy se krystal v elektrickém napětí deformuje. Piezoelektrický jev se vyskytuje pouze u krystalů, které jsou středově nesymetrické. Princip je takový, že deformací se ionty opačných nábojů posunují v krystalové mřížce. Elektrická těžiště kladných a záporných iontů, která se v nezdeformovaném stavu nacházejí ve stejném bodě, se od sebe vzdálí. Tento průběh je zobrazen na obr. 5-1,2 [48]. Na povrchu krystalu se vytvoří povrchový elektrický náboj. [47]



Obr.5-1 Nedeformovaný krystal [48]



Obr.5-2 Zdeformovaný krystal [48]

Opačným jevem je nepřímý piezoelektrický jev. Vnější elektrické pole působí na posunutí iontů, které vede k určité deformaci krystalu. Pokud se krystal připojí na střídavé napětí, lze tímto způsobem získat zdroj zvuku nebo ultrazvuk. Frekvenci zvuku lze ovlivnit materiálem krystalu, převážně vhodnou volbou tloušťky a plochy dané destičky a frekvenci připojeného střídavého napětí. [49] Při vysokých teplotách dochází u všech materiálů ke ztrátě piezoelektrických vlastností. V materiálu dochází k narušení uspořádání iontů. Daná teplota se nazývá Curierova a je pro každý materiál jiná. S piezoelektrickým jevem úzce souvisí piezorezistivní jev, protože při deformaci krystalické mřížky působením vnější síly dochází také ke změně měrného elektrického odporu.

Přehled piezoelektrických materiálů:

- přírodní materiály - monokrystalický křemen - křišťál (obr. 5-3 [52]), turmalín (obr. 5-4 [53]), topaz, Seignettova sůl - vínan draselno-sodný (první látka, u které byl objeven piezoelektrický jev, se používá v potravinářství jako antioxidant)
- keramické materiály, polykrystaly - titaničitan barnatý BaTiO_3 , wolfram sodný Na_2WO_4 , niobičitan draselný KNbO_3 , směs tuhých roztoků PbZrO_3 (PZ) - PbTiO_3 (PT). Tato směs je často známá pod zkratkou PZT a je používaná kvůli svým výborným piezoelektrickým vlastnostem [50]
- polymery - v syntetických polymerech, jako je polypropylen, polystyrene, poly(methyl methacrylate), je piezoelektrický jev velmi slabý a nestabilní. Silný piezoelektrický jev byl objeven v látkách PVDF - polyvinylidenfluorid a PVF2 - difluorpolyetylénu, které jsou obvykle vyráběny v tenkých vrstvách [51]



Obr. 5-3 Křišťál [52]

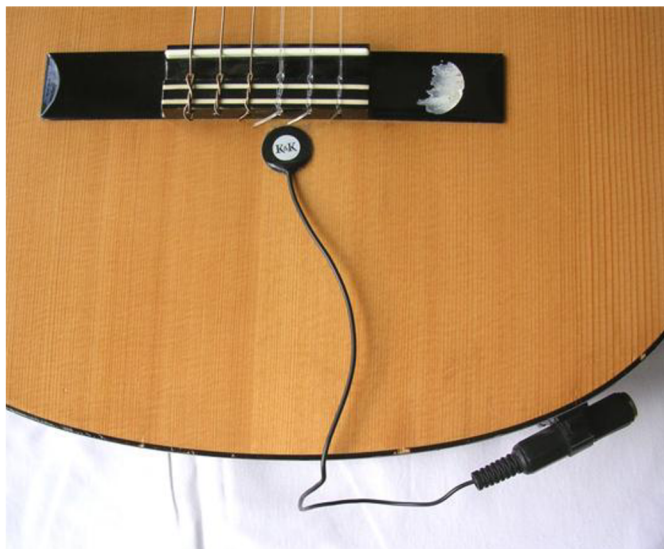


Obr. 5-4 Turmalín [53]

Piezoelektrické materiály mají velké využití v praxi. Používají se jako senzory tlaku, síly, výchylky, deformace, vibrace, zrychlení, snímač zvuku v hudebních nástrojích. Jeden typ snímačů zobrazen na obr. 5-5 [57]. Piezoelektrické prvky mohou vysílat i přijímat neslyšitelný ultrazvuk. Toho jevu se využívá v ultrazvukových defektoskopech na určení vad v materiálu nebo v lékařství při kontrole lidského plodu, rozbíjení ledvinových a žlučových kamenů. [54]

Drobná zařízení jako jsou reproduktory nebo mikrofony pracují také na principu piezoelektrického jevu. Dále v generátorech, které využívají energii okolí, například vibrace, pohyb lidské těla nebo akustický hluk, je využit daný jev. Generuje se v nich malé napětí a výkon.

Široké uplatnění mají také v motorech a aktuátorech, transformátorech, tiskárnách, oscilátorech, vstřikovačích nebo v pevných discích u počítače. Hodně lidí se běžně s tímto jevem setkává při použití zapalovačů v podobě krátkodobého výboje nebo u tlačítek zvonků. Do budoucna velmi dobré uplatnění najdou piezoelektrické materiály v oblasti tlumení hluku a vibrací. [55, 56]



Obr. 5-5 Snímač zvuku [57]

ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce byla charakteristika smart materiálů. V práci bylo na začátku provedeno obecné rozdělení smart materiálů, popis jednotlivých skupin, hlavně jejich vlastností a využití v praxi. V dalších kapitolách byly podrobněji popsány nejrozšířenější smart materiály.

Nejprve byly popsány materiály s tvarovou pamětí. U těchto materiálů bylo zaměřeno na paměťový efekt, typické zástupce těchto materiálů a vlastnosti paměťového efektu, kterými je superelastická a pseudoplastická. Na konci této kapitoly bylo poukázáno na široké využití materiálů s tvarovou pamětí v praxi.

Třetí kapitola se zaměřila na materiály vyzařující světlo. Byl proveden podrobný popis principu fluorescence, fosforescence a elektroluminiscence.

Další skupinou, která byla detailněji popsána v této práci je skupina materiálů měnící barvu při působení vnějšího podnětu. V kapitole byl zahrnut elektrochromní, termochromní, fotochromní a chemochromní efekt. Popsáno bylo i jejich využití v praxi a důkaz toho, že s těmito materiály se běžně setkáváme.

V poslední kapitole byl představen piezoelektrický efekt, jeho princip a využití v praxi.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] SMART MATERIALS AS MODERN ENGINEERING SUBSTANCES. *Advances in Science and Technology Research Journal* [online]. 2013, 17(7), 66-72 [cit. 2018-05-14]. Dostupné z: <http://www.astrj.com/Smart-materials-as-modern-engineering-substances,162,0,2.html>
- [2] Magnetostrikční snímače vzdálenosti. *AUTOMA* [online]. Kabeš [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: http://automa.cz/cz/casopis-clanky/magnetostrikcni-snimace-vzdalenosti-2007_04_34229_2684/
- [3] Magnetostrikční snímače. *ALPHA international* [online]. [cit. 2018-05-14]. Dostupné z: <http://www.alphaint.cz/magnetostrikcni-snimace-g-serie/>
- [4] SCHWARTZ, M. M. Smart materials. Boca Raton: CRC Press, 2008, 1 sv. kap 4.2.1.4 ISBN 978-1-4200-4372-3
- [5] PETRŽÍLKA, Václav; JOSEF, Slavík. Piezoelektrína a její použití v technické praxi. [s.l.]: Jednota českých matematiků a fyziků,- 1940.
- [6] Studies on thermoresponsive polymers. *Asian Journal of Pharmaceutical Sciences* [online]. 2015, (Volume 10, 2), 99-107 [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1818087614000634>
- [7] Uzavření Teplotně Citlivých Polymerů. *Cyclodextrin* [online]. Zibo Qianhui, 2017 [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: <http://www.cz.cyclodextrinchina.org/news/closure-of-thermo-sensitive-polymers-by-butyl-8031380.html>
- [8] Self-Assembly Materials. *Sigma Aldrich* [online]. c2018 [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: <https://www.sigmaaldrich.com/materials-science/material-science-products.html?TablePage=19812729>
- [9] SCHWARTZ, M. M. Smart materials. Boca Raton: CRC Press, 2008, 1 sv. kap 4.3.6 ISBN 978-1-4200-4372-3
- [10] Nové technologie. *Autodeskclub* [online]. Hendrik, Jonkers, 2015 [cit. 2018-05-14]. Dostupné z: <http://autodeskclub.cz/clanek/nove-technologie-biobeton/>
- [11] Self-Healing Concrete. *Industry tap* [online]. Nidhi Goyal, 2015 [cit. 2018-05-14]. Dostupné z: <http://www.industrytap.com/self-healing-concrete-can-repair-cracks-bacteria/29051>
- [12] Hydrogels. *Smart Materials* [online]. [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: <https://sites.google.com/site/mattknealysmartmaterials/hydrogels>
- [13] Fyzika polymerů. *E-nano* [online]. [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: <https://nanoed.tul.cz/course/view.php?id=27>
- [14] Hydrogely v léčbě ran. *Zelená hvězda* [online]. 2012 [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: <http://www.zelenahvezda.cz/pacientska-sekce/p-rany/hydrogely-v-lecbe-ran>
- [15] Kontaktní čočky pro starší děti. In: *Kukátko* [online]. c2013 [cit. 2018-05-14]. Dostupné z: <https://www.detskeoci.cz/jak-probiha-lecba/kontaktني-cocky/kontaktني-cocky-pro-starsi-deti/>
- [16] ŌTSUKA, Kazuhiro a Clarence Marvin WAYMAN. *Shape memory materials*. 1998. New York: Cambridge University Press, 1998, s. 1-5. ISBN 05-214-4487-X.
- [17] ODSTRČIL T., ODSTRČIL M. *Slitiny s tvarovou pamětí* [online]. Praha: FJFI-ČVUT [cit. 2018-05-14]. Dostupné z: <http://fyzsem.fjfi.cvut.cz/2007-2008/Zima07/proc/slitiny.pdf>
- [18] Martenzitická transformace. In: *Wikipedia* [online]. Odstrčil, 2006 [cit. 2018-05-20]. Dostupné z:

- https://cs.wikipedia.org/wiki/Slitiny_s_tvarovou_pam%C4%9Bt%C3%AD#/media/File:Transformace.png
- [19] KOVOVÉ MATERIÁLY S TVAROVOU PAMĚTÍ. *Engineering magazine* [online]. Machek [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <http://www.engineering.sk/strojarstvo-extra/2742-kovove-materialy-s-tvarovou-pameti>
- [20] Materiály s tvarovou pamětí. *Docplayer* [online]. Brno: Petráš, Klusák, Ústav fyziky materiálů [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/16971067-Materialy-s-tvarovou-pameti.html>
- [21] One way shape memory effect. In: *Wikipedia* [online]. 2006 [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Shape-memory_alloy#/media/File:SMAoneway.jpg
- [22] Two way shape memory effect. In: *Wikipedia* [online]. 2006 [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Shape-memory_alloy#/media/File:SMAtwo-way.jpg
- [23] SCHWARTZ, Mel M. *Encyclopedia of smart materials*. New York: J. Wiley, c2002, s. 921-925. ISBN 04-711-7780-6.
- [24] Stent. In: *Dreamstime* [online]. c2000-2018 [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <https://www.dreamstime.com/stock-photo-stent-image24646770>
- [25] Fixní rovnátka. In: *Lidovky.cz* [online]. 2016 [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: https://relax.lidovky.cz/foto.aspx?r=lnzdravi&foto1=APE639cac_shutterstock_247862461.jpg
- [26] V podprsence či brýlích jsou chytré kovy. *Technet.cz* [online]. Škopek, 2005 [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: https://technet.idnes.cz/v-podprsence-ci-brylich-jsou-chytre-kovy-za-kratky-cas-je-najdeme-vsude-1m4/hardware.aspx?c=A050419_210514_hardware_psp (
- [27] *Slitiny s pamětí* [online]. Plzeň: Gruber, 2007 [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: http://www.spstr.pilsedu.cz/osobnistranky/josef_gruber/clanky/nitinol.pdf
- [28] LUMINISCENCE. *Web chemie* [online]. Klára Baková, 2016, 26. 01. 2016 [cit. 2018-04-28]. Dostupné z: <http://www.webchemie.cz/luminiscence.html>
- [29] Fluorescence. *Chemie a světlo* [online]. c2018 [cit. 2018-04-28]. Dostupné z: http://www.chemieasvetlo.cz/?page_id=29
- [30] Fluorescence rainbow. In: *Wikipedia* [online]. Maxim Bilovitskiy, 2014, 3 January 2014 [cit. 2018-05-1]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Photoluminescence#/media/File:Fluorescence_rainbow.JPG
- [31] Fosforescence. In: *Chemie a světlo* [online]. c2018 [cit. 2018-04-28]. Dostupné z: <http://www.chemieasvetlo.cz/wp-content/uploads/2015/07/fosforescence-mechanismus.jpg>
- [32] Elektroluminiscenční fólie. *AUTOMA* [online]. Milan Caha, c2016 [cit. 2018-04-28]. Dostupné z: http://automa.cz/cz/casopis-clanky/novy-konstrukcni-prvek-elektroluminiscenci-folie-2000_03_27641_1795/
- [33] Elektroluminiscence ve světelné technice. *Časopis SVĚTLO* [online]. 2015 [cit. 2018-04-28]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/casopis/tema/elektroluminiscence-ve-svetelne-technice--16351>
- [34] Co je elektroluminiscence. *EL-lumio* [online]. TAK, c2009 [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: <http://www.el-lumio.cz/co-je-elektroluminiscence.htm>

- [35] Nové materiály a pokročilé osvětlení pro budoucnost. *StavbaWEB* [online]. Riccardo Gigante [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: <https://stavbaweb.dumabyt.cz/nove-materialy-a-pokroile-osvtleni-pro-budoucnost-9552/clanek.html>
- [36] Moderní LED osvětlení. *Aktualitycz* [online]. [cit. 2018-04-30]. Dostupné z: <https://aktualitycz.cz/moderni-led-osvetleni-muze-byt-i-ve-vasem-interieru/>
- [37] Molekulární proudové spínače. *CHEMPOINT* [online]. Vysoké učení technické: Jiří Navrátil, 2011, 1.11:2011 [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: <http://www.chempoint.cz/molekularni-proudove-spinace>
- [38] Funkční barviva. *Chemický web* [online]. [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: <http://canov.jergym.cz/barva/a/f.html>
- [39] Sluneční brýle. In: *Hedvabnastezka.cz* [online]. Svět outdooru, c2010 [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: <https://www.hedvabnastezka.cz/slunecni-bryle-wiley-x-i-s-dioptriemi/>
- [40] Termochromní pigmenty na bázi molekulárních komplexů. *CHEMPOINT* [online]. Univerzita Pardubice: Ondřej Panák, 2012, 1.06.2012 [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: <http://www.chempoint.cz/termochromni-pigmenty-na-bazi-molekularnich-komplexu>
- [41] Kapalné krystaly. *Encyklopedie fyziky* [online]. Reichl, Všetička, c2006-2018 [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/646-kapalne-krystaly>
- [42] Ceramic Color Changing Mug. *AGTIMURAN* [online]. [cit. 2018-05-1]. Dostupné z: http://www.agtimuran.com/product/index.php?route=product/product&product_id=171
- [43] Ztmavovací okna. *CHEMPOINT* [online]. Vysoké učení technické v Brně: Jozef Krajčovič, 2011, 1.12.2011 [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: <http://www.chempoint.cz/elektrochromismus-a>
- [44] Okna s elektronickou regulací optických vlastností. *Časopis SVĚTLO* [online]. Vondrák, Sedlaříková, 2004 [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/casopis/tema/okna-s-elektronickou-regulaci-optickych-vlastnosti--16564>
- [45] Lakmusový papírek. In: *OmniPrax* [online]. c1998-2018 [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: <https://www.omniprax.cz/obr/c39542.jpg>
- [46] Chemochromic materials. *Smart materials* [online]. Simpson, 2013 [cit. 2018-04-25]. Dostupné z: <https://sites.google.com/site/smart00materials/materials/chemochromic-materials>
- [47] Snímače mechanického namáhání. *Přístroje pro měření fyzikálních veličin* [online]. [cit. 2018-05-11]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1590>
- [48] Piezoeffekt. In: *Wikipedia* [online]. 2011 [cit. 2018-05-11]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Piezoelektrick%C3%BD_jev#/media/File:Piezoeffekt350px_clr.gif
- [49] Piezoelektrický jev. *Encyklopedie fyziky* [online]. Reichl, Všetička, c2006-2018 [cit. 2018-05-11]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/419-vysvetleni-jevu>
- [50] SCHWARTZ, Mel M. *Encyclopedia of smart materials*. New York: J. Wiley, c2002, s. 151-161. ISBN 04-711-7780-6.
- [51] SCHWARTZ, Mel M. *Encyclopedia of smart materials*. New York: J. Wiley, c2002, s. 780-791. ISBN 04-711-7780-6.

- [52] Krystal. In: *IDnes.cz* [online]. 2017, 29. srpna 2017 [cit. 2018-05-11]. Dostupné z: https://olomouc.idnes.cz/foto.aspx?r=olomouc-zpravy&foto1=LDS6d9cbe_krystal.jpg
- [53] Meloun Turmalín. In: *Fler kreativní svět* [online]. 2012 [cit. 2018-05-11]. Dostupné z: <https://www.fler.cz/zbozi/meloun-turmalin-mozambik-c-4-2600627>
- [54] PYROELEKTRICKÝ A PIEZOELEKTRICKÝ JEV. *Techmania Science Center* [online]. Králová [cit. 2018-05-11]. Dostupné z: <http://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/elektrostatika/pyroelektricky-piezoelektricky-jev>
- [55] Piezoelektrické materiály. *MatNet* [online]. c2006 [cit. 2018-05-11]. Dostupné z: <http://www.matnet.sav.sk/index.php?ID=347>
- [56] KOUKOLÍK, Václav. Využití piezoelektrického jevu v praxi [online]. Plzeň, 2013 [cit. 2018-05-11]. Dostupné z: <https://portal.zcu.cz/portal>. Diplomová práce. Západočeská univerzita Plzeň. Vedoucí práce Doc. Ing. Eva Kučerová, CSc.
- [57] Piezoelectric. In: *Wikipedia* [online]. Georg Feitscher, 2005 [cit. 2018-05-11]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Piezoelectricity#/media/File:Piezoelectric_pickup1.jpg