



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A
BIOMECHANIKY

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

SMART MATERIÁLY PRO AKTUÁTORY

SMART MATERIALS FOR ACTUATORS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Patrik Brehovský

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Rostislav Huzlík, Ph.D.

BRNO 2018

Abstrakt

Bakalárska práca „Smart materiály pro aktuátory“ sa zaoberá vhodným využitím materiálov, označovaných ako inteligentné pre ich vlastnosti, v oblasti aktuátorov. Z počiatku sa práca zaoberá hlavnými požiadavkami na aktuátory, ktoré je nutné určiť pri výbere vhodného aktuátora pre vznikajúci projekt. Následne je spracovaná literárna rešerše pre typy smart materiálov vhodných pre použitie u aktuátorov. V druhej časti sú vybrané niektoré materiály a je spravený ich podrobnejší popis. Koniec práce tvorí vyhodnotenie jednotlivých materiálov ako vhodných pre vopred určené aplikácie a vymenovanie dôvodov pre zvolenie materiálu.

Summary

The bachelor's thesis "Smart materials for actuators" deals with appropriate use materials, named smart, in actuators. At the beginning, the thesis completes requests about actuators, which we need to set before making project. Next part is about the research of smart materials suitable used in actuators. The thesis continues with description of few more interesting smart materials. Thesis is ended with summary, which material is suitable to use for few selected projects and why.

Kľúčové slová

aktuátor, smart materiály, piezokeramika, magnetostrikcia, tvarovo pamäťový efekt, zliatiny, meď, Nitinol, superelastická, Galfenol, Terfenol-D, PZT, SMA

Key words

Actuator, smart materials, piezoceramics, magnetostriction, shape memory effect, alloys, copper, Nitinol, super elasticity, Galfenol, Terfenol-D, PZT, SMA

BREHOVSKÝ, P. *Smart materiály pro aktuátory*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 44 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Rostislav Huzlík, Ph.D..

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student: **Patrik Brehovský**
Studijní program: Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor: Mechatronika
Vedoucí práce: **Ing. Rostislav Huzlík, Ph.D.**
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 pro aktuátory

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jedná se o rešeršní práci na téma možností různých typů smart materiálů pro využití jako aktuátory. Mezi takové materiály patří například piezokeramika, materiály s tvarovou pamětí, magnetostrikční materiály apod. V rámci práce student definuje obecné požadavky na aktuátory. Poté provede literární průzkum možných materiálů, popíše jejich vlastnosti a vyhodnotí možnosti jejich využití.

Cíle bakalářské práce:

- Definujte obecné požadavky na aktuátory.
- Proveďte literární rešerši možných typů smart materiálů pro aktuátory.
- Popište vlastnosti vytipovaných materiálů.
- Vyhodnocení možností využití jednotlivých typů smart materiálů.

Seznam doporučené literatury:

HUSÁK, M. Mikrosenzory a mikroaktuátory. Praha Academia, 2008. Gerstner. ISBN 978-80-200-1-78-8.

KARUNANIDHI, S.; SINGAPERUMAL, M. Design, analysis and simulation of magnetostrictive actuator and its application to high dynamic servo valve. Sensors and Actuators A: Physical, 2010, 157.2: 185-197.

<http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp>, Digital Library

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

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu

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

Abstrakt

Bakalárska práca „Smart materiály pro aktuátory“ sa zaoberá vhodným využitím materiálov, označovaných ako inteligentné pre ich vlastnosti, v oblasti aktuátorov. Z počiatku sa práca zaoberá hlavnými požiadavkami na aktuátory, ktoré je nutné určiť pri výbere vhodného aktuátora pre vznikajúci projekt. Následne je spracovaná literárna rešerše pre typy smart materiálov vhodných pre použitie u aktuátorov. V druhej časti sú vybrané niektoré materiály a je spravený ich podrobnejší popis. Koniec práce tvorí vyhodnotenie jednotlivých materiálov ako vhodných pre vopred určené aplikácie a vymenovanie dôvodov pre zvolenie materiálu.

Summary

The bachelor's thesis "Smart materials for actuators" deals with appropriate use materials, named smart, in actuators. At the beginning, the thesis completes requests about actuators, which we need to set before making project. Next part is about the research of smart materials suitable used in actuators. The thesis continues with description of few more interesting smart materials. Thesis is ended with summary, which material is suitable to use for few selected projects and why.

Kľúčové slová

aktuátor, smart materiály, piezokeramika, magnetostrikcia, tvarovo pamäťový efekt, zliatiny, meď, Nitinol, superelastická, Galfenol, Terfenol-D, PZT, SMA, Flexinol, Metglas

Key words

Actuator, smart materials, piezoceramics, magnetostriction, shape memory effect, alloys, copper, Nitinol, super elasticity, Galfenol, Terfenol-D, PZT, SMA, Flexinol, Metglas

BREHOVSKÝ, P. *Smart materiály pro aktuátory*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 45 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Rostislav Huzlík, Ph.D..

Čestné prehlásenie

Prehlasujem, že som svoju bakalársku prácu *Smart materiály pro aktuátory* vypracoval samostatne, na základe konzultácií s vedúcim bakalárskej práce a štúdiom odbornej literatúry. Podklady použité pri vypracovaní mojej práce som uviedol na príslušnom mieste.

Brno 22.5.2018

Brehovský Patrik

Ďakujem Ing. Rostislavovi Huzlíkovi, Ph.D. za cenné rady, pripomienky a trpezlivosť počas spracovania bakalárskej práce. Ďalej moje poďakovanie patrí rodine a srdcu najbližším za podporu počas štúdia a práce na bakalárskej práci.

Brehovský Patrik

Obsah

Obsah	13
1 Úvod.....	15
2 Aktuátor	16
2.1 Definícia aktuátora	16
2.2 Požiadavky	16
2.2.1 Požiadavky na vstupe.....	17
2.2.2 Požiadavky na výstupe.....	17
2.2.3 Parazitné vlastnosti	19
3 Smart materiály.....	20
3.1 Materiály s tvarovou pamäťou	20
3.1.1 Tvarová pamäť	21
3.1.2 Superelasticita	22
3.1.3 História a vývoj SMA	22
3.1.4 Výhody použitia SMA v aktuátoroch	22
3.1.5 Zliatiny s tvarovou pamäťou.....	23
3.1.6 Nitinol	24
3.1.7 CuZnAl	25
3.1.8 Flexinol	26
3.1.9 Aktuátory	26
3.2 Piezoelektrické materiály	28
3.2.1 Silno a jemne substituovaný piezokeramický materiál.....	29
3.2.2 Konštitutívne rovnice.....	29
3.2.3 Vlastnosti piezokeramiky	31
3.2.4 Tepelné vlastnosti	32
3.3 Magnetostrikčné materiály.....	33
3.3.1 Magnetostrikčný efekt	33
3.3.2 Terfenol-D	34
3.3.3 Metglas.....	35
3.3.4 Galfenol	36
4 Tabuľka materiálov.....	37
5 Úvaha nad využitím aktuátorov na báze smart materiálu.....	38
6 Záver	42

7	Literatúra.....	43
8	Zoznam obrázkov a tabuliek.....	45
8.1	Obrázky	45
8.2	Tabuľky.....	45

1 Úvod

V technológií má nezameniteľné miesto stúpajúci tlak na cenu/životnosť jednotlivých dielov a ohľadupnosť na ekosystém. Nevyhlo sa to ani „srdcu“ mnohých strojov, aktuátorom. Od vzniku parného stroja cez spaľovacie/vznetové motory, elektromotory, až ku objaveniu vlastnosti materiálov s prívlastkom smart (inteligentné). Vývoj v tejto oblasti napredoval a vznikali prvé aplikácie s využitím smart materiálov. Vlastnosti ako je tvarovo pamäťový efekt, superelasticita, možnosť premeny elektrickej energie na napätie v materiáli, nachádzajú široké uplatnenie a záujem od veľkých firiem zaoberajúcich sa výskumom, a vývojom až po domácu tvorbu aplikácií ako hobby.

Použitie smart materiálu ako aktuátora nachádzame už pri jednoduchom flexinolovom motýľovi, cez piezo-vstrekovače v dieselových motoroch, nezabúdajúc na využitie v oblasti medicíny a armády, kde sa na vývoji rozhodne nešetrí a financií je dostatok. Známe je taktiež použitie aktuátorov v škodlivých prostrediach až nebezpečných, život ohrozujúcich podmienkach. Ak sa nejedná o takéto prostredie, tak môžeme uviesť pohyby vyžadujúce maximálnu presnosť, dĺžku kroku alebo potrebný malý až miniatúrny rozmer. Mnohé obmeny, donedávna známych aktuátorov, aktuátormi pracujúcich vďaka smart materiálu, vyriešili problémy s prašným prostredím, vysokými teplotami, či vysokou životnosťou a spoľahlivosťou (medicína, letectvo). Medzi najviac známe nevýhody môžeme logicky uviesť vyššiu cenu aktuátora, ktorá i tak nezabránila ich využitiu.

Táto práca sa zaoberá oblasťou aktuátorov, v ktorých využívame známe vlastnosti smart materiálov. Cieľ spočíva v uskutočnení rešerše smart materiálov, popis ich vlastností, definovanie požiadaviek pri voľbe aktuátora a špecifickej voľbe materiálu pre určené prevedenie.

2 Aktuátor

Aktuátory a materiály už určitý čas majú dôležité postavenie v precíznom strojárstve. Rozmach vo vývoji je úzko spojený s vývojom rôznych typov pohonov a s tým aj smart materiálov. Nachádzame ich v automatizácii, cez mikromanipuláciu a v neposlednom rade v medicínskej technológii.

2.1 Definícia aktuátora

Aktuátor je zariadenie vykonávajúce pohyb systému alebo niektorého dielu, ktorý je súčasťou celej sústavy. Funguje na opačnom princípe ako generátor, čiže energiu na vstupe spotrebuje na vytvorenie pohybu. Zdroj energie môže byť vo forme napríklad tepelnej, elektrickej energie alebo tlaku. Na výstupe dostávame rôzne formy pohybu na type aktuátora.

2.2 Požiadavky

Každá aplikácia, respektíve zariadenie si vyžaduje špecifické požiadavky závislé od prostredia, požadovanej funkcie, ktoré je potrebné určiť pri výbere aktuátora. Medzi základné patrí určenie pohybu ohľadom spojitosti, lineárneho alebo rotačného pohybu, potrebných otáčok, potrebného momentu a druhu napájania. Ďalej sem určite patrí teplota prostredia, požiadavka na vodotesnosť alebo prachuodolnosť. Pred samotným výberom vhodného aktuátora na nami zvolenú aplikáciu je potrebné ustanoviť požiadavky, ktoré nám zúžia výber alebo presne zvolia najvhodnejší aktuátor.



Obrázok 1 Rozdelenie požiadaviek

2.2.1 Požiadavky na vstupe

- **Odolnosť voči prachu a vode**

Častokrát významná vlastnosť, na ktorú je potrebné brať dôraz. Je potrebná k možnosti prevádzky, či za účelom zvýšenia životnosti dielu alebo samotného aktuátora. Pri zariadeniach je uvedené značenie IP(Ingress Protection), ktoré je charakterizované normou STN EN 60529 do 1000 V striedavom napätia a 1500 V jednosmerného napätia. Prvé číslo značí stupeň ochrany voči vniknutiu pevných častíc a druhé číslo značí ochranu proti vniknutiu kvapalín.

- **Napájanie**

Je potrebné si určiť, pokiaľ máme možnosť, aké napätie, respektíve aké minimálne napätie je potrebujeme k správnej funkcii aktuátora.

- Jednosmerné alebo pulzujúce, striedavé napätie
- Maximálna prúdová zaťažiteľnosť napájacieho zdroja
- Maximálne a minimálne napätie

- **Veľkosť**

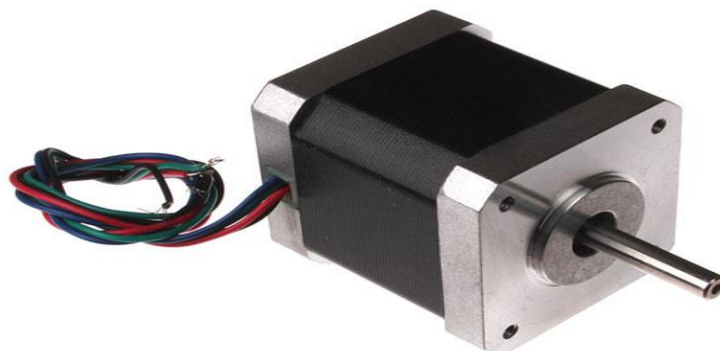
Pod tlakom trhu na cenu výrobku nastáva nutnosť zvoliť vhodnú veľkosť aktuátora, s ktorou súvisí aj hmotnosť. Cena závisí aj na technológii výroby a zväčša prílišné zmenšenie má za následok konečné zvýšenie ceny.

2.2.2 Požiadavky na výstupe

- **Spojité a nespojité pohyby**

Výhoda nespojitého oproti spojitému pohybu spočíva v jednoduchosti konštrukcie, keďže požadujeme od aktuátora iba 2(3) polohy, ktoré ma zaujať. Tým je menej zložitá regulácia celého systému.

- **Rotačný pohyb**



Obrázok 2 Krokový motor [1]

- **Moment**

Pre našu aplikáciu je zásadné zvoliť aktuátor nielen ohľadom veľkosti momentu, ale aj momentovej charakteristiky, podľa ktorej môžeme zistiť aktuálnu dostupnosť momentu a snažiť sa, aby bola zaistená dostatočná veľkosť krútiaceho momentu v nami využívanom rozsahu.

- **Rozsah veľkosti otáčok**

Podľa typu aplikácie je potreba určiť minimálne, maximálne otáčky alebo samotné rozpätie otáčok, v ktorom sa má pohybovať daný aktuátor.

- **Veľkosť minimálneho uhlového kroku v stupňoch**

Pri výbere záleží od aplikácie, pre ktorú je potrebný aktuátor. Veľkosť kroku je dodatočne možné zmenšiť alebo zväčšiť pomocou prevodovky. Cenou, za zmenu veľkosti, je zmena otáčok a momentu.

- **Lineárny pohyb**



Obrázok 3 Pneumatický lineárny aktuátor od SMC [2]

- **Sila**

Potrebný vývin sily k uskutočneniu zmeny polohy a zrýchlenia predmetu.

- **Rýchlosť, rozsah pohybu a dĺžka minimálneho kroku**

Čas zmeny polohy, maximálnu vzdialenosť koncových bodov a minimálnu zmenu polohy na vstupný parameter

- **Frekvencia**

Možnosť zmeny pohybu a pozície za určitý krátky časový úsek.

- **Životnosť**

Časová dĺžka, podľa ktorej je aktuátor schopný vykonávať dané pohyby. Predefinovať si, či sa vyplatí robiť servis stroja v menších intervaloch alebo za vyššiu cenu zvoliť aktuátor s väčším intervalom výmen.

- **Spoľahlivosť**

Pri aplikáciách, pri ktorých môže byť ohrozený ľudský život kvôli nefunkčnosti je potreba klásť dôraz na spoľahlivé riešenie v podobe výberu aktuátora splňujúceho danú bezpečnosť.

2.2.3 Parazitné vlastnosti

Nepotrebné až nechcené vlastnosti aktuátora, ktoré vznikajú pri jeho prevádzke.

- **Teplo**

Častokrát sa vyskytujúci parameter zaradený do parazitných vlastností, kedy nám to znižuje účinnosť, či spôsobuje prekážku v správnom fungovaní celého stroja

- **Vibrácie**

Chvenie vznikajúce pri pohybe aktuátora dokáže spôsobiť široké spektrum problémov, či už samotného stroja, alebo prostredia, v ktorom stroj pracuje.

- **Nepresný chod**

Jednotlivé aplikácie sú špecifické, u niektorých vysoká nepresnosť neznamená hneď problém, naopak u niektorých spôsobuje nepoužiteľnosť daného aktuátora.

3 Smart materiály

Materiály, ktorých vlastnosti sa predvídateľne menia v reakcii na vonkajšie podnety.

Delíme ich do niekoľko kategórií:

- **Materiály s tvarovou pamäťou (Shape memory alloy - SMA):**

Polyméry alebo zliatiny, ktoré si pamätajú svoj pôvodný tvar a rozmery počas zaťaženia a zmeny teploty prostredníctvom fázovej transformácie. Častokrát nesú prívlastok Muscle's Wires, čo v preklade znamená svalové drôty.

Medzi najznámejšie patria Nitinol 55 (TiNi), TiNiCu, CuZnAl.

- **Piezoelektrické materiály:**

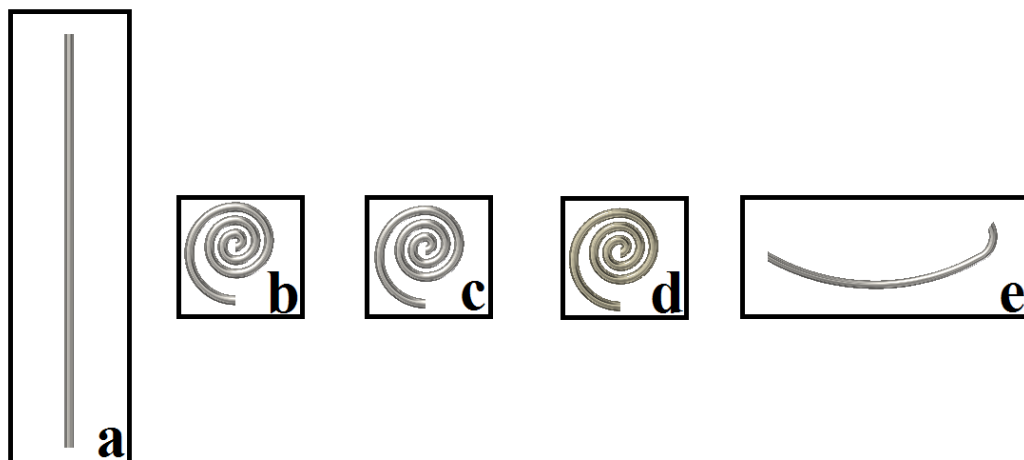
Materiály, na ktorých pri pôsobení záťaže vytvárajúceho napätie v materiáli alebo pôsobením elektrického prúdu vzniká pnutie. Najznámejším je PZT keramika, Rochellová soľ, ale zaradzujú sa sem aj kremeň a turmalín.

- **Magnetostrikčné materiály**

Materiály meniace rozmery za pôsobenia magnetickej sily. Najznámejší je Terfenol-D, jeho nástupca Galfenol a Metglas.

3.1 Materiály s tvarovou pamäťou

Materiály s tvarovou pamäťou sú fascinujúce v tom, že i keď patria do kategórie medzi kovy a zliatiny, tak majú tvarovo pamäťový efekt a sú superelastické. Prvýkrát tento efekt bol popísaný v roku 1951, kedy sa jednalo o zliatinu zlata a kadmia. Neskôr prišlo k objavu zliatiny niklu a titánu, ktorú poznáme pod názvom NiTinol. S fyzikálnymi vlastnosťami bol NiTinol na tom oveľa lepšie než zliatiny na báze zlata a kadmia. Jeho obrovskou výhodou je biokompatibilita a následne využite v medicíne. Po dlhšom vývoji si našiel uplatnenie v potrubných spojoch, v mobilných telefónoch, v aktuátoroch, senzoroach a podobne. [3]



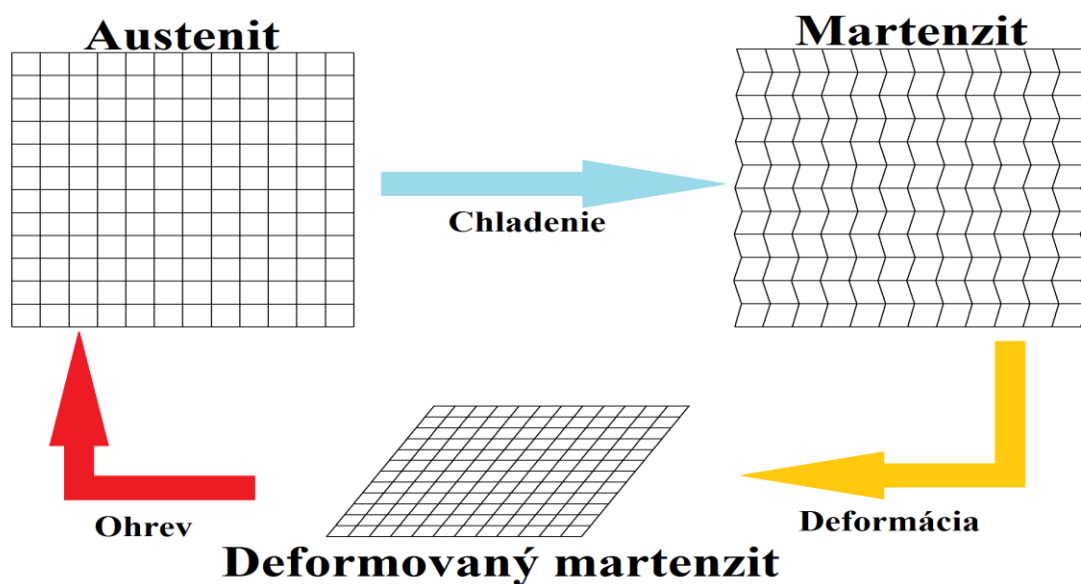
Obrázok 4 Tvarová pamäť

3.1.1 Tvarová pamäť

Drôť(a) vyrobený z tvarovo pamäťovej zliatiny upravíme do nami požadovaného tvaru a upevníme ho pomocou formy, aby pri zahriati nemenil tvar(b). Postupne ho zahrievame až na teplotu, kedy sa martenzit premieňa na austenit(c). Po zahriati ho schladíme na teplotu martenzitu(d) napríklad ponorením vo vode s izbovou teplotou. Po vybratí z formy ho môžeme deformovať na iný tvar(e), avšak po zahriati na teplotu austenitu sa vráti do pôvodného tvaru(c). Je to tým, že martenzit sa nachádza v nižšej fáze ako austenit, z čoho vyplýva iba jeden spôsob premeny martenzitu na austenit. Chladením materiálu z austenitu vzniká mnoho samo usporiadaných variant martenzitu bez zmeny geometrie materiálu. Tento dej sa nazýva tvarovo pamäťový efekt. Delí sa na dve druhy, na jednocestný a dvojcestný. [3]

3.1.1.1 Jednocestný efekt

Jednocestný efekt je založený vrátení materiálu do pôvodného stavu iba za pomoci ohriatia na teplotu austenitu. Na uskutočnenie opačného deja, deformácie, je za potreby externej sily. Využitie našiel v aplikáciách, kde je potreba upínacích zariadení. [3]

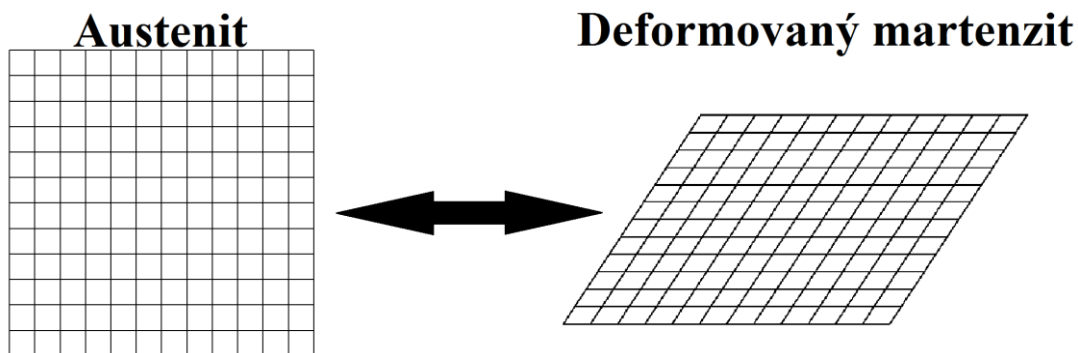


Obrázok 5 Jednocestný efekt

3.1.1.2 Dvojcestný efekt

Dvojcestný efekt pracuje na obojsmernej zmene tvaru materiálu, materiál si pamätá svoj tvar ako pri vyššej teplote, tak i nižšej.

Napriek tejto výhodnej vlastnosti je pomenej využívaný, kvôli procesu tzv. tréningu, ktorý je cenovo nákladnejší a slabšej sile, ktorú vyvíja pri zmene polohy. Vo vyšších teplotách je náchylnejší k strate pamäti. Najčastejšie sa používa v makro aplikáciách, kde je zaručená dostatočná sila a spoľahlivosť [3].



Obrázok 6 Dvojcestný efekt

Pri výbere vhodného materiálu dbáme na hysterézu, ktorá nám udáva rovnaký rozdiel od teplôt, pri ktorých sa premieňa materiál z austenitu na martenzit a naopak. Malú hysterézu volíme pri potrebe vykonávať rýchle zmeny polohy pomocou aktuátora z SMA. Veľkú hysterézu využívame v prostredí s veľkou zmenou teplôt, ktoré by mohli ovplyvniť funkčnosť aktuátora. Hysteréza je závislá na zložení materiálu, termomechanickému spracovaniu materiálu a prostredia, v ktorom aktuátor pracuje [3].

3.1.2 Superelasticita

Smart materiál sa vracia do pôvodného tvaru bezo zmeny teploty po tom, ako bol externou silou zdeformovaný. Superelasticita sa vyskytuje v rozmedzí teploty austenitu a martenzitu [3].

3.1.3 História a vývoj SMA

Počiatky v oblasti tvarovo pamäťových zliatin sa datujú od roku 1932, kedy švédsky fyzik Olander objavuje tvarovú pamäť u zliatiny kadmia a zlata. Po deformácii a následnom zahriatí sa materiál vracia do pôvodného stavu. Neskôr tesne pred začiatkom druhej svetovej vojny Greniger s Mooradianom na zliatinách medi s zinkom medi s cínom taktiež spozorovali tvarovo pamäťový efekt. Postupne prichádza na rad objav rovnakej vlastnosti v zliatine niklu a titánu, dnes známej pod názvom Nitinol, za ktorú vďačíme Williamovi Buehlerovi. Do povedomia širokého priemyslu za spolupráce s Wangom sa dostal v roku 1962. Rok 1969, Nitinol nachádza uplatnenie v stíhačke F-14. Postupne sa rozvíja i do ďalších oblastí, automotive, robotika a medicína, predovšetkým v aktuátoroch [3].

3.1.4 Výhody použitia SMA v aktuátoroch

Tvarovo pamäťové zliatiny vynikajú mnohými pozitívnymi vlastnosťami, vďaka ktorým sú v podobe aktuátora vhodné nahradiť elektromotory alebo hydraulické, či pneumatické aktuátory. Medzi hlavné pozitíva radíme možnosť priamo reagovať na podnety od okolitého prostredia, zníženie rozmeru aktuátora, s tým súvisiaca hmotnosť, kde aktuátor s tvarovo pamäťovou zliatinou nahrádza robustnejšie zariadenia, avšak s potrebou menších rozmerov. Tieto materiály disponujú zmenou tvaru vo všetkých troch smeroch, čo im pridáva hodnotenie na univerzálnosti. Spomedzi zliatin Nitinol vyniká biokompatibilitou, napriek tomu, že obsahuje nikel, ktorý je karcinogénny [3].

3.1.5 Zliatiny s tvarovou pamäťou

Od vynájdenia zliatin, s tvarovo pamäťovým efektom, vzniklo mnoho druhov zliatin. Napriek širokej ponuke, sú najviac používané zliatiny NiTi, Flexinol a CuZnAl. Za malým používaním ostatných druhov stojí hlavne vysoká cena alebo obťažné použitie.

Tabuľka 1 Zliatiny s tvarovo pamäťovým efektom [4]

Zliatina	Zloženie	Rozsah transformačných teplôt [°C]	Veľkosť hysterézy
AgCd	44 až 49 % Cd	-190 až 50	15
AuCd	46,5 až 50 % Cd	30 až 100	15
CuAlNi	14 až 14,5 % Al 3 až 4,5 % Ni	-140 až 100	35
CuSn		-120 až 30	-
CuZn	38,5 až 41,5 % Zn	-180 až -10	10
CuZn X (x=Si, Sn, Al)	X << 1 %	-180 až 200	10
InTi	18 až 23 % Ti	60 až 100	4
NiAl	36 až 38 % Al	-180 až 100	10
TiNi	46,2 až 51 % Ti	-50 až 110	30
TiNi X (x=Pd, Pt)	50 % Ni+X ; 5 až 50 % X	-200 až 700	100
TiNiCu	15 % Cu	-150 až 100	50
TiNiNb	15 % Nb	-200 až 50	125
TiNiAu	50 % Ni+Au	20 až 610	-
TiPd X (x=Cr, Fe)	50 % Pd+X ; 15 % X	0 až 600	50
MnCu	5 až 35 % Cu	-250 až 180	25
FeMnSi	32 % Mn + 6% Si	-200 až 150	100
FePt	25 % Pt	-130	4
FePd	30 % Pd	50	
FeNi X (x=C,Co,Cr)	X << 1%	-	-

Výhoda zliatiny NiTi oproti CuZnAl spočíva v jeho vlastnostiach. Disponuje vyššou možnosťou deformácie ale aj napätím pôsobiacim pri zmene tvaru. Disponuje antikoroziou a biokompatibilitou. Zliatina CuZnAl sa vyznačuje menej náročnou technológiou výroby a tým pádom cenou. V niektorých prípadoch to môže viac závažiť pri výbere dostatočujúceho aktuátora pre mechanizmus [4]. Medzi ďalšie zliatiny patrí Flexinol, ktorý je taktiež kombináciou niklu a železa.

3.1.6 Nitinol

Medzi najrozšírenejšie zliatiny nitinolu zaradujeme Nitinol 55 a Nitinol 60. Líšia sa váhovým podielom Niklu v zliatine, kedy v Nitinole 55 pripadá 55% hmotnosti zliatiny práve Niklu, respektíve u Nitinolu 60 je to pochopiteľne 60%. Nitinol 60 avšak nevykazuje tvarovo pamäťový efekt, no uplatnil sa v oblasti ložísk, najmä kvôli jeho tvrdosti, antikoroznosti a nemagnetickým účinkom. Navyše je elektrický vodivý, čo rozširuje jeho oblasť použitia [5].

U Nitinolu 55 sa už objavuje tvarovo pamäťový efekt, čo ho robí pre nás zaujímavým materiálom v oblasti aktuátorov. Tak ako Nitinol 60, taktiež disponuje antikoroznosťou, veľmi dobrou tepelnou a elektrickou vodivosťou [5]. Pri 55% hmotnostnom podiele niklu sa rozsah transformačných teplôt pohybuje v rozmedzí od -10 do 100 °C, pod -10 °C je možná transformácia pomocou nahradenia určitého percenta niklu za kobalt. V prípade zníženia vibrácií systému sa javí ako správna voľba kvôli jeho tlmivost', ktorá dosahuje hodnoty 25%, čo je až trojnásobok v prípade liatiny, ktorá sa napríklad využíva pri obrábacích strojoch, kde sú vibrácie veľmi nežiadúce a spôsobujú zníženie kvality opracovania [6].

3.1.6.1 Odlievanie

Najvhodnejším spôsobom je použiť ako „štartér procesu“ už kúsok Nitinolu a postupným tavením pridávať nikel s titánom. Samotné prvé vytvorenie zliatiny Nitinolu logicky nebolo možné uskutočniť touto metódou. Na začiatku sa to uskutočňovalo pomocou grafitového téglíka, tenkého plechu niklu a dvoch hlavných súčastí, roztaveného niklu a titánu. Po vnútornej ploche téglíka sa vytvaroval valec z plechu niklu, do neho sa pridali obe roztavené zložky, nikel a titán. Pri dostupnosti Nitinolu príprava prebieha v nasledujúcich krokoch [7].

- a) Ako prvé sa vloží do grafitovej nádoby 2,5 až 5 kg Nitinolu pre štart celého procesu.
- b) Vloží sa mix niklu a titánu do vákuovej pece.
- c) Nastaví sa celkový tlak v peci od 0,133 do 1,33 kPa.
- d) Po roztavení Nitinolu je pec odpojená od dekompresora a natlakovaná na 1/6 atmosférického tlaku pomocou argónu.
- e) Pridávame nikel s titánom zo zásobníka rýchlosťou takou, aby sa stíhal plynule rozpúšťať.

Po roztavení, opätovne znížime tlak v peci na 0,133 až 1,6 kPa. Taveninu nechávame opatrne vytekať do grafitového téglíka, pričom udržiavame teplotu 1400 až 1470 °C. V peci je nutné, aby sme zanechali znovu okolo 2,5 až 5kg Nitinolu pre započatie nového procesu prípravy. Takto vznikne ingot o hmotnosti cca 33kg [7].

3.1.6.2 Spracovanie

Spracovanie ingotu prebieha pomocou klasicky dostupných procesov, ako je predĺženie pomocou rotačných valcov, kovaním, zužovaním. Spracovanie materiálu sa odporúča pri teplote od 700 do 900 °C [6].

3.1.6.3 Opracovanie

Na opracovanie používame nástroje z karbidu za stredných otáčok, jemných posuvov a vysoko chlórovaných rezných olejov. Rez materiálu sa ukázal s kotúčom z karbidu kremíka ako nadpriemerne postačujúci. Za zvýšenej opatrnosti je možné povrchovo veľmi hladké opracovanie [6].

3.1.6.4 Tvrdosť

Tabuľka 2 Tvrdosť [6]

Spracovanie	Tvrdosť
Odliatie	24 R _C
Po valcovaní za 950 °C	87R _B
Vychladnutie v peci	90R _B
Kalenie pomocou vody	89R _B

3.1.7 CuZnAl

Zliatina využívaná v menšom rozsahu kvôli jej menej výhodným vlastnostiam, no priaznivej nízkej cene oproti Nitinolu. Pamäťový efekt je prítomný už pri zliatine medi a hliníku, avšak za vysokých teplôt. Pridaním zinku a vytvorením zliatiny CuZnAl klesá rozmedzie transformačných teplôt pohybujúce od -100 °C do 100 °C. Pri dlhodobom vystavení nad 150 °C stúpa nestabilita zliatiny [8].

3.1.7.1 Zloženie

V zliatine sa nachádza zinok v 15 až 30 percentuálnom zastúpení, 3- 7% hliník a zvyšnú časť tvorí meď. Je dodatočne možné pridanie prvkov ako bôr, cére, kobalt, železo, titán vanád alebo zirkónium, ktoré majú vplyv na veľkosť zrna. Prídavok týchto prvkov znižuje výskyt krehkosti, ale nesie so sebou riziko degenerácie pamäťového efektu [8].

3.1.7.2 Výroba

Výroba zliatiny CuZnAl prebieha bežnou metódou, tavením. Celý proces je zabezpečený v ochrannej atmosfére dusíka alebo iného inertného plynu, ktorý zabraňuje vyparovaniu zinku. Zinok je pre ľudské telo vo väčšom množstve škodlivý a nastáva tzv. zinková choroba. Vyparovanie zinku taktiež spôsobuje zväčšenie zŕn zliatiny. Z toho dôvodu je vhodné zrýchlene schladiť zliatinu vodným kalením. Následne prebieha ešte žihanie, ktoré prebieha nad teplotu austenitu, pretože pri rýchlom ochladení zliatiny nastáva nestabilita martenzitu. Pri nestabilite martenzitu sa vytráca pamäťový efekt. Pri nízkom obsahu hliníka sa zliatina spracováva „za studena“ žíhaním [8].

3.1.8 Flexinol

Zliatina veľmi podobná nitinolu, avšak s odlišným pomerom zloženia, kde nikel a titán sú v zliatine v rovnakom množstve. Ale nie je to len zloženie, čím sa odlišuje od Nitinolu. Zatiaľ, čo nitinol má široké teplotné rozpätie fungovania ako SMA, tak flexinol má interval od 60°C do 110°C. V ostatných parametroch to vychádza na rovnako [18].

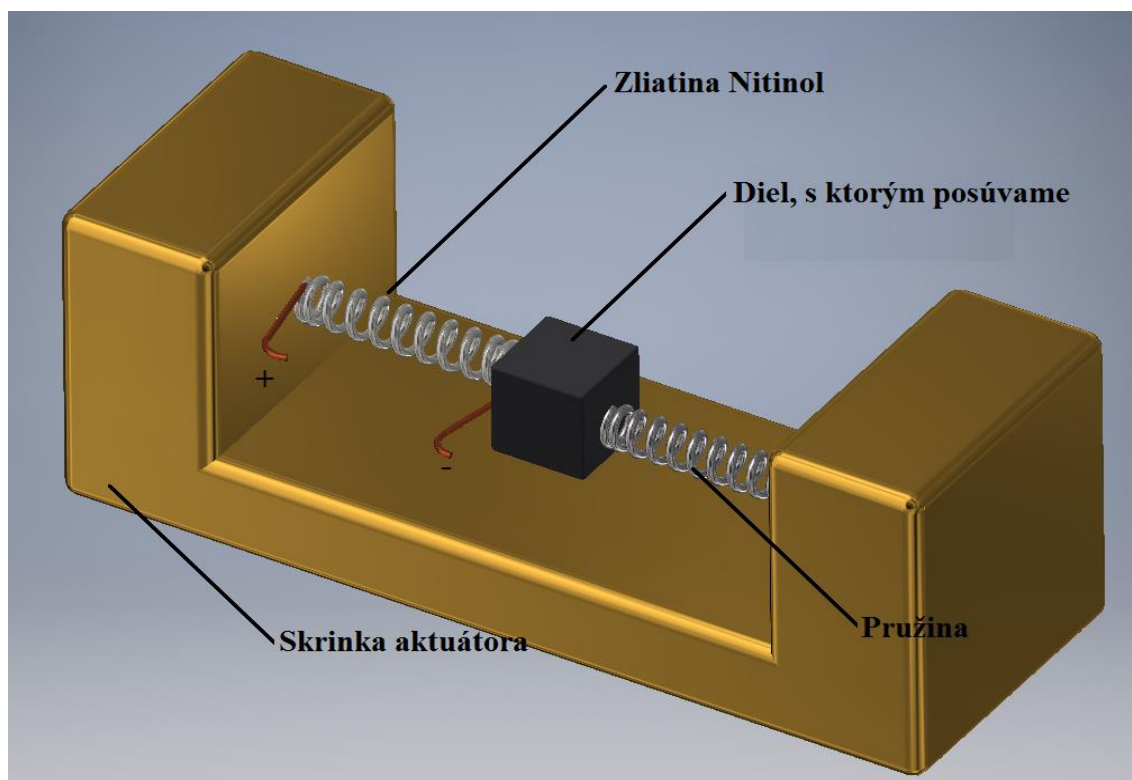
3.1.8.1 Premena

Zmeny vnútornej štruktúry flexinolu prebiehajú pri celkom blízkych rozsahoch teplôt, čo môže priviesť menšie nebezpečenie v podobe náhleho nárastu tepla od externého zdroja a tým pádom pád celej aplikácie. Teplota začiatku austenickej fázy začína na 68 °C a končí pri 78 °C. U martenzitu je začiatok 52 °C a koniec pri 42°C[19]. Rozdiel je tak iba 16 °C, čo je veľmi krátky úsek, s ktorým by s veľkou pravdepodobnosťou externý zdroj tepla nemal problém.

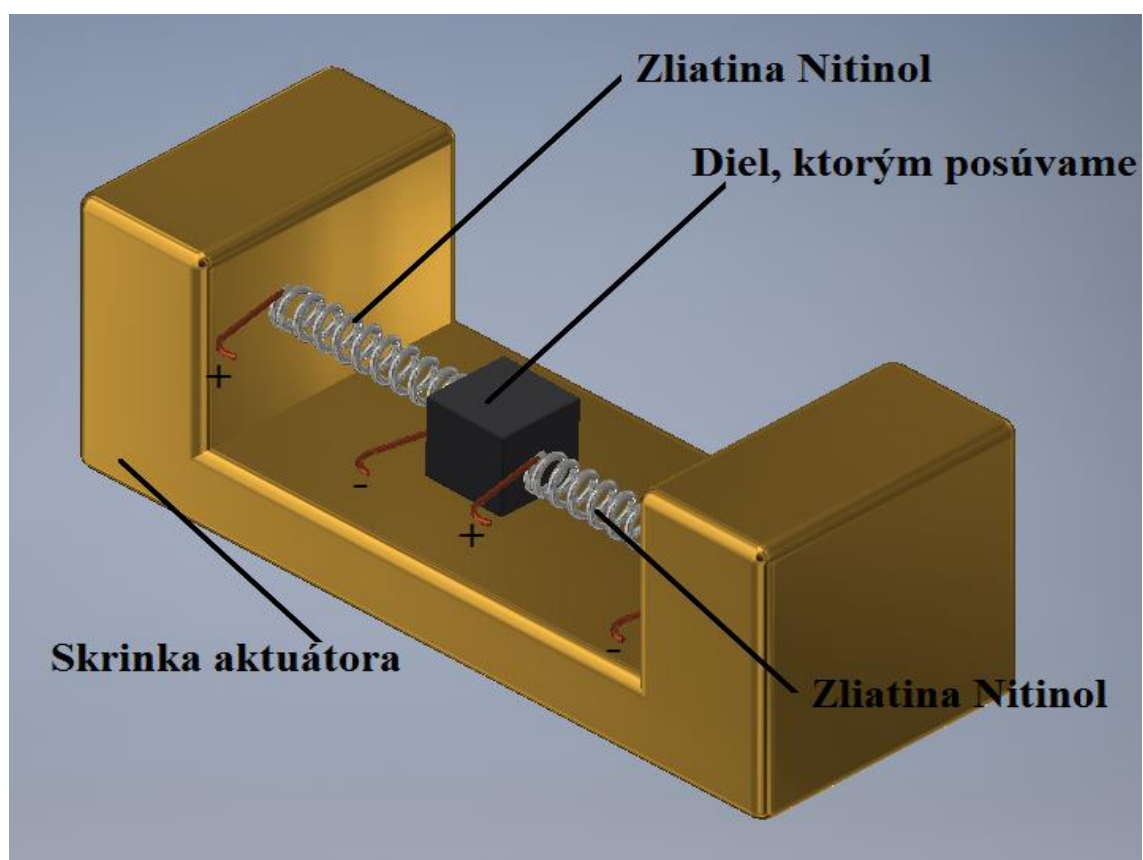
3.1.9 Aktuátory

Materiály s tvarovou pamäťou sa používajú v aktuátoroch, ktoré sa aktivujú pomocou teploty, čiže aktuátor je závislý na zmene teploty. Aplikácia takéhoto aktuátora má obrovskú výhodu v tzv. sebestačnosti, kde nie je potrebný iný zdroj energie. Najčastejšie sa s týmto typom môžeme stretnúť pri studených štartoch motora, regulačných „ventilov“, pri požiarnej ochrane alebo ochrane voči popáleniu horúcou vodou. Výnimkou je ohrev samotného drôtu pomocou elektrického prúdu, čo umožňuje stavbu aktuátora v malej veľkosti. Využíva sa v svorkách, alebo prepínačoch, kde sa drôt ohreje, zmení svoj tvar tak, že pritiahne k sebe obe úchyty. Na návrat do stavu pred ohriatím môžeme použiť pružinu, ktorá pôsobí opačne ako drôt.

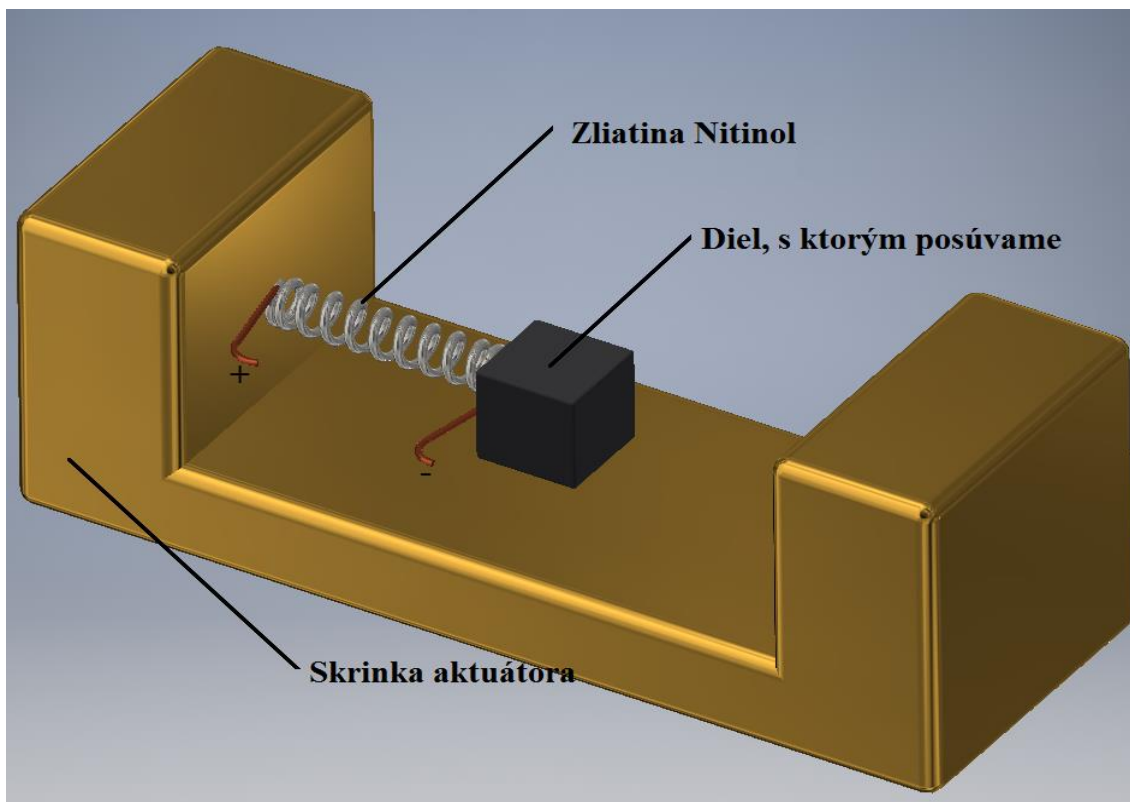
V medicíne je potreba predovšetkým mikrorozmeru aktuátora. Mikrorozmery prinášajú so sebou množstvo výhod. Za zníženie reakčnej doby je zodpovedný zvýšený pomer povrchu k objemu. Celý systém ponúka pôsobenie veľkej sily a dlhého chodu. Navyše je zanedbateľne malá spotreba energie aktuátorom, čo posúva dôležitosť nízkej účinnosti na posledné miesto pri kritériách výberu [9].



Obrázok 7 Typové prevedenie aktuátora s pružinou a drôtom z Nitinolu 55



Obrázok 8 Typové prevedenie aktuátora s dvomi drôtmí z Nitinolu 55



Obrázok 9 Typové prevedenie aktuátora iba s drôtom z Nitinolu 55

3.2 Piezoelektrické materiály

Piezoelektrický jav bol objavený Jacques a Pierre Curie v roku 1880. Stalo sa to pozorovaním kryštála, na ktorom vznikal elektrický náboj za pôsobenia napätia. Tento efekt vykazoval určitý pomer napätia na veľkosť elektrického náboja. Bol nazvaný ako priamy piezoelektrický efekt. Zanedlho bol objavený opačný jav, kde pri pôsobení elektrickej energie vznikalo napätia v kryštáloch. Tento dostal pomenovanie konverzný piezoelektrický efekt.

Celkovo bola vlastnosť popísaná ako piezoelektričnosť. Definovaná je ako schopnosť materiálu reagovať na mechanické napätie vznikom elektrického náboja na povrchu kryštála. Vyskytuje sa u takmer všetkých materiálov, ktoré majú necentrálne symetrickú kryštálovú štruktúru. Spomedzi prírodných materiálov je to kremeň a turmalín. Z druhej strany, umelo vyrobené sú Rochellova soľ, dihydrogenfosforečnan amónny a síran lítny. Druhou kategóriou tu je polarizovaná piezoelektrická keramika. Táto keramika má už polykryštálickú. Medzi najznámejšie medzi nimi sa radí PZT, známy ako olovo-zirkonát-titanát. Ďalšie sú titaničitán bárnatý a titanát olovnatý. Výhoda keramiky oproti prírodným materiálom spočíva v možnosti vytvorenia rôzneho tvaru a pochopiteľne veľkosti.

PZT majú kryštálové mriežky patriace do skupiny perovskitov. Nad teplotou Curie, pri ktorej materiál stráca piezoelektrické vlastnosti, má materiál centrosymetrické kryštály. Pod teplotou Curie vykazuje tetragonálnu štruktúru [10].

Pred tvorbou pólov je piezoelektrický materiál zložený z malých zŕn, z ktorých každý obsahuje oblasti so zarovnaným smerom jednotlivých buniek. Tie zrná a jednotlivé oblasti sú náhodne orientované a keramika vtedy nevykazuje piezoelektrické vlastnosti. Pri aplikácii vysokého jednosmerného napätia sa zrná a oblasti preorientujú v jednom smere a materiál začne vykazovať piezoelektrické vlastnosti [10].

3.2.1 Silno a jemne substituovaný piezokeramický materiál

Najväčšia skupina piezokeramik je rozdelená medzi silno a jemne substituované materiály. Perovskitová štruktúra sa radí medzi vysoko tolerantné k substitúcií prvkov, podľa množstva je zavedený pojem silno a jemne substituované materiály. Už pri zanedbateľne malej substitúcií sa uskutočňujú obsiahle zmeny vlastností materiálu [10].

3.2.1.1 Silno substituovaný materiál

Materiály z tejto skupiny sa radia medzi najvhodnejšie pre dynamické, či rezonančné aplikácie. Leží za tým vysoká mechanická kvalita. Materiály dokážu prestáť budenie vysokým napätím a zvládnuť silné mechanické namáhanie. Pólovanie v tomto prípade je obťažné, no materiál pracuje s nízkymi piezoelektrickými konštantami. To znamená, že pri aplikáciách s vysokým výkonom má táto skupina 10-krát nižšie straty (ohrev) ako jemné materiály [10].

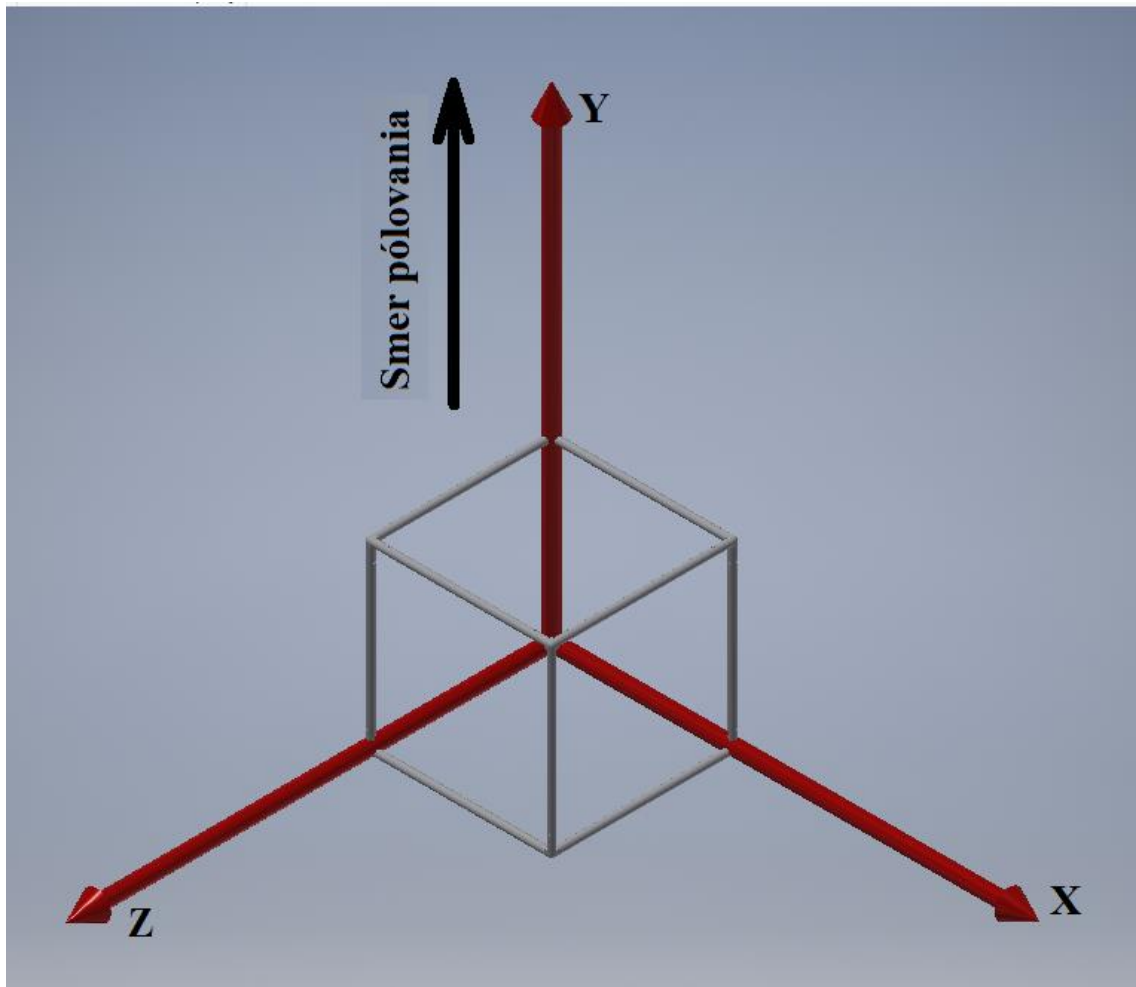
3.2.1.2 Jemne substituovaný materiál

Jemne substituované materiály majú vysokú citlivosť a permitivitu, čo ich predurčuje na (polo)statické aplikácie, kde sú vyžadované vysoké deformácie. Pri aplikácií napätia vykazujú väčšie posuvy, za čím stoja vysoké piezoelektrické konštanty. Pri zaradení do dynamických aplikácií tieto materiály trpia vysokými dielektrickými stratami a vysokým rozptylom, čo vedie k prehriatiu materiálu [10].

3.2.2 Konštitutívne rovnice

Kvôli anizotropnej štruktúre piezoelektrickej keramiky sa vlastnosti líšia v závislosti od jednotlivého smeru. Orientujeme sa pravouhlej trojosej sústave XYZ.

Osa Y je definovaná paralelne so smerom pólu v keramike, ktorý vytvárame počas výrobného procesu vysokým jednosmerným napätím. Využívame na to dvojicu elektród, ktoré môžu byť aktívne aj počas prevádzky, čo nám zabezpečí stálu orientáciu poľa v smere Y. Smery XZ môžu byť definované ľubovoľne kolmo na seba navzájom a zároveň na osu Y.



Obrázok 10 Piezokeramika v karteziánskej sústave

Piezoelektrické materiály sú charakterizované niekoľkými koeficientami. Pri koeficientoch s dvojitém dolným indexom sa spájajú elektrické a mechanické veličiny. Prvý index udáva smer elektrického poľa spojeného s aplikovaným napätím, či vyrobeným dielektrickým nábojom. Druhý index udáva smer mechanického namáhania alebo napätia.

- $d [m \cdot V^{-1}]$ – piezoelektrická deformačná konštanta, ktorá sa vzťahuje na mechanické napätie vytvorené elektrickým poľom
- $d [C \cdot N^{-1}]$ – piezoelektrická nábojová konštanta, ktorá sa vzťahuje na náboj vytvorený na elektródach aplikovaním napätia
- T - konštantné, mechanicky voľné, napätie
- S - konštantné, mechanicky upnuté, napätie
- E – konštantné pole, skrat
- D – konštantný elektrický posuv, otvorený obvod

Medzi najzaužívanejšie rovnice patria tieto:

$$S = s^E \cdot T + [d]^t \cdot E \quad 1.1.$$

$$S = s^D \cdot T + [g]^t \cdot D \quad 1.2.$$

$$D = d \cdot T + \varepsilon^T \cdot E \quad 1.3.$$

$$E = -g \cdot T + [\varepsilon^T]^{-1} \cdot D \quad 1.4.$$

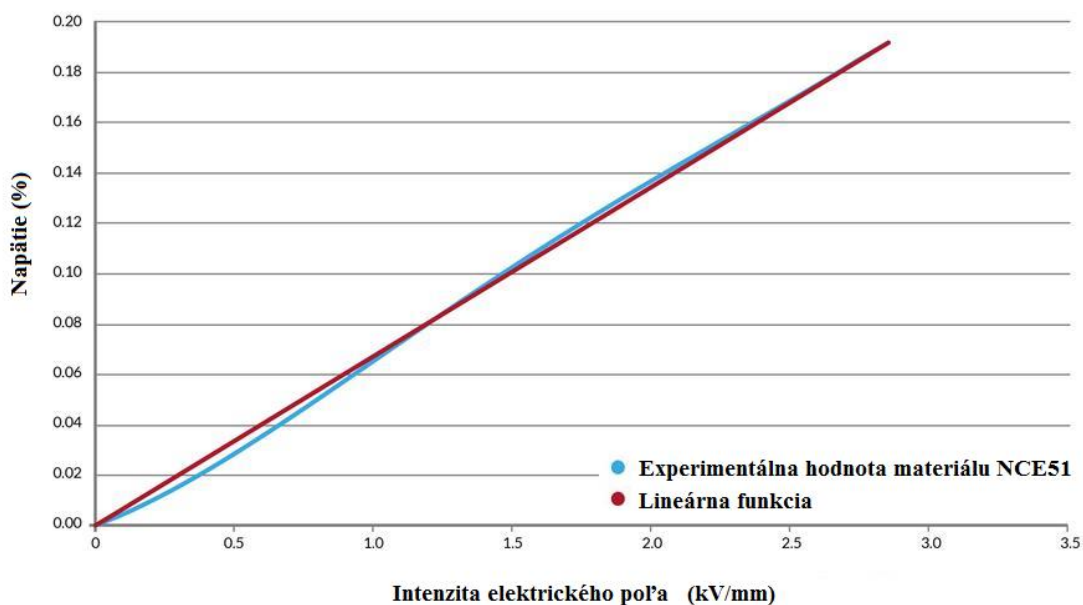
Tieto rovnice sa používajú pri modelovaní konečných prvkov. Treba však počítať s obmedzením rovníc, pretože piezoelektrický efekt je nelineárny, za čím stojí hysteréza a creep. Okrem toho dynamika materiálu nie je opísaná konštitutívnymi rovnicami, piezoelektrické koeficienty sú závislé od teploty a elektrického poľa. Vyššie uvedené štyri rovnice sú preto použiteľné len pre nízke elektrické pole.

3.2.3 Vlastnosti piezokeramiky

Vo vyššie spomenutej časti zaznelo, že piezokeramické materiály sú nelineárne, obsahujú hysterézu a creep. Avšak existujú spôsoby, ako kompenzovať tieto nevhodné vlastnosti. Tým, že vieme ako sa chová samotný materiál, si môžeme zvoliť správny typ pre našu aplikáciu.

3.2.3.1 Lineárnosť

Pomer zdvihu k veľkosti elektrického napätia nie je ideálne lineárny, čo sa stáva prekážkou spoliehať sa iba na rovnice. Smerom od nižšieho napätia je možné vidieť podobu s kvadratickou funkciou.



Obrázok 11 Lineárnosť piezoelektrickej keramiky [10]

3.2.3.2 Vysoké napätie

Maximálna odporúčaná hodnota intenzity elektrického poľa sa pohybuje do $3\text{kV} \cdot \text{mm}^{-1}$. Pri krátkodobom preťažení alebo statických aplikáciách je možné prekročiť odporúčanú max. hodnotu, avšak je potreba počítať menšiu spoľahlivosť a samozrejme s vyšším napätím klesajúcu životnosť [10].

3.2.3.3 Hysteréza

Hysteréza je maximálny rozdiel medzi dvoma dráhami v priebehu zmeny napätia. Rozdiel vzniká, pretože napätie nie je rovnaké pri nabíjaní a vybíjaní. Hysteréza sa postupne znižuje, čo je zapríčinené starnutím materiálu, alebo ju je možné kompenzovať vďaka spätnej väzby.

3.2.3.4 Creep

Piezoelektrické materiály vykazujú tzv. creep (tečenie), t.j. materiál mení svoj tvar, respektíve sa rozťahuje aj keď už na neho nepôsobí žiadne napätie. Takisto to znamená, že materiál sa nevráti do pôvodného stavu po znížení napätia na 0V. Počas tečenia materiál sa naďalej nabíja.

Creep sa vždy vyskytuje v rovnakom smere ako je zmena rozmerov materiálu. Celkový priebeh je logaritmický, to značí, že materiál sa zväčší za prvých 10 sekúnd rovnako ako za nasledujúcich 90 sekúnd.

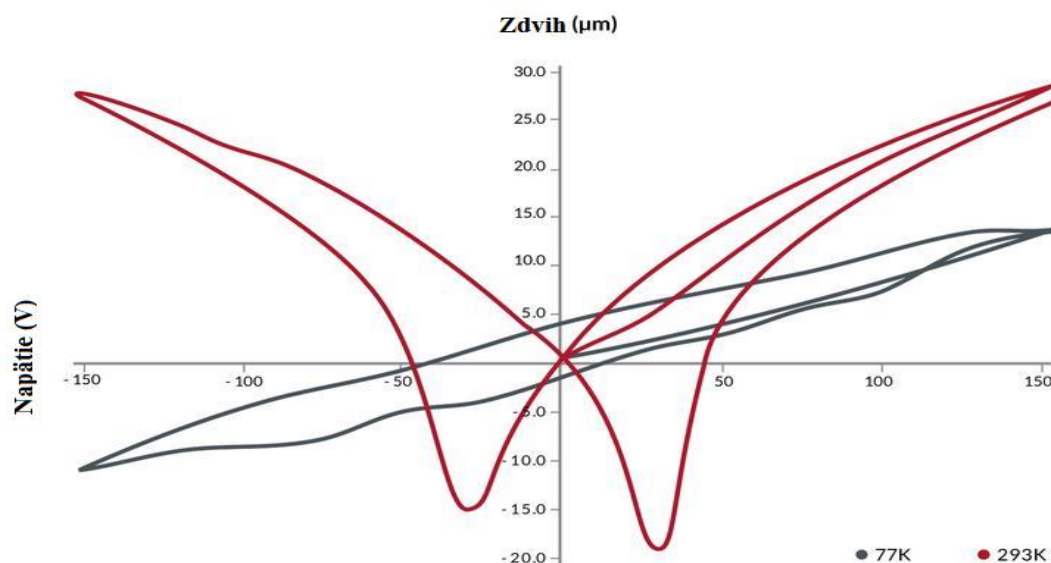
3.2.4 Tepelné vlastnosti

Jedným zo základných pravidiel pri používaní piezoelektrických materiálov je použitie hlboko pod Curieovou teplotou. Samotné priblíženie k tejto hodnote spôsobí čiastočné alebo celkové odpólovanie (stratu funkcie) a výrazne zníži výkon aktuátora. Pri voľbe vhodného piezoelektrického materiálu je preto nutné brať ohľad na Curieovu teplotu pre daný materiál. Pri prevádzke je nutné monitorovať teplotu, ktorá sa môže samovoľne zvýšiť najmä pri dynamických aplikáciách. Pri tejto hodnote už narážame skoro na absolútnu nulu, ku ktorej nám chýbajú len štyri tisíciny Kelvinov. Pri ochladení na kryogénne teploty sa znižujú mechanické a elektrické vlastnosti piezoelektrickej keramiky. Vtedy sa piezoelektrická keramika stáva veľmi tvrdým materiálom.

Materiál vtedy vyniká vlastnosťami, ktoré je možné brať ako silnú stránku materiálu.

- Vysoký pokles elektrickej kapacity
- Zníženie stratového faktora
- Redukované koeficienty deformácie d_{33} a d_{31}
- Extrémna stabilita voči odpólovaniu umožňujúca širšiu bipolárnu prevádzku
- Priblíženie sa k lineárnej funkcii

Rozdiel pri kryogenickej a izbovej teplote je možné vidieť na nasledujúcom obrázku.



Obrázok 12 Rozdiel priebehu rozťažnosti pri teplote 77K a 293K [10]

3.3 Magnetostrikčné materiály

V princípe pracujú podobne ako piezoelektrické materiály, avšak za pôsobenia magnetického poľa, ktoré spôsobuje zmenu geometrického tvaru materiálu. Materiál je opísaný koeficientom, ktorý udáva jeho citlivosť na magnetické pole. Účinnosťou zaostávajú za piezoelektrickým materiálom ale predbiehajú ho vo vyvinutej sile pri zmene tvaru [9], ale dosahujú menšiu hysterézu než SMA alebo piezoelektrické materiály.

3.3.1 Magnetostrikčný efekt

Materiál po vložení do magnetického poľa vykazuje zmeny tvaru, ktoré sa javia ako rozťahnutie, tzv. kladná magnetostrikcia a zmrštenie, čiže záporná magnetostrikcia. Tento druh efektu je nazývaný Joulov efekt, ktorý sa javí pre laikov ako najlepšie opisujúci magnetostrikčné materiály, a na ktorom princípe pracujú aktuátory využívajúce magnetostrikciu. V materiáli sa natočia jednotlivé domény v jeho smere a v tom smere sa materiál aj rozťahne. Po vybratí materiálu z magnetického poľa sa materiál navráti do pôvodného stavu. Automaticky na kolmici k magnetickému poľu materiál znižuje rozmery, avšak nie tak citeľne [11]. Podľa toho si vyberáme použitie v „mikro“ alebo „makro“. Medzi podobný ako Joulov efekt patrí Wiedemannom, kde už to nie je iba o ťahu a tlaku ale aj o šmykovom namáhaní. Matteucioho efekt je založený na vytvorení pozdĺžneho magnetického poľa v materiáli pomocou cievky a striedavého prúdu. Tretím efektom je Villariho efekt, ktorý opisuje, že pri aplikovaní napätia na magnetostrikčný materiál sa mení hustota magnetického toku, ktorá je úmerná na zmenu napätia. Tento efekt je využívaný v senzorike [11].

3.3.2 Terfenol-D



Obrázok 13 Terfenol-D [13]

Začiatky magnetostrikčných zliatin sa datujú do šesťdesiatych rokov minulého storočia, respektíve objav Terfenolu v roku 1970. Spomedzi všetkých známych materiálov vyniká vysokou magnetostrikciou a nízkou magnetickou anizotropiou. Disponuje zanedbateľnou hysterézou. Je striebornej farby, pri izbovej teplote v ťahu je krehký, maximálne 28 až 40 megapascalov. V tlaku vydrží omnoho viac, od 300 do 880 megapascalov. Ako napovedá anglický názov zliatiny, skladá sa z Terbia, Železa a Dysprózia. Spojenie „NOL“ je skratkou Naval Ordnance Laboratory, čo znamená laboratórium námorných zbraní. Prvé použitie našiel v sonarovej oblasti. Napriek finančne náročnej výrobe si postupne našiel svoje uplatnenie v oblasti aktuátorov. Najviac tomu vďaka lineárnosti a magneticko-elastickému napätiu [11]. Ani tomuto typu materiálu sa nevyhol problém s Curieovou teplotou, hodnota Curieovej teploty je 380 °C, pri ktorej sa vytráca magnetostrikcia, teplota topenia je 1240 °C. Merná tepelná kapacita je $0,33 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ a tepelná vodivosť $13,5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ [12].

3.3.2.1 Výroba Terfenolu-D

Zliatina skladajúca sa z vysokoreaktívnych prvkov, vyskytujúcich sa iba v zlúčeninách, nie je lacná záležitosť na výrobu. Celkovo existujú štyri výrobné metódy. Najpoužívanějšími sú FSZM (Free stand zone melting) a MB (Modified Bridgmann). Ostatné sú SPC (Sintered powder compact) a PMCoTerfenol-D (Polymer matrix composites of Terfenol-D) [11].

V FSZM sa materiál udržiava v suspenzii pomocou povrchového napätia. V MB je materiál úplne roztavený a jednotlivé kryštály rastú od tzv. zárodkoch. V tomto prípade je minimálny priemer tyče z Terfenolu 10 mm. Celý proces je kontrolovaný pomocou znižovania teploty a tým spomaleniu až zastaveniu rastu. Obe metódy sú vhodné pre výrobu tyčí z Terfenolu-D a vysokou hustotou energie [11].

Ostatné dve sa využívajú pre výrobu tyčí do priemeru 65 milimetrov a dĺžke 200 milimetrov, a pre vysokú frekvenciu, ktorá je nad 1 kilohertz. Ďalej pre výrobu laminovaných tyčí, rôznych tvarov, štvorcového prierezu, dosiek, kotúčov a aj prášku [11].

3.3.2.2 Využitie Terfenolu-D

Terfenol ma široké využitie, nachádzame ho ako v generátoroch (senzory), tak i v aktuátoroch. Materiálu nevadí pracovné nasadenie vo vysokých frekvenciách (cez 100 kHz), teplotách od -200 °C do 200 °C [13]. Disponuje vyvinutím sily v tisíckach newtonov [11]. K jeho ovládaniu je potreba prúd, avšak nízke napätie. Tú vzniká menší problém a to sú straty, ktoré vznikajú pri neustálom pôsobení prúdu pre udržanie stáleho magnetického poľa. Terfenol vďaka tomu mení dĺžku, respektíve veľkosť. Začiatky využitia Terfenolu sú v sonároch.

3.3.3 Metglas

Do tejto skupiny spáduje niekoľko kovových zliatin založených na prvkoch kobaltu alebo kombinácie niklu a železa. Pre vytvorenie týchto zliatin je použitá metóda extrémne rýchleho kalenia o rýchlosti až 1 milión °C za sekundu [14].

3.3.3.1 Metglas 2826MB

Zliatina s možnosťou vysokého obsahu železa (môže sa jednať len o samotné železo) niklu (max 50%), kobaltu (max 85%), kremíku a veľmi malým množstvom molybdénu, bóru a mangánu. Vyniká vysokou odolnosťou voči korózií, nízkou magnetostrikciou a vysokou permeabilitou vrátane možnosti žihania [14].

3.3.3.2 Metglas 2605SA1 a 2605HB1M

Zliatina s vysokým obsahom železa (minimálne 84% alebo sa môže jednať len o samotné železo) a malým percentom kremíku, bóru, mangánu a uhlíka. Vynikajú vysokou permeabilitou [14].

3.3.3.3 Metglas 2605S3A

Zliatina s vysokým obsahom železa (minimálne 69% alebo sa môže jednať len o samotné železo) a malým percentom kremíku, nióba, chrómu, bóru, mangánu a medi. Vysoká permeabilita vrátane možnosti žihania [14].

3.3.3.4 Metglas 2705M

Zliatina s možnosťou vysokého obsahu železa (môže sa jednať len o samotné železo) alebo kobaltu (max 80 %), niklu (max 50%), kremíku a malým percentom molybdénu, bóru a mangánu. Dosahuje nízku hodnotu magnetostrikcie, vysokú permeabilitu [14].

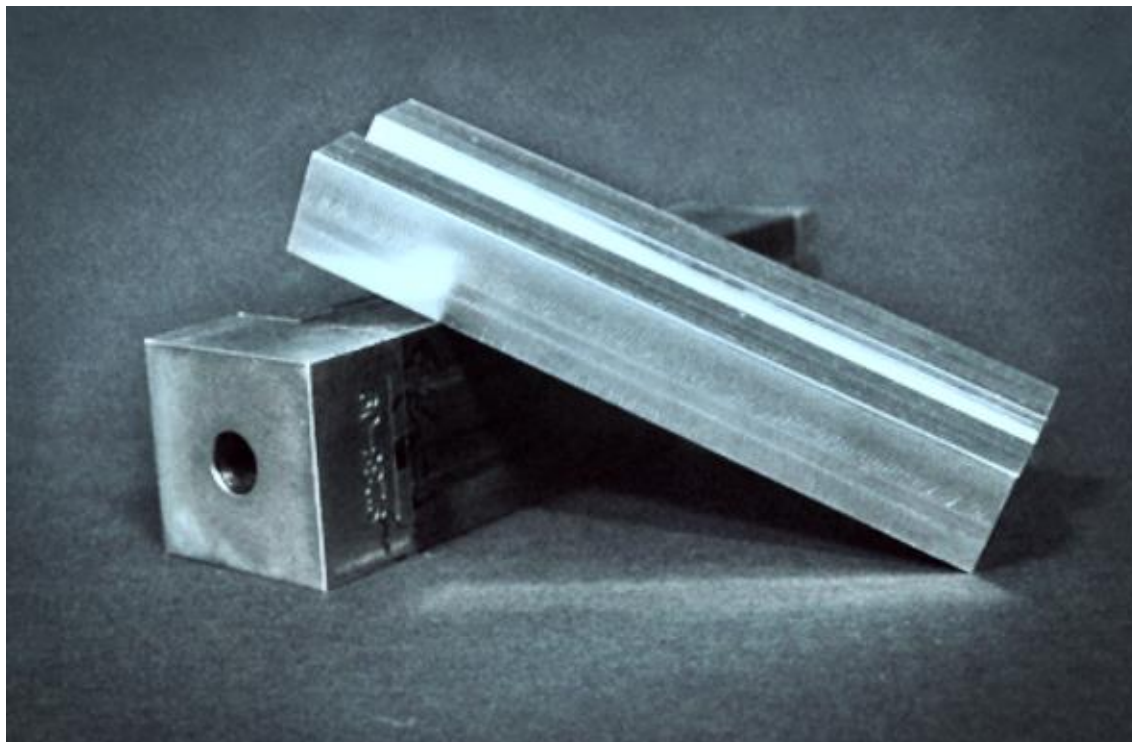
3.3.3.5 Metglas 2714A

Zliatina s možnosťou vysokého obsahu železa (môže sa jednať len o samotné železo) niklu (max 50%), kobaltu (max 85%), kremíku a veľmi malým množstvom molybdénu, bóru a mangánu. Narozdiel od ostatných vyniká extrémne nízkymi parazitnými stratami, má ultravysokú permeabilitu a veľmi vysokú odolnosť voči korózií. Dosahuje nízku hodnotu magnetostrickcie a môže byť žihaná [14].

3.3.4 Galfenol

Zliatina železa a gália (4 až 35 %) vďaka svoj vznik Terfenolu a potrebe vytvoriť niečo dokonalejšie ako samotný Terfenol. Bol vyvinutý tou istou spoločnosťou známou pod názvom Naval Ordnance Labs. Zliatina oplýva magnetostrickciou Terfenolu-D a vyniká veľmi vysokou Curieovou teplotou, vyššou ako spomínaný Terfenol, dosahujúcou úroveň 676,85 °C a k vysokej magnetostrickcii sa pridáva vysoká odolnosť. K výrobe je využitá Bridgmanová metóda alebo tzv. FSZM [15].

Momentálne prebieha výroba zliatiny, ktorá je dostupná v priemere 24 mm (30mm vo vývoji) a dĺžke 250 mm (maximálne 260 mm).



Obrázok 14 Galfenol [15]

4 Tabuľka materiálov

V tejto časti práce som vybral materiály, ktoré zastupujú každú skupinu zo smart materiálov. Medzi zvolené materiály patrí Nitinol 55, materiál NCE46 PZT od firmy Noliac, a ako tretí je Terfenol-D.

Tabuľka 3 Tabuľka bližšie vybraných materiálov

<i>Materiál</i>	Nitinol 55 [7]	PZT NCE46 [10]	Terfenol-D [12]
<i>Typ smart materiálu</i>	SMA	Piezokeramika	Magnetostrikcia
<i>Aktivácia funkcie</i>	elektrický prúd →teplo	elektrický prúd	Elektrický prúd →magnetické pole
<i>Curieova teplota [°C]</i>	neuvedené	330	380
<i>Hustota [kg.m-3]</i>	6500	7700	9200-9300
<i>Odolnosť voči korózii</i>	Výborná	Výborná	Nie
<i>Elektrický odpor [Ohm]</i>	0,00008-0,0001	Záleží od frekvencie	0,0000006
<i>Tepelná vodivosť [W/(m·K)]</i>	8,6 až 18	neuvedené	13,5
<i>Pracovná teplota [°C]</i>	max 400	-273 až 200	-200 až 200
<i>Maximálna frekvencia [kHz]</i>	neuvedené	>500	>100
<i>Doba reakcie</i>	závislosť na teplote - veľká doba reakcie	extrémne rýchla	extrémne rýchla
<i>Sila/napätie pri konaní pohybu [MPa]</i>	689* (Ø0,51mm)	neuvedené	neuvedené
<i>Maximálne napätie v ťahu[MPa]</i>	1900	neuvedené	28
<i>Maximálne napätie v tlaku[MPa]</i>	neuvedené	neuvedené	700
<i>Použitie</i>	regulátor zmesi pre štart motora, požiarne hasiace systémy, ventily, regulátory teploty, tzv. svalové drôty, krvné filtre, lineárne/rotačné aktuátory	lineárne/rotačné aktuátory, ventily, pumpy, manipulátory, akustický generátor, aplikácie v optike, vstrekovanie paliva, ultrasonické čistenie, monitorovanie stavu materiálu, XYZ stolíky	aplikácie s rýchlou odozvou a silou, polohové regulátory, pohlcovače vibrácií, ultrasonické čistenie

*Záleží na veľkosti plochy rezu materiálu, respektíve priemere drôtu.

Podľa vlastností materiálov je vhodné Nitinol 55 využiť pri aplikáciách využívajúcich teplotné zmeny. Jeho výhodou je nepotrebné použitie externého napájania v podobe elektrického prúdu. Piezokeramika a magnetostrikčné materiály sú si použitím celkovo blízke. PZT NCE46 je materiál pre aktuátory vhodnejší vďaka vysokej mechanickej odolnosti [9]. Terfenol-D zastupujúci magnetostrikčné materiály je uprednostnený vďaka nevyžadovaniu elektrického prúdu a nasadení aj priamo vo vodivých tekutinách, ako je voda, kvôli magnetickému poľu vytvorenému externe[9].

5 Úvaha nad využitím aktuátorov na báze smart materiálu

V tejto časti sa venujem úvahe obmeny pneumatických lineárnych i uhlových aktuátorov a vibračných jednotiek v prašnom prostredí. Samotná energia v podobe stlačeného vzduchu je finančne náročná na prevádzku. Na stlačenie vzduchu, ako je všeobecne známe, slúži kompresor. Jeho pohon je zabezpečený elektromotorom, čo môže značiť ekologickjšiu variantu alebo zážihový, či vznetový motor. Obe vytvárajú prebytočný hluk, kde je potreba počítať s pracovníkmi a ich ochranou, popríklad blízkosťou obývaných domov. Už tu sa javí náznak ďalšieho zdroja energie, ktorým je elektrická energia alebo palivo. Nepočítajúc náklady s vytvorením stlačeného vzduchu, na rad prichádza uskladnenie a následná distribúcia po výrobnnej hale alebo prostredí.

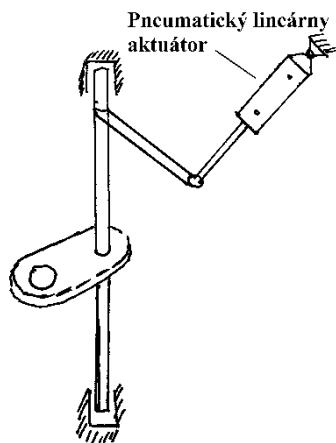
Pre veľké firmy je nutnosť uskladnenia pomocou veľkoobjemových tlakových nádob, ktoré nielen zaberajú miesto, ale sú cenovo nákladné. Na distribúciu sú používané kovové alebo polymérové potrubia vrátane hadíc, redukcií, spojok a ventilov. Celkový systém si žiada zvýšenej kontroly a údržby.

Pri pohľade na rôznorodosť aktuátorov a aplikácií, je potrebné uvážiť prebytočné použitie sily, pretože celková vzduchová sústava disponuje jednotným tlakom. Uvediem príklad v podobe jednoduchej dvojcestnej výhybky, kde je použitý lineárny aktuátor, ktorý pracuje na tlaku minimálne 0,4 MPa a vibrátor, ktorý slúži pre oklepávanie potrubia od usadením materiálu, potrebuje pre svoju činnosť len 0,2 MPa. Pri použití regulátora sa len zvyšuje cena stroja ako aj zložitosť, či zvýšenie rizika poruchovosti. Pri automatizácii je potrebná elektrifikácia stroja, i keď len čiastočná, pre spúšťanie ventilov a napájanie riadiacej jednotky ovládajúcej chod ventilu.

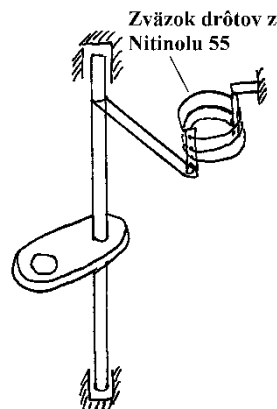
Už pri použití čiastočnej elektrifikácie je vhodné zvoliť celkovú a nahradiť lineárny aktuátor aktuátorom pracujúcim s nitinolom, ktorý poskytuje dostatočnú silu nahradzujúcu pneumatický aktuátor. Vďaka jeho vodivosti je možné použiť ako odporový drôt, alebo k nemu dodať samostatnú špirálu, ktorá ohreje nitinolový drôt. V prípade otázky dvojčinného chodu tam a späť, je možné aplikovať pružinu, ktorá má nevýhodu, že nepretržite pôsobí silou, alebo druhý ohrievaný nitinolový drôt. Použitím tohto princípu sa zníži riziko pre odstránenie opotrebenia (vznik netesnosti piestu) alebo zadrenia piestu kvôli prašnému prostrediu. Pneumatický lineárny aktuátor disponuje silou približne 1900 N. Pochybnosti ohľadom vyvinutia dostatočnej sily je možné

vyvrátiť faktom, že nitinol podľa [7] dokáže vyvinúť pri návrate do počiatočnej polohy napätím až 689 MPa.

Nitinol môže nahrádzať aj uhlový aktuátor, avšak s obmedzeným počtom otáčok. Je to možné vďaka drôtu skrútenému do tvaru špirály/pružiny, ktorý pri návrate do pôvodnej polohy, napojenému na hriadeľ či nahradzujúcemu samotnú hriadeľ dokáže vytvárať rotačný pohyb.



Obrázok 15 Verzia s pneumatickým lineárnym aktuátorom



Obrázok 16 Verzia s aktuátorom s drôti z nitinolu

Zámena pneumatického aktuátora aktuátorom na báze nitinolu

Náhradou za vibračnú pneumatickú jednotku je možné použiť aktuátor využívajúci PZT materiál. Ako druhá možnosť by pripadal Terfenol-D, ktorý, by mohol byť použitý aj v železiarskom priemysle, avšak s dodatočným izolovaním magnet. Pri použití piezo vibrátora je možnosť jednoduchšej regulácie vibrácii podľa potreby, nižšia spotreba energie a zníženie hlučnosti, keďže nie je za potreby vzduchu a tým pádom mizne odľukovanie. Zvolenie piezo materiálu ako vhodného pre vibrátor usudzujem z veľmi nízkeho zdvihu materiálu ako reakciu na napätie, ktorého pomer sa pohybuje na nanometroch na 1 volt, čo nachádza menšie uplatnenie v makroaplikáciach. Druhou variantou sú mikroaplikácie kde tento materiál nachádza široké uplatnenie. Alebo použitie vysokého napätia (možnosť úrazu elektrickým prúdom), ktoré zabezpečí dostatočný zdvih.

Druhou možnosťou, spomenutou vyššie, je použitie vibračnej jednotky na báze Terfenolu-d. Spoločnosť TdVib ponúka takýto vibračný aktuátor, model CU18A [16]. Aktuátor je zostavený pre prácu na frekvenciách od 10 do 20 kHz, avšak je schopný pracovať aj na veľmi nízkych. Napájanie zabezpečuje elektrické napätie o hodnote 250 V a maximálnom prúde 10 A. Ak si na porovnanie vezmeme pneumatically vibračný aktuátor od firmy Netter NTS 120NF [17], tak ten má napájanie realizované vzduchom o v troch variantach, 0,2/0,4/0,6 MPa. Pri hodnote 0,4 MPa disponuje frekvenciou 4510 Hz a silou skoro 52 N. Narozdiel od neho CU18A pri rovnakej frekvencií disponuje silou 281,8 N, ktorá viac ako päťkrát prevyšuje pneumatickú verziu.

Postup výpočtu dynamickej sily prevzatý z [16]:

$m_{\text{CU18A}} = 0,0351 \text{ kg}$ (hmotnosť pohyblivej časti)

$f = 4510 \text{ Hz}$ (frekvencia aktuátora)

$x = 10 \text{ }\mu\text{m}$ (dĺžka dráhy pohyblivej časti aktuátora)

$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f = 2 \cdot \pi \cdot 4510 = 28337,166 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$

$a = \omega^2 \cdot x = 28337,166^2 \text{ rad}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot 10 \cdot 10^{-6} \text{ m} = 8029.95 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$

$F = m \cdot a = 0,0351 \text{ kg} \cdot 8029.95 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} = 281,85 \text{ N}$



Obrázok 17 CU18A Aktuátor [18]



Obrázok 18 NTS 120NF [20]

Ďalej Terfenol-d je možné použiť pri riadení zovretia čelusti robotической ruky, napríklad pre držanie kališteka s vzorkou, avšak mimo prostredia železiarní. Existuje mnoho testovacích automatizovaných strojov, kde sa rieši pohyb čelusti robotической ruky pomocou vzduchu. Výhodou použitia Terfenolu je presná regulácia polohy počas celej dĺžky chodu, ako aj regulácia sily zovretia. Pri hľadaní som narazil na firmu Energen [19], ktorá vytvorila a nechala si patentovať lineárny aktuátor s maximálnou silou 3000 N, dĺžkou pohybu 20 mm a možnosťou regulácie polohy.

6 Záver

V tejto bakalárskej práci prostredníctvom formy rešerše sú zhrnuté informácie a poznatky ohľadom vlastností a využitia smart materiálov pre aktuátory. V prvej časti sa práca zaoberá úplne prvým krokom a to výberom správneho aktuátora. Nachádzajú sa tam požiadavky, ako na vstup, tak i výstup. Tieto majú dopomôcť k navedeniu na tú správnu cestu výberu aktuátora, aby sa zúžila pravdepodobnosť výskytu chybných vlastností nami zvoleného aktuátora.

Následne sú spracované smart materiály, využívané v aktuátoroch a rozdelené do troch veľkých skupín na základe hlavných vlastností materiálu. Celá táto časť je zameraná na tie najdôležitejšie vlastnosti, čo sa týka jednotlivých skupín. Pri mnohých materiáloch sú spomenuté nielen ich vlastnosti, ale je zahrnutá aj ich výroba a história vývoja. Nachádzajú sa tam z menšej časti materiály, ktoré ešte nemajú veľké zastúpenie v technológiách a to z dôvodu ich novosti, ako je napríklad Galfenol a Metglas. Vo štvrtej kapitole je uvedená tabuľka, kde sú zaradené prvky, najviac charakterizujúce jednotlivé skupiny, nitinol 55, PZT NCE46 a Terfenol-D. Je zameraná na vlastnosti, ktoré slúžia ako úvodná časť piatej kapitoly. V piatej kapitole sa práca venuje návrhu obmeny stávajúcich aktuátorov aktuátormi na báze smart materiálu. Je tam zo šírky porovnanie starého i nového aktuátora a hlavné dôvody realizácie obmeny.

Celá práca je ako „kvapka v mori“ z celkovej oblasti smart materiálov, ktoré nadobúdajú už veľmi široké zastúpenie. Vývoj je neustále v behu a tak pribúdajú ako nové druhy materiálov, tak samotné ich použitie vo svete.

7 Literatúra

- [1] Build A 3D Printer | *Nema 17 Stepper motor* [online]. [cit.2018-05-20]. Dostupné z: <http://builda3dprinter.eu/product/nema-17-stepper-motor/>
- [2] Distrelec Česká republika | *Nejlepší online obchod s elektronikou* [online]. [2018-05-20] Dostupné z: <https://www.distrelec.cz/cs/valec-iso-smc-cp96sdb50-80/p/15424002>
- [3] MOHD Jani, J., LEARY, M., SUBIC, A., & GIBSON, M. A. (2014). *A review of shape memory alloy research, applications and opportunities* [online]. *Materials & Design* (1980-2015), 56, 1078–1113. [cit.2018-05-20]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2013.11.084>
- [4] HUANG, W. (1998). *A Shape Memory Alloys and their Application to Actuators for Deployable Structures* [online]. [cit.2018-05-20]. Dostupné z: <http://www3.ntu.edu.sg/home/mwmhuang/cambridge/Phd2side.pdf>
- [5] PEPPER, S. V, DELLACORTE, C., NOEBE, R. D., HULL, D. R., & GLENNON, G. (n.d.). *Nitinol 60 as a material for spacecraft triboelements* [online]. [cit.2018-05-20]. Dostupné z: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20090034488.pdf>
- [6] White Oak laboratory * Dahlgren laboratory. [online]. [cit.2018-05-20]. Dostupné z <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a950308.pdf>
- [7] JACKSON, C. M., WAGNER H.J., & WASILEWSKI R.J. (1972). *55-Nitinol - The alloy with a memory: Its physical metallurgy, properties, and applications* [online]. Washington, D.C. [cit.2018-05-20]. Dostupné z: <https://doi.org/NASA-SP-5110>
- [8] AZO Materials | *Copper / Zinc / Aluminium Shape Memory Alloys* [online]. [cit.2018-05-21]. Dostupné z: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=1367>
- [9] HUSÁK, Miroslav. *Mikrosenzory a mikroaktuátory*. Praha: Academia, 2008. Gerstner. ISBN 978-80-200-1478-8.
- [10] Noliac. *Piezo | Piezoelectric | Piezo components | Piezo actuators - Noliac - Your Piezo Partner* [online]. [cit.2018-05-21]. Dostupné z: <http://www.noliac.com/tutorials/piezo-basics/nature-of-piezoelectricity/>
- [11] OLABI, A. G., & GRUINWALD, A. (2007). *Design and application of magnetostrictive materials* [online]. [cit.2018-05-21]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2006.12.016>

- [12] TdVib, LLC. *TdVib, LLC Terfenol-D - ETREMA Products, Inc.* [online]. [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <http://tdvib.com/terfenol-d/>
- [13] Institute of Making. *Terfenol-D - Materials - Materials Library - Institute of Making* [online]. [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <http://www.instituteofmaking.org.uk/materials-library/material/terfenol-d>
- [14] Metglas - Home of the Metglas Brazing Foil. *Learn about Magnetic Materials from Metglas®, Inc.* [online]. [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <https://metglas.com/magnetic-materials/>
- [15] TdVib, LLC. *TdVib, LLC Galfenol - ETREMA Products, Inc.* [online]. [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <http://tdvib.com/galfenol/>
- [16] Etrema Products, Inc. *ULTRASONIC TRANSDUCER CU18A* [online]. [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: http://www.tdvib.com/wpcontent/uploads/2015/05/CU18_Detailed_Technical_Manual.pdf
- [17] NetterVibration – Serving Industry with Vibration. *Series NTS Pneumatic Linear Vibrators – NetterVibration* [online]. [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <http://www.nettervibration.com/wp-content/uploads/2015/09/NTS-120-NF-01-1024x1024.jpg>
- [18] TdVib, LLC. *CU18A Ultrasonic Actuator* [online]. [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <http://tdvib.com/cu18a-ultrasonic-actuator/>
- [19] JOSHI, Chandrashekhar H. a Bruce R. BENT. *Magnetostrictive actuator*. United States States of America. US 6246132 B1. Uděleno 12.6.2001.
- [20] NetterVibration – Serving Industry with Vibration. *Series NTS Pneumatic Linear Vibrators – NetterVibration* [online]. [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <http://www.nettervibration.com/wp-content/uploads/2015/09/NTS-120-NF-01-1024x1024.jpg>

8 Zoznam obrázkov a tabuliek

8.1 Obrázky

Obrázok 1 Rozdelenie požiadaviek	16
Obrázok 2 Krokový motor [1]	17
Obrázok 3 Pneumatický lineárny aktuátor od SMC [2]	18
Obrázok 4 Tvarová pamäť	20
Obrázok 5 Jednocestný efekt	21
Obrázok 6 Dvojcestný efekt	22
Obrázok 7 Typové prevedenie aktuátora s pružinou a drôtom z Nitinolu 55	27
Obrázok 8 Typové prevedenie aktuátora s dvomi drôtmi z Nitinolu 55	27
Obrázok 9 Typové prevedenie aktuátora iba s drôtom z Nitinolu 55	28
Obrázok 10 Piezokeramika v karteziánskej sústave	30
Obrázok 11 Lineárnosť piezoelektrickej keramiky [10]	31
Obrázok 12 Rozdiel priebehu roztážnosti pri teplote 77K a 293K [10]	33
Obrázok 13 Terfenol-D [13]	34
Obrázok 14 Galfenol [15]	36
Obrázok 15 Verzia s pneumatickým lineárnym aktuátorom	39
Obrázok 16 Verzia s aktuátorom s drôtmi z nitinolu	39
Obrázok 17 CU18A Aktuátor [18]	40
Obrázok 18 NTS 120NF [20]	40

8.2 Tabuľky

Tabuľka 1 Zliatiny s tvarovo pamäťovým efektom [4]	23
Tabuľka 2 Tvrdosť [6]	25
Tabuľka 3 Tabuľka bližšie vybraných materiálov	37