



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

VÝPOČTOVÉ MODELOVÁNÍ A ANALÝZA VYUŽITELNOSTI MATERIÁLŮ S TVAROVOU PAMĚTÍ PRO APLIKACE V OBLASTI MECHATRONICKÝCH AKTUÁTORŮ

COMPUTATIONAL MODELING AND UTILIZATION ANALYSIS OF MATERIALS WITH SHAPE MEMORY FOR
APPLICATIONS IN THE FIELD OF MECHATRONIC ACTUATORS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Roman Ševčík

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Oldřich Ševeček, Ph.D.

BRNO 2024

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student:	Roman Ševčík
Studijní program:	Mechatronika
Studijní obor:	bez specializace
Vedoucí práce:	Ing. Oldřich Ševeček, Ph.D.
Akademický rok:	2023/24

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:

Výpočtové modelování a analýza využitelnosti materiálů s tvarovou pamětí pro aplikace v oblasti mechatronických aktuátorů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Materiály s tvarovou pamětí (Shape Memory Materials) patří do skupiny pokročilých materiálů, které jsou schopny vrátit se z deformovaného stavu (dočasná deformace) do jejich původního tvaru při vnějším podnětu, kterým může být například změna teploty. Využití těchto materiálů je široké, ať již v oblasti cévní chirurgie, ortodontie, v ortopedii, či v technických/mechatronických aplikacích jako např. mikropohony, aktuátory různé pružinky a další. Aby bylo možné tyto materiály a komponenty z nich vyrobené pro danou aplikaci správně navrhnout a použít, je třeba umět modelovat jejich odezvu na vnější zatížení (podnět), což bude současně s řešením studií náplní této práce. Výstupem práce tak bude kromě řešení i metodika, jak chování těchto materiálů modelovat (v SW Ansys) včetně přehledu a významu nezbytných parametrů vstupujících do simulací. Práce bude zaměřena na aplikace materiálů s tvarovou pamětí v oblasti aktuálních prvků.

Cíle bakalářské práce:

- 1) Rešerše z oblasti využití/modelování materiálů s tvarovou pamětí se zaměřením na mechatronické aplikace (aktuátory, mikropohony apod.).
- 2) Definovat model materiálu vybraného materiálu s tvarovou pamětí, implementovat jej do SW Ansys, a provést jeho test např. na jednoduché tahové zkoušce.
- 3) Vytvořit zjednodušený model zvoleného aktuátoru a namodelovat změnu jeho tvaru v závislosti na změně teploty (paměťový efekt).
- 4) S využitím vytvořeného modelu analyzovat aktuální/silový potenciál zvolené struktury při změně tvaru.
- 5) Definovat obecnou metodiku modelování materiálů s tvarovou pamětí v SW Ansys a diskutovat jejich využitelnost v oblasti mechatronických aktuátorů.

Seznam doporučené literatury:

- [1] ANSYS Inc. ANSYS Release 2023 User's manual. Pennsylvania: Swanson Analysis Sys. Inc, 2023.
- [2] VASUDHA, N. a UMA RAO, K.. Shape memory alloy properties, modelling aspects and potential applications - A review. Journal of Physics: Conference Series [online]. 2020, 1706(1).
- [3] AURICCHIO, F., MARFIA, S. a SACCO, E.. Modelling of SMA materials: Training and two way memory effects. Computers & Structures. 2003, 81(24–25), 2301–2317
- [4] KIM, M.S., HEO, J.K., RODRIGUE, H., LEE, H.T., PANÉ, S., HAN, M.V. a AHN, S.H.. Shape Memory Alloy (SMA) Actuators: The Role of Material, Form, and Scaling Effects. Advanced Materials. 2023, 35(33)
- [5] MATLAB – The Language of Technical Computing, MathWorks, Inc., 2000

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá výpočtovým modelováním materiálů s tvarovou pamětí a jejich aplikací v aktuátorech. Rešeršní část práce vysvětluje základní princip fungování materiálů s tvarovou pamětí, různé možnosti jejich využití a modelování, a také princip návrhu aktuátorů s využitím těchto materiálů. Další kapitola se zabývá tvorbou modelu v SW Ansys, testováním tohoto modelu a jeho následným využitím pro modelování aktuátoru. Dalším krokem je otestování zvoleného modelu aktuátoru při různých parametrech výpočtové analýzy. Poslední kapitola se zabývá popisem obecného postupu modelování materiálů s tvarovou pamětí, doporučeními pro nastavení výpočtové analýzy a možností použití a realizace zvoleného aktuátoru.

Abstract

This bachelor's thesis deals with a computational modeling of shape memory materials and their applications in actuators. The recherche part of the thesis describes the basic principles of function of the shape memory materials, different possibilities of their utilization, their modeling and also principles of designing actuators using these materials. The next chapter deals with a creation of the computational model in SW Ansys, testing of this model and its subsequent use for modeling of the chosen actuator. The next step is the testing of the selected actuator model under different conditions of its computational analysis. The last chapter describes a general method and approach for the modeling of shape memory materials in SW Ansys, recommended settings of the computational analysis and application potential of the chosen actuator.

Klíčová slova

Materiály s tvarovou pamětí, Efekt tvarové paměti, Superelastická, Aktuátor, SW Ansys, Výpočtové modelování

Keywords

Shape memory materials, Shape memory effect, Superelasticity, Actuator, SW Ansys, Computational modeling

Bibliografická citace

ŠEVČÍK, Roman. *Výpočtové modelování a analýza využitelnosti materiálů s tvarovou pamětí pro aplikace v oblasti mechatronických aktuátorů* [online]. Brno, 2024 [cit. 2024-05-22]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/157714>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Vedoucí práce Oldřich Ševeček.

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma *Výpočtové modelování a analýza využitelnosti materiálů s tvarovou pamětí pro aplikace v oblasti mechatronických aktuátorů* vypracoval samostatně a s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu na konci práce.

Roman Ševčík

V Brně, 24.5.2024

.....

Chtěl bych poděkovat vedoucímu práce, Ing. Oldřichu Ševečkovi, Ph.D., za veškeré odborné rady a poskytnutou zpětnou vazbu při tvorbě a psaní této práce.

Roman Ševčík

Obsah

Přehled použitých symbolů a veličin.....	9
1. Úvod	11
2. Rešerše	13
2.1. Materiály s tvarovou pamětí.....	13
2.1.1. Druhy materiálů s tvarovou pamětí.....	13
2.1.1.1. Slitiny s tvarovou pamětí (SMAs).....	13
2.1.1.2. Magnetické materiály s tvarovou pamětí (MSMAs).....	15
2.1.1.3. Polymery s tvarovou pamětí (SMPs)	15
2.2. Aktuátory využívající materiály s tvarovou pamětí	16
2.2.1. Formy slitin s tvarovou pamětí (SMAs) v aktuátorech.....	17
2.2.1.1. Drát a pružina	17
2.2.1.2. Chytré měkké kompozitní aktuátory	18
2.2.1.3. Měkké morfující textilie.....	19
2.2.2. Využití různých forem slitin s tvarovou pamětí pro návrh aktuátorů.....	20
2.2.3. Aktuální režimy	20
2.2.4. Aktuátory využívající magnetické materiály s tvarovou pamětí.....	22
2.3. Modelování materiálů s tvarovou pamětí.....	24
2.3.1. 1D model	25
2.3.2. Modelování SMA v prostředí Ansys	26
2.3.2.1. Pokročilé materiálové modely.....	26
2.3.2.2. Porovnání pokročilého modelu se standardním Ansys SMA modelem	27
3. Výpočtové modelování a řešení problému	28
3.1. Vytvoření modelu materiálu a jeho implementace do SW Ansys	28
3.1.1. Materiálové konstanty	28
3.1.2. Porovnání modelů materiálu dostupných v SW Ansys	30
3.2. Testování modelu materiálu	34
3.2.1. Křivka závislosti napětí na přetvoření.....	34
3.2.2. Křivka závislosti přetvoření na teplotě.....	35
3.3. Tvorba modelu aktuátoru s paměťovým efektem	37
3.3.1. Volba tvaru aktuačního členu	37
3.3.2. Tvorba modelu aktuátoru	39
3.4. Analýza aktuačního (silového) potenciálu zvoleného aktuátoru.....	40
3.4.1. Aktuační potenciál při různých zatíženích	40
3.4.2. Aktuační potenciál pro různé rozměry aktuačního členu	41

3.4.3. Vliv modelu materiálu.....	42
4. Diskuse	47
4.1. Doporučení pro modelování aktuátorů využívajících efekt tvarové paměti	47
4.2. Zhodnocení možnosti využití zvoleného modelu aktuátoru v praxi	48
5. Závěr.....	49
Zdroje	51
Seznam obrázků	53
Seznam tabulek	55
Seznam příloh.....	56

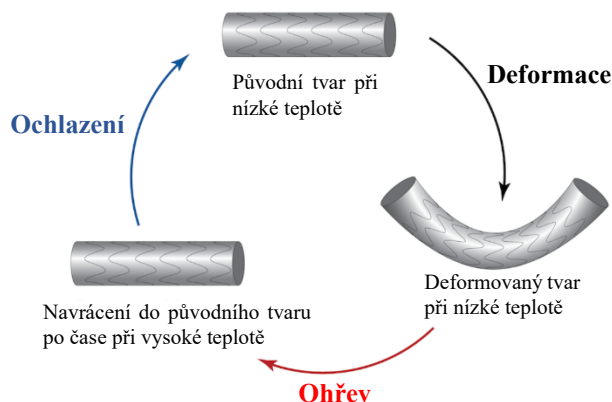
Přehled použitých symbolů a veličin

Označení veličiny	Jednotky	Význam
A_{SMA}	mm^2	Plocha příčného průřezu SMA drátu
d	mm	Průměr
E_A	GPa	Youngův modul pružnosti austenitu
E_M	GPa	Youngův modul pružnosti martenzitu
F	N	Zatěžující síla
F_A	N	Aktuační síla
F_{max}	N	Maximální síla
F_{pull}	N	Síla potřebná k natažení pružiny
F_R	N	Reakční síla
F_{Rmax}	N	Maximální reakční síla
h	MPa	Parametr vytvrzení
l	mm	Délka aktuační pružiny
L	mm	Délka SMA prvku
m	–	Lodeho parametr závislosti
n	–	Počet SMA drátů
R	MPa	Elastický limit
t	s	Čas
T	$^{\circ}C$	Teplota
T_0	$^{\circ}C$	Referenční teplota
T_{max}	$^{\circ}C$	Maximální teplota
T_f^{AM}	$^{\circ}C$	Konečná teplota transformace na martenzit
T_s^{AM}	$^{\circ}C$	Počáteční teplota transformace na martenzit
T_f^{MA}	$^{\circ}C$	Konečná teplota transformace na austenit
T_s^{MA}	$^{\circ}C$	Počáteční teplota transformace na austenit
T_{test}	$^{\circ}C$	Teplota, při které byla provedena zkouška
α^A	K^{-1}	Koeficient teplotní roztažnosti austenitu
α^M	K^{-1}	Koeficient teplotní roztažnosti martenzitu
β	$MPa \cdot ^{\circ}C^{-1}$	Parametr teplotní závislosti
δ	mm	Deformace SMA prvku
ΔL	mm	Deformace
ΔL_{max}	mm	Maximální deformace
ΔL_{min}	mm	Zbytková deformace po ohřevu
ε	–	Poměrné prodloužení
ε_L	–	Maximální transformační přetvoření
ε_{max}^A	–	Maximální poměrné prodloužení austenitu
ε_{max}^M	–	Maximální poměrné prodloužení martenzitu
μ	–	Poissonův poměr
$\rho\Delta s^A$	$MPa \cdot K^{-1}$	Koeficient vlivu napětí pro austenit
$\rho\Delta s^M$	$MPa \cdot K^{-1}$	Koeficient vlivu napětí pro martenzit
σ	MPa	Napětí
σ_{20}	MPa	Napětí při teplotě 20°C
σ_{40}	MPa	Napětí při teplotě 40°C
σ^A	MPa	Napětí v austenitu

Označení veličiny	Jednotky	Význam
σ^M	<i>MPa</i>	Napětí v martenzitu
σ_{max}	<i>MPa</i>	Maximální napětí
σ_{norm}	$N \cdot mm^{-2}$	Normované napětí
σ_f^{AM}	<i>MPa</i>	Konečné napětí transformace na martenzit
σ_s^{AM}	<i>MPa</i>	Počáteční napětí transformace na martenzit
σ_f^{MA}	<i>MPa</i>	Konečné napětí transformace na austenit
σ_s^{MA}	<i>MPa</i>	Počáteční napětí transformace na austenit

1. Úvod

Materiály s tvarovou pamětí jsou zvláštní skupinou materiálů, které jsou schopné zapamatovat si několik stálých tvarů (běžně dva, v případě polymerních materiálů i více [1]). Základními vlastnostmi umožňujícími toto chování jsou superelastická a efekt tvarové paměti. Kdy první z těchto vlastností umožňuje materiálům dosahovat velkých deformací bez porušení celistvosti a druhá zmíněná vlastnost umožňuje obnovení tvaru materiálů do tvaru před deformací.



Obr. 1: Znárodnění chování materiálů s tvarovou pamětí při zatížení a změně teploty [16].

Materiály s tvarovou pamětí se v současné době využívají v mnoha technických odvětvích jako je lékařství a biomechanika (umělé svaly, stenty), automotive, aerospace či robotika (měkké robotické paže, mobilní roboti) [2]. Mohou být použity například jako senzory, tlumiče i aktuátory. Asi nejrozšířenější skupinou materiálů využívajících efekt tvarové paměti jsou slitiny na bázi niklu a titanu [2].

Aktuátory využívající materiály s tvarovou pamětí jsou zajímavou možností náhrady klasických elektrických, případně pneumatických či hydraulických aktuátorů. Umožňují jednoduché ovládání jejich pohybu pomocí teploty (teplotní paměťový efekt) či magnetického pole (magnetický paměťový efekt) [1]. Také je možné je používat ve spoustě různých forem a tvarů, ať už jednoduchých struktur z drátů, pružin, případně plíšků, tak složitějších jako jsou kompozitní materiály či pletená vlákna podobná textilu [2]. V případě teplotně ovládaných aktuátorů je možné spojit aktuátor a senzor v jednom prvku, což také může být výhodou v podobě úspory místa a financí. Další dobrou vlastností je schopnost aktuálního členu dosáhnout až několikanásobku své vlastní délky pouze působením teplotního zatížení, což umožňuje velký rozsah aktuace. Tyto aktuátory mají v poměru ke své velikosti velmi vysokou měrnou energii a je možné je konstruovat i s velmi malými rozměry.

Pro usnadnění a urychlení výroby aktuátorů využívajících efekt tvarové paměti je nutná schopnost tyto materiály efektivně a správně modelovat. Vzhledem ke komplexnosti fyzikální podstaty a nelinearitě vlastností materiálů s tvarovou pamětí bývají i výpočtové modely složité a numerické simulace časově náročné. V současnosti je asi nejvhodnějším softwarem pro modelování těchto materiálů SW Ansys, který již v základu v prostředí Mechanical poskytuje modely pro simulace chování materiálů s tvarovou pamětí [3].

Cílem této práce je popsat chování materiálů s tvarovou pamětí, jejich druhy, aplikace a možnosti modelování. Dále v prostředí Ansys Mechanical určíme a definujeme parametry dostupných modelů a provedeme testování těchto modelů, například pomocí tahové zkoušky. Dalším krokem bude volba vhodného akuačního členu a jeho zakomponování do konstrukce aktuátoru. Poté provedeme parametrické testování chování zvoleného aktuátoru při změně silového zatížení, teploty a materiálových konstant. Posledním krokem bude formulace obecného postupu modelování materiálů s tvarovou pamětí pomocí prostředků dostupných v SW Ansys a úvaha nad možnostmi využití zvoleného aktuátoru.

2. Rešerše

2.1. Materiály s tvarovou pamětí

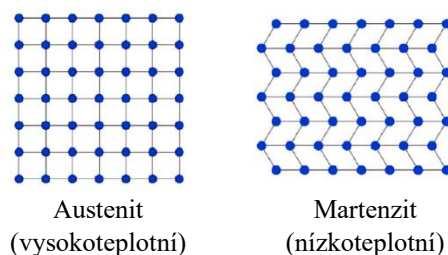
Materiály s tvarovou pamětí (Shape Memory Material – SMM) jsou materiály schopné vrátit se do původního tvaru při přítomnosti správného podnětu, poté, co byly silně a kvaziplasticky zdeformovány. Tato vlastnost se nazývá efekt tvarové paměti (Shape Memory Effect – SME). Za určitých podmínek jsou běžně pozorovány vlastnosti jako superelastická (Super Elasticity – SE) u slitin a viskoelastická u polymerů. SME může být využit v mnohých oblastech od mechatronických aktuátorů, přes medicínská zařízení až po kosmické inženýrství [4]. Možnost využití v medicíně je podrobněji popsána ve zdroji [5].

2.1.1. Druhy materiálů s tvarovou pamětí

- Slitiny s tvarovou pamětí (Shape Memory Alloy – SMA)
- Magnetické slitiny s tvarovou pamětí (Magnetic Shape Memory Alloy – MSMA)
- Polymery s tvarovou pamětí (Shape Memory Polymer – SMP)

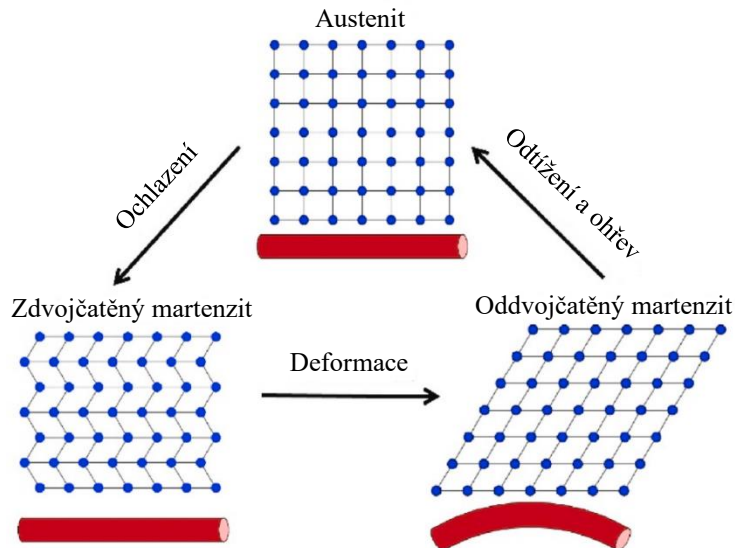
2.1.1.1. Slitiny s tvarovou pamětí (SMAs)

SMAs jsou slitiny která mají vlastnost SME. Mohou mít dvě pevné krystalické mikrostruktury: martenzit a austenit. Při nízké teplotě mají relativně volně napěchovanou krystalickou mikrostrukturu, která je prostorově centrovaná čtvercová. Tato fáze je nazývána termoelastický martenzit (*Obr. 2*). Při vysokých teplotách má materiál hexagonální krystalickou mikrostrukturu známou jako austenit. Příkladem takovýchto materiálů je slitina Ni-Ti nebo slitina na bázi mědi či železa [1]. Konkrétní vlastnosti vybraných materiálů jsou k dispozici ve zdroji [6].



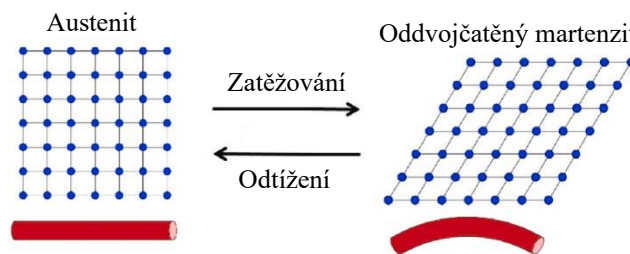
Obr. 2: Krystalická struktura austenitu a martenzitu [1].

SMAs mohou vykazovat dvě význačné vlastnosti: efekt tvarové paměti a superelasticitu. Díky vlastnosti SME se slitina, která byla plasticky deformována, může vrátit do původního tvaru pomocí ohřevu a odtížení. Jak je vidět na *Obr. 3*, když je materiál v martenzitické fázi deformován externí silou krystalové roviny rozvinou mřížku tak, aby se přizpůsobily danému napětí (tento proces je nazýván „oddvojčatění“). Když je slitina odtížena a ohřata změní fázi na austenit. Po ochlazení se materiál vrátí zpět do martenzitické fáze a tímto obnoví svou zbytkovou deformaci [1].



Obr. 3: Základní mechanismus SME [1].

Díky vlastnosti SE může slitina podstoupit velké přetvoření (8-10 %) při vnějším zatěžování a poté se navrátit do původního tvaru při odtížení (Obr. 4) [1].



Obr. 4: Základní mechanismus SE [1].

SE probíhá za vysokých teplot a následkem je ukládání energie, kdežto SME poskytuje pohyb a sílu. Dle těchto druhů chování jsou SMAs rozdělovány na SE-SMAs a SME-SMA (alternativně martenzitické SMAs) [1].

Dle vratnosti SME dělíme SMAs na dvě hlavní podskupiny: ty, které vykazují jednosměrný SME a ty, které vykazují obousměrný SME. Jednosměrné SMAs (Obr. 5a) vykazují nevratnou vlastnost obnovy tvaru, materiál je pouze schopný se změnit z deformovaného (dočasného) tvaru zpátky do svého originálního (permanentního) tvaru pomocí ohřevu. Po této obnově tvaru nemůže materiál změnit znovu tvar pomocí SME, pokud není deformován externím zatížením. Naproti tomu obousměrné SMAs (Obr. 5b) mají vratnou schopnost obnovy tvaru (tj. mohou si zapamatovat dočasný spolu s permanentním tvarem), deformovaný materiál se může transformovat do svého permanentního tvaru pomocí ohřevu a vrátit se do deformovaného tvaru při odstranění zdroje tepla [1].



Obr. 5: a) jednosměrný SME, b) obousměrný SME [1].

2.1.1.2. Magnetické materiály s tvarovou pamětí (MSMAs)

MSMAs jsou skupina slitin s tvarovou pamětí (SMAs), které vykazují feromagnetické vlastnosti v kombinaci se superelasticitou (SE) a efektem tvarové paměti (SME). Mohou být nazývány i jako feromagnetické slitiny s tvarovou pamětí (Ferromagnetic Shape Memory Alloys – FSMAs). Mají lepší únavovou odolnost než SMAs. Pokud jsou vystaveny dostatečně silnému magnetickému poli elementy MSMAs projdou přeorientováním dvojčat a pohybem hranic dvojčat v jejich mikrostruktuře dojde ke změně velikosti i tvaru. Tato vlastnost je známa jako magnetický efekt tvarové paměti (Magnetic Shape Memory Effect – MSME). Příkladem těchto materiálů jsou slitiny Ni-Mn-Ga, Ni-Mn nebo třeba Fe-Ni-Co-Ti, přičemž nejvíce studované jsou materiály založené na Ni-Mn-Ga [1].

V běžných aplikacích mohou tyto materiály sloužit jako aktuátory i jako senzory. Díky jejich skvělému potenciálu vyprodukovat velké přetvoření (až 10 %) při působení magnetického pole v krátkém čase (tj. za méně než 0,2 ms, což je zhruba stokrát rychlejší než SME) mohou být MSMAs používány jako aktuátory v mnoha oblastech. Za normálních podmínek, do určitých mezí, se zesílením magnetického pole dojde ke zvýšení přetvoření. Pokud se magnetické pole nadále zvětšuje dochází již k malému nebo žádnému dodatečnému přetvoření. Za těchto podmínek dojde k magnetické saturaci v elementu MSMAs a zvětšování magnetického pole pro získání větších přetvoření je téměř zbytečné. Množství vyprodukovaného přetvoření je ovlivněno fyzickým zatížením působícím na daný MSMA element. Při zvětšování zátěže dochází ke snižování přetvoření. Tato magneticky vyvolaná deformace je velmi rychle vratná pomocí aplikování vnější mechanické síly v opačném směru (např. použitím pružiny) nebo pomocí magnetického pole kolmého k předchozímu magnetickému poli. V porovnání s piezoelektrickými materiály produkují MSMAs větší výstupy.[1]

MSMAs mohou také sloužit jako senzory. Tato schopnost vychází z narušení magnetického pole probíhajícího skrz MSMA z důvodu deformace způsobené externím zatížením. Deformace vede k přeorientování dvojčatové mikrostruktury v materiálu čímž se změní magnetické vlastnosti slitiny. Tato přetvoření vyvolaná změna v magnetizaci je inverzí MSME. Z toho vyplývá, že kromě změny v elektrickém odporu MSMAs (která je typická pro všechny vodivé materiály) se také mění jejich magnetická permeabilita skrze deformaci[1].

Je důležité říct, že MSME existuje pouze v oblasti martenzitické fáze (tj. při nízkých teplotách). S nárůstem teploty a přechodem do fáze austenitu je tento efekt ztracen. Jsou zde jisté omezení, která limitují využití MSMAs, zejména výskyt hystereze mezi vstupem aktuátoru (elektrický proud) a výstupem (přetvoření) stejně tak jako mezi přetvořením a napětím, efekt prvního cyklu a vysoká citlivost na teplotu. Všechny tyto děje mají nezanedbatelný vliv na vlastnosti MSMAs. Navíc se relativní magnetická permeabilita mění s intenzitou magnetického pole. Na druhou stranu, díky její podstatě, hystereze vylepšuje schopnost MSMAs tlumit vibrace [1].

2.1.1.3. Polymery s tvarovou pamětí (SMPs)

SMPs jsou materiály schopny transformování z dočasného tvaru do jejich permanentního (původního) tvaru pomocí vnějšího podnětu. Tímto podnětem může být nejen teplota ale i světlo, elektrické nebo magnetické pole, mikrovlny, voda nebo jiný roztok atd. Většina SMPs však reaguje na teplotu [1].

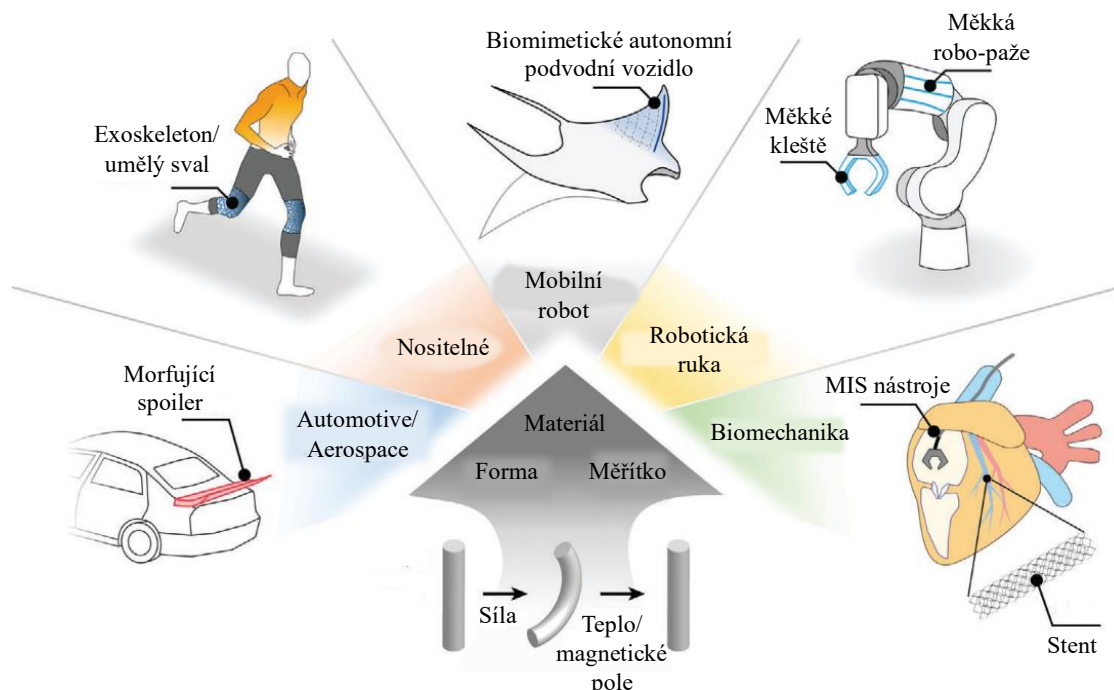
Jako skupina materiálů s tvarovou pamětí (SMMs), SMPs vykazují buď jednosměrný nebo obousměrný efekt tvarové paměti (SME). Obousměrné SMPs používané v minulosti byly schopné si zapamatovat pouze dva tvary, tj. dočasný a permanentní stav. V současné době je již možné vytvářet SMPs, které jsou schopné si zapamatovat i tři a více tvarů. Toto je možné díky kombinování dvou a více SMPs s různými charakteristikami tvarového přechodu. Takovýmto způsobem SMPs mohou přecházet mezi dvěma, třemi i více tvary. Dle toho, kolik různých tvarů jsou si SMPs schopny zapamatovat v SME cyklu se dělí na dual-, triple-, a multi-SMPs. Aby bylo umožněno SMP elementu dosažení určitého tvaru při dané teplotě, tak k tomu tento materiál musí být naprogramován (vytrénován) a tento trénink může být prováděn různými způsoby. Pro SMPs reagující na teplotu se tento trénink provádí převážně pomocí jednofázových jednoosých nebo dvouosých trénovacích metod [1]. Podrobnější rozbor vlastností SMPs a možností tréninku lze nalézt ve zdroji [7].

Některými z výhod SMPs oproti slitinám s tvarovou pamětí (SMAs) je možnost větších deformací, biokompatibilita, nízká hustota, nízká cena, jednoduchost výroby, upravitelná tuhost atd. Avšak díky horším strukturálním vlastnostem (např. mechanická pevnost) v porovnání s SMAs je použití SMPs v inženýrské praxi limitováno. Vyztužení SMPs různými dalšími materiály, jako například kontinuálními vlákny, značně zlepšuje jejich mechanické vlastnosti. Díky těmto vylepšením jsou SMPs a jejich kompozity využívány častěji [1].

2.2. Aktuátory využívající materiály s tvarovou pamětí

Díky efektu tvarové paměti (SME) jsou slitiny s tvarovou pamětí (SMAs) zvažovány a používány jako alternativní aktuální prvky využitelné k nahrazení konvenčních aktuátorů, například elektricky nebo palivem poháněných motorů. Navíc díky jejich vysoké hustotě práce umožňují redukcii hmotnosti a rozměrů, zatímco jsou schopné vyprodukovat komplexní pohyby a mít vysoce specifické chování. Díky těmto schopnostem byly SMAs využity jako komponenty v nositelných zařízeních, mobilních robotech, robotických koncových efektech, biomedicínských zařízeních nebo například v automotive a aerospace zařízeních. V současnosti se SMA aktuátory využívají v mikroelektromechanických systémech (microelectromechanical systems – MEMS), v oblasti biomedicíny a zařízeních pro vesmírné aplikace [2].

Za poslední dvě dekády expandovaly aplikace SMA aktuátorů i do oblastí robotických rukou a nositelných zařízení, přesné aktuace, výrobních technologií, mechanického designu a rozsah dostupných SMA materiálů se vysoce zvětšil. Široký rozsah technologií dostupných v současnosti umožňuje SMA systémům, aby byly upraveny na míru pro specifické aplikace, co se materiálu, formy a rozměrů týká. Ve zdroji [2] je podrobně rozebrán vývoj SMA aktuátorů, náznak oblastí tohoto rozboru je na *Obr. 6*. Je také provedeno porovnání SMA reagujících na teplotu (Thermal Shape Memory Alloy – TSMA) a na magnetické pole (MSMA) dle aktuálního výkonu a rozbor různých povrchových úprav sloužících pro změnu vlastností. Dále je rozebrána forma těchto materiálů a jak se vybírá pro dosažení konkrétní specifické deformace, jak je produkován komplexní pohyb a celkově jak využít tyto poznatky k vytvoření finálních aktuátorů. Dále jsou přetlumoceny části tohoto zdroje [2] relevantní pro problematiku této práce.



Obr. 6: Dle materiálu, formy a tvaru mohou být aktuátory založeny na SMA použity v širokém rozsahu aplikací jako je vidět na tomto obrázku [2].

2.2.1. Formy slitin s tvarovou pamětí (SMAs) v aktuátorech

SMAs mohou zaujímat rozmanité formy včetně drátů, pružin, kompozitů i tkaných či pletených struktur. Každé formy je dosaženo jiným výrobním procesem. Následující sekce popisuje, jak lze tyto formy využít k rozšíření aktuace z jednoduchého lineárního pohybu na ohýbání, rotaci, torzní pohyby či kombinaci těchto pohybů [2].

2.2.1.1. Drát a pružina

Obr. 7 ukazuje, jak rozdílné formy aktuátorů generují různé pohyby. Drátové SMAs produkují lineární pohyby pomocí délkové kontrakce. Toto je nejjednodušší forma pro SMA aktuátor. Při použití typické tepelné slitiny s tvarovou pamětí (TSMA) dochází k lineárnímu aktuačnímu přetvoření zhruba 3-4 % a aktuačnímu napětí 100-700 MPa. SMA drát, který má mechanickou strukturu s rotační osou deformace umožňuje „kloubové“ rotace [2].

Lineární pružiny vyrobené z SMA drátů mohou být použity k vylepšení délky deformace aktuátoru výměnou za ztrátu aktuační síly. Torzně předepjaté SMA pružiny mohou být použity pro vytvoření torzních pohybů. Stejně jako SMA dráty, SMA pružiny generují jak lineární, tak rotační pohyby. Je také možné použít paralelní SMA elementy pro zvýšení vyprodukované síly. Navíc lze pomocí kombinace lineárních torzních pružin vytvářet komplexní pohyby [2].

Samotný SMA drát či pružina dovolující pouze jednosměrný pohyb, a tudíž umožňují pouze jednosměrnou aktuaci. Pro obousměrnou aktuaci by měl být použit bias element (například pružina). Obousměrně vytrénované SMA elementy produkují vratné síly, které mohou sloužit jako bias elementy. Problémem je, že zpětná síla způsobená bias pružinami není kontrolovatelná a obousměrně trénované SMA elementy produkují méně síly než jednosměrné elementy. Z tohoto důvodu se pro obousměrnou aktuaci běžně používají protikladné SMA elementy [2].

		— Deformované SMA		— Obnovené SMA		Bias pružina		Měkký polymer	
Pohyb		Lineární	Rotace	Ohyb	Kрут	Komplexní			
Jednosměrná aktuace	Drátový typ				Zkroucená SMA 	ABS „lešení“ Ohyb + kрут			
	Pružinový typ					 Lineární + kрут			
Nucená obousměrná aktuace	Drátový typ					 Ohyb + kрут			
	Pružinový typ					 Lineární + kрут			

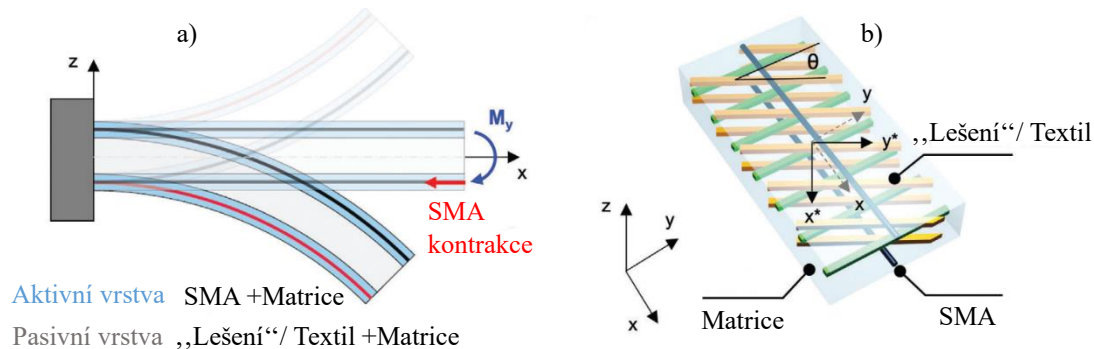
Obr. 7: Různé aktuační módy dosažené různými podobami aktuátorů, kompozitní (SSC) aktuátory jsou zvýrazněny zeleně [2].

2.2.1.2. Chytré měkké kompozitní aktuátory

Chytré měkké kompozitní (Smart Soft Composite – SSC) aktuátory jsou vytvořeny kombinací slitin s tvarovou pamětí (SMAs) s nízko-tuhostními polymerickými maticemi, které využívají rovinnou lineární deformaci SMA k vyprodukování nerovinné deformace celé této struktury. Například pokud je SMA drát posunut mimo neutrální osu nosníku vytvořeného z měkkého polymeru, celý kompozit se může ohnout (Obr. 8a). Navíc může do matrice být umístěna nosná struktura z SMA, jejíž orientace ovlivňuje ohybové chování SSC (Obr. 8b). Tato struktura může být zkonstruována z několika vrstev a pohyby jako symetrický, antisymetrický, asymetrický nebo torzní jsou generovány kombinováním různých kombinací záhybů v těchto vrstvách. Podobně jako u orientace vláken ve vlákny vyztužených kompozitech, charakteristika nosné struktury se mění podle její orientace a je možné nadesignovat nosné struktury s úhly v rozmezí od -90° do 90° . Dále potom efekty několika-vrstvové nosné struktury na vlastnosti aktuátorů mohou být odvozeny použitím klasické laminátové teorie [2].

SSC mohou být použity k vytvoření lineárních pohybů sestavením segmentů, které se ohýbají v opačných směrech (zvýrazněné v Obr. 7). Pokud je několik takovýchto aktuátorů propojeno do kříže, konec aktuátoru se chová lineárně. Pomocí SSC je možné vytvářet i torzní pohyby, a to různými způsoby. SMA dráty umístěné diagonálně v měkkém polymeru umožňují SSC vyprodukovat torzní deformace při využití lineárního předepnutí SMA. Torzně předepnuté (zkroucené) SMA dráty také mohou vykonat torzní deformaci pomocí obnovy předepnutí. SSCs s maticemi vykazujícími asymetrické vlastnosti (např. po přidání anizotropických matricových elementů jako například 3D vytisknutá nosná struktura) také umožňují torzní deformace. Tyto

metody lze modifikovat jak na ohyb, tak na torzní deformace. Hlavní výhodou SSC aktuátorů je schopnost generovat kontinuální a komplexní deformace. Principiální nevýhodou je potenciální delaminace mezi měkkou polymerovou maticí a vysoko-napěťovým SMA elementem během cyklického namáhání. Aby bylo možno použít SSC jako měkký aktuátor je nutné vybrat materiál matrice jehož elastický limit není překročen napětím způsobeným chováním SMA při fázové přeměně. Pro stabilní deformace je nutné zvážit nejen materiál matrice, ale i designové faktory jako je například poměr jednotlivých složek. Pokud je materiál a geometrie matrice uvažována během designu je proveditelné dosažení kontinuálních a rozmanitých pohybů, jako například ohyb a krut při zamezení trhlin a vzpěru [2].



Obr. 8: Schématický diagram tvar-měnicích SSC aktuátorů. a) Kontrakce SMA generuje moment a ohybovou deformaci. b) Design SSC aktuátoru. Asymetrická nosná struktura nebo vrstvy textilu, které mají úhel rastru θ , upravují orientaci hlavní osy. Ohybový moment může být přenesen na kombinaci ohybu a krutu pro generaci komplexních deformací [2].

2.2.1.3. Měkké morfující textilie

Textilie jsou vyrobeny z vláken a mohou tvořit 2D nebo 3D struktury podle toho, jaké je uspořádání vláken a kombinace mezi nimi. Vlákna použitá pro výrobu textilií jsou jednotlivé prameny drátů nebo svázaná a zkroucená vlákna. Vlákna ve formě kontinuálních strun vytváří flexibilní textilie. Flexibilita, dimenzionální stabilita a elasticita se liší podle jednotlivých uspořádání vláken. Dále lze dělit textilie na tkané a pletené podle toho, jak jsou vlákna navzájem zamotána. Textilní SMA aktuátory implementují ohyb, krut a další komplexní pohyby bez rizika delaminace (na rozdíl od SSC aktuátorů) [2].

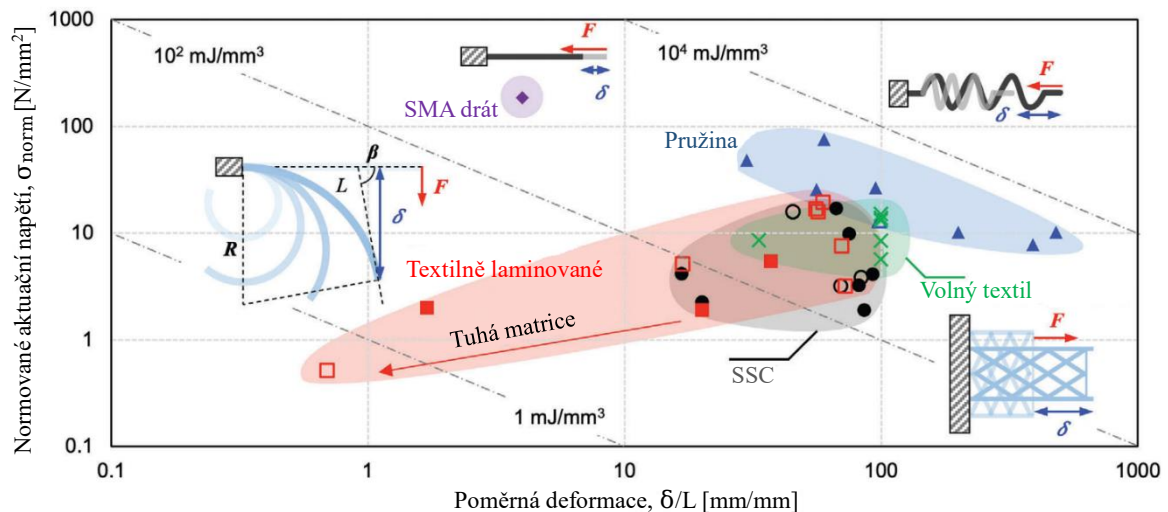
Drátové SMAs mohou být použity jako náhražky pro textilní vlákna nebo kombinovány s běžnými vlákny. Takové textilie využívají efekty generace přetvoření od fázové transformace SMA a vlastností textilu. Směr síly generované textilem a deformační limity se mohou lišit dle uspořádání a kombinace vláken [2].

2.2.2. Využití různých forem slitin s tvarovou pamětí pro návrh aktuátorů

Implementace jednotlivých forem umožňuje aktuátorům zlepšit jejich výkony. Lze jimi zvětšit poměrnou deformaci nebo demonstrovat komplexní změny tvaru. Aktuační síla může být také změněna, a to jak ve směru, tak v jejím typu (např. bodové zatížení, plošné zatížení) pro specifické aplikace. Mohou vykazovat další zajímavé vlastnosti, jako je extrémní poddajnost, tvarová stálost a vysoko-pevnostní konstrukce. Obr. 9 porovnává aktuační napětí a poměrnou deformaci pro různé formy. Aby bylo možno porovnat různé aktuátory jsou hodnoty v tomto obrázku normovány. Vzhledem k tomu, že primárním zdrojem energie je drát a síla je úměrná jeho příčnému průřezu, aktuační síla je převedena na normované aktuační napětí pomocí následující rovnice:

$$\sigma_{norm} = \frac{F_A}{nA_{SMA}}, \quad (3.1)$$

kde σ_{norm} , F_A , n a A_{SMA} postupně reprezentují normované aktuační napětí, aktuační sílu aktuátoru, počet SMA drátů a plochu příčného průřezu SMA drátu. Čerchované čáry značí měrnou energii poskytnutou daným typem aktuátoru v mJ pro jednotkový objem mm^3 . Špičková síla reprezentuje aktuační sílu ohybového aktuátoru. Aby bylo možné porovnat poměrnou deformaci stejným způsobem, vertikální špičková výchylka je uvažována jako deformace ohybového aktuátoru. Celkově se ukazuje, že aktuátory s větším aktuačním napětím vykazují menší poměrnou deformaci a naopak. Pružinová forma vysoce zvětšuje schopnost deformace. SSC a textilní kompozity vykazují menší aktuační napětí a menší deformace při použití tužších materiálů (např. uhlíková nebo skelná vlákna) jako matic [2].



Obr. 9: Porovnání různých SMA aktuátorů [2].

2.2.3. Aktuační režimy

Pokud je slitina s tvarovou pamětí (SMA) používána mezi stavy plně oddvočatěného martenzitu a austenitu je měrná práce konstantní a je úměrná L^3 (L – délka), protože síla (F) SMA drátu je úměrná L^2 a prodloužení je úměrné délce aktuátoru. Z tohoto vyplývá, že lineární pohyb efektivně generuje energii a deformaci. Podobně lze tvořit jednoduché ohybové aktuátory tak, že SMA elementy jsou umístěny na fixní excentricitě podél celé délky. Efektivnost takovýchto aktuátorů je podobná jako u lineárních, protože pouze konvertují lineární pohyb na ohybový [2].

Jak je ukázáno ve zdroji [2], aktuátory menší než několik milimetrů jsou využívány především k implementaci lineárního a ohybového režimu, zatímco aktuátory větší lze použít i na produkování torzních a komplexních deformací. V porovnání s lineární a ohybovou akucí je složité provádět torzní nebo komplexní akuci v mikro měřítku nejen díky povaze SMA drátů, ale také fyzickým a výrobním limitacím [2].

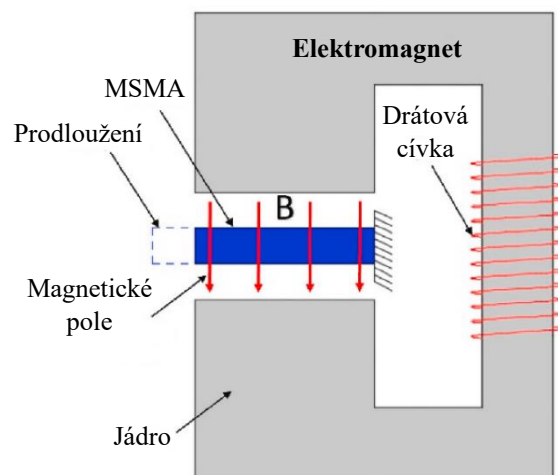
Například pokud se snažíme vytvořit torzní pohyb při využití SMA drátu existují dva různé přístupy, které jsou podobné návrhu torzních aktuátorů větších rozměrů. Jedním je aplikování smykového napětí po délce drátu jeho zkroucením. Problémem však je, že rozložení napětí je sníženo v radiální ose a z toho vyplývá struktura. Uprostřed drátu je zdvojitý martenzit a na povrchu je oddvojitý martenzit. Toto snižuje akuační výkon, protože k martenzitické transformaci nedojde v celém objemu. Ze stejných důvodů není tento přístup vhodný pro generaci komplexních akuačních pohybů. Druhou metodou je využití přídavných rámu poskytujících odsazení mezi osou síly a neutrální osou. Odsazení pomáhá lineární kontrakci SMA generovat kroutící moment. Ačkoli tento design umožňuje efektivní torzní a komplexní pohyby, praktická implementace je limitována obtížností realizace z důvodu složité výroby a sestavení komplexní kompozitní architektury v malých měřítkách. Dalším problémem tohoto konceptu je limitace miniaturizace, protože přidáním rámu dojde k celkovému zvětšení aktuátoru [2].

Implementací neobvyklých designů a technologiemi výroby mikroelektromechanických systémů (MEMS) si lze poradit s problémem integrace SMAs do kompozitních forem, které generují torzní nebo jiné komplexní pohyby. Tato integrace vyžaduje precizní pozicování SMA elementu uvnitř větší, ale stále relativně malé, struktury. Mokré leptání může vylepšit rychlost výroby malých vzorových SMA struktur. Fotolitografii a depoziční procesy lze využít ke spojení měkkých a tvrdých materiálu s SMAs (například bimetalový design (podrobněji ve zdroji [8]) nebo poddajný rám). Ačkoliv tyto přístupy umožňují malým SMAs vykazovat vysoké akuační rychlosti a rozličné akuační režimy, přesný pohyb a ovládní síly je stále obtížným úkolem [2].

2.2.4. Aktuátory využívající magnetické materiály s tvarovou pamětí

Aktuační schopnost magnetických slitin s tvarovou pamětí (MSMAs) je široce studována v různých oblastech inženýrství převážně pro kontrolování vibrací strojů a strukturálních elementů. Většina takovýchto aktuátorů funguje na principu změny délky MSMA tyče působením magnetického pole, generovaného nejčastěji elektromagnetem [1].

Základy tohoto přístupu jsou schematicky znázorněny na Obr. 10. Jak lze vidět, MSMA element je vložen do vzduchové mezery v magnetické smyčce tak, že magnetické pole působí kolmo na tyč, což vede k jejímu prodloužení. K vyprodukování znatelné deformace je nutné silné magnetické pole (například pro slitinu Ni-Mn-Ga je nutné pole o síle alespoň 0.2 T). Množství a frekvence vyprodukovaného přetvoření je kontrolováno frekvencí a amplitudou magnetického pole, které je pro změnu upravováno změnou frekvence a intenzity elektrického proudu procházejícího cívkou [1].

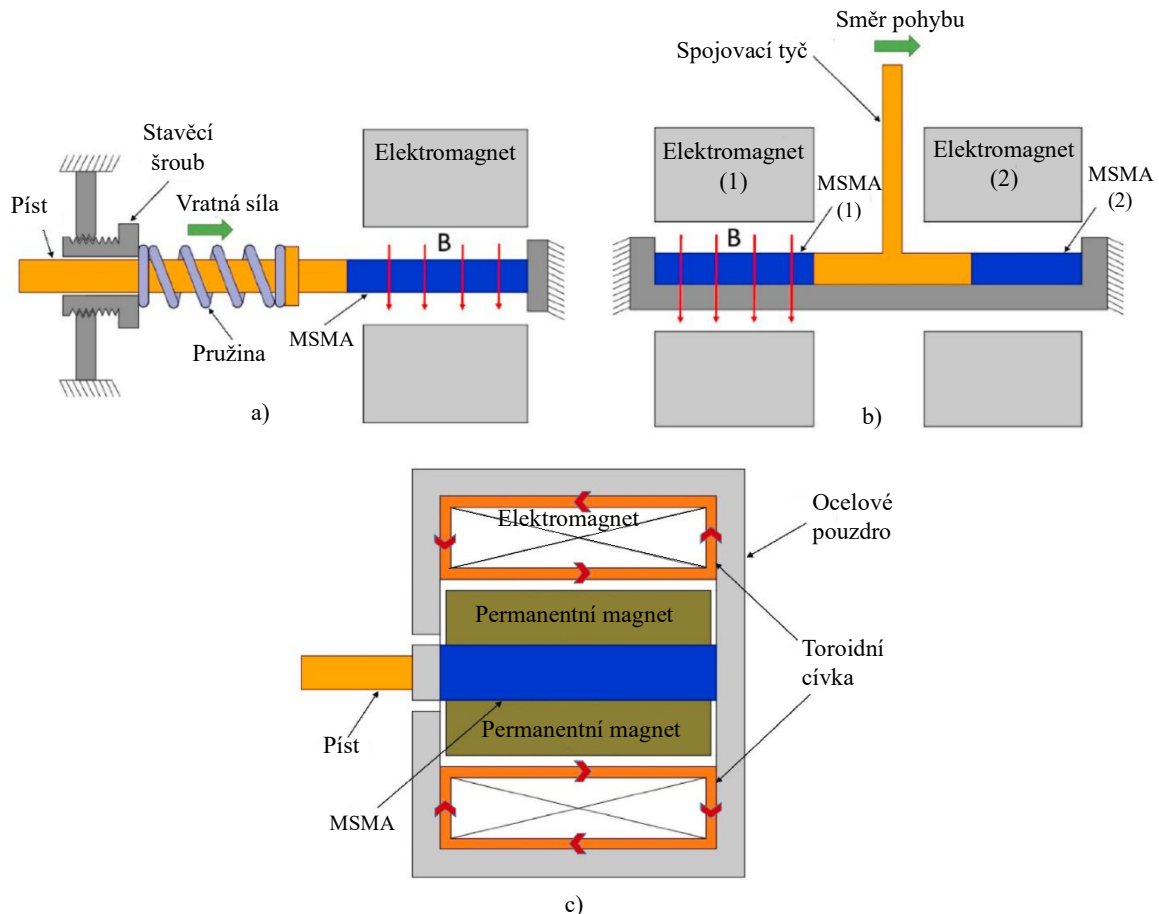


Obr. 10: Prodloužení MSMA tyče působením magnetického pole [1].

Existují tři základní typy aktuátorů založených na tomto principu: aktuátory s pružinou, push – push aktuátory a push – pull aktuátory (Obr. 11). Výstupem všech těchto aktuátorů je pohyb a síla. Pružinové aktuátory jsou běžnější díky jejich jednoduchosti a snadnosti implementace (Obr. 11a). Výstup těchto aktuátorů je poskytován pístem, který je v kontaktu s MSMA tyčí. Návrat do původního tvaru MSMA tyče po odstranění magnetického pole je zajištěn tlakovou silou vyvíjenou na tyč pružinou. Když se tyč prodlouží vytlačí píst vpřed. Tímto pohybem je stlačena pružina a tlačí zpátky na MSMA element. Tuto vratnou sílu lze regulovat stavěcím šroubem [1].

Push – push aktuátory (Obr. 11b) se skládají ze dvou MSMA elementů, které jsou vystaveny působení magnetického pole od dvou elektromagnetů. Elementy jsou propojeny pohyblivou spojovací tyčí mezi nimi, tato tyč zároveň vytváří výstup aktuátoru. Když je elektromagnet 1 zapnutý a druhý je vypnutý, MSMA 1 se prodlouží, posune spojovací tyč doprava a stlačí MSMA 2. Podobně, když se zapne elektromagnet 2 a elektromagnet 1 se vypne, tak se prodlouží MSMA 2, posune se spojovací tyč doleva a stlačí MSMA 1. V tomto systému je silou pro návrat tvaru do původního pro MSMA element poskytována druhým MSMA elementem místo pružiny [1].

U push – pull aktuátorů (Obr. 11c), na rozdíl od předchozích dvou typů, není návratu tvaru dosahováno mechanickou silou. Místo ní se využívá ke změně tvaru oběma směry magnetické pole. Pro návrat tvaru do původního se aplikuje toto pole na MSMA element v podélném směru. Mechanismus tohoto systému je ten, že element se protáhne díky přítomnosti dvou permanentních magnetů, které působí magnetickým polem v příčném směru. Návrat tvaru je poté realizován průběhem elektrického proudu skrze cívku, která obklopuje permanentní magnety a MSMA element. Tato cívka vede magnetický tok podél délky MSMA tyče, čímž způsobí její návrat do původního tvaru. Změnu délky (zkrácení) tyče lze regulovat snížením či zvýšením proudu [1].



Obr. 11: Mechanismy různých typů MSMA aktuátorů: a) pružinový aktuátor, b) push-push aktuátor, c) push-pull aktuátor [1].

MSMA aktuátory byly shledány vhodnými pro aktivní kontrolu vibrací různých struktur ve stavebnictví. Nejčastěji uvažovanými aktuátory pro výzkum v této oblasti využití byly ty s pružinou. Jako nejčastější materiál byl využíván Ni-Mn-Ga. MSMA aktuátory jsou schopné disipovat vibrace pomocí mechanismů jako jsou například strukturální posuvy, strukturální změna tvaru, změna vlastní frekvence, změna tuhosti atd. Správně nadesignovaný MSMA aktuátor by měl mít vysoký výkon a široký rozsah frekvencí [1].

Hlavní problémy s tímto typem aktuátorů jsou popsány níže:

- Vratná síla poskytovaná pružinou se obtížně nastavuje pro přesný návrat tvaru. Když je síla moc malá je obnova přetvoření také malá, pokud je však síla příliš velká je celkové přetvoření malé, čímž se snižuje kapacita MSMA aktuátoru (mezi tlakem a přetvořením je obrácená lineární závislost). Z tohoto důvodu jsou pružiny nevhodné pro přesné pozicování aktuátoru [1].
- Frekvence aktuátoru je omezena vlastní frekvencí vratné pružiny, čímž je limitována dynamická odezva aktuátoru [1].
- Výkon MSMA aktuátorů vysoce závisí na faktorech jako je teplota, síla magnetického pole, směr magnetického pole, velikosti sil působících na MSMA aktuátor (např. vratná síla). Interakce mezi těmito faktory je komplexním problémem, který vyžaduje vytvoření vhodných modelů pro strukturální kontrolu vibrací [1].
- Pro aktuátory existují jistá omezení, jako například obtížnost aplikování velice silného magnetického pole pro dosažení velkého přetvoření, křehkost MSMA monokrystalů a jejich nelineární chování [1].

Ukázka vlastností konkrétní MSMA a její využití v aktuátoru je dostupné ve zdroji [9].

2.3. Modelování materiálů s tvarovou pamětí

V literatuře bylo již navrženo několik různých modelů schopných reprodukovat chování slitin s tvarovou pamětí (SMA). Ve zdroji [10] je uvedena literatura, ze které lze zjistit další podrobnosti o tomto tématu. Obecně lze rozdělit dostupné modely do tří kategorií:

1. Mikro-level modely, které popisují mikro-úrovňové efekty jako je například nukleace, pohyb rozhraní nebo dvojčatění.
2. Mikro-makro-level modely, které kombinují mikro-mechanické elementy, jako je rovina rozhraní a varianty martenzitu, s makro-úrovňovou termodynamikou a využitím vhodných homogenizačních technik pro odvození makro/globálních parametrů z mikro/lokálních parametrů.
3. Makro-level modely, které jsou schopné popsat některé z hlavních makroskopických vlastností SMA. Tyto modely jsou speciálně vhodné pro studium strukturálních elementů SMA, protože je lze jednoduše implementovat v numerickém kódu.

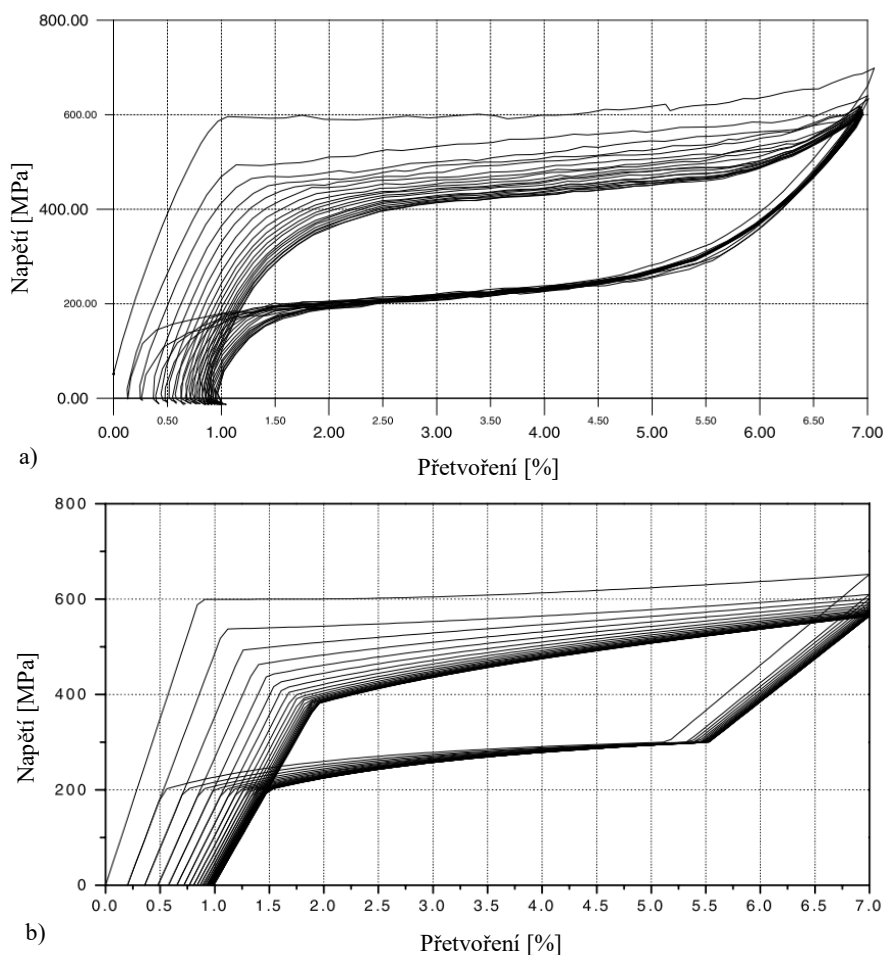
Jedna ze zajímavých vlastností je odezva SMA na cyklické namáhání. Odezva materiálu se progresivně během cyklů mění a dosahuje limitu a stabilního stavu po určitém počtu zatěžujících cyklů, tj. po tzv. materiálovém tréninku. Jak je uvedeno ve zdroji [10] efekty tréninku na napětovo-deformační křivku vyúsťují v následující aspekty:

- postupné snižování počátečního a konečného napětí prahů fázových transformací
- postupné zvyšování zbytkové „permanentní“ deformace

Oba tyto jevy mají mikro-mechanické interpretace, které jsou dále rozebrány ve zdroji [10]. Ve stejném zdroji jsou také diskutováni autoři SMA modelů pracujících s tréninkovým efektem a obousměrným efektem tvarové paměti (SME). Dále je vysvětlena důležitost 1D modelu SMA, který je schopný reprodukovat pseudoplasticitu a SME u SMA při cyklickém namáhání a zároveň je možno jej lehce implementovat v numerickém kódu.

2.3.1. 1D model

Volba 1D modelu je motivována tím, že většina strukturálních elementů v SMA aplikacích lze nadesignovat použitím 1D konstitutivních vztahů týkajících se ohybu a axiální odezvy nosníků. Díky 1D rámu je také možno přesně modelovat speciální vlastnostmi SMA. V tomto modelu je uvažována transformace z austenitu na jednovariantový martenzit a zpět na austenit, v potaz je brána i role teploty. Mikromechanická interpretace předpokládá tréninkové efekty díky permanentní zbytkové přítomnosti martenzitu. Trénování materiálu při cyklickém namáhání je modelováno exponenciální evolucí napěťových prahů austeniticko-martenzitické transformace a také permanentní zbytkovou deformací [10]. Ve zdroji [10] je poté podrobněji rozebrán postup výpočtu pro tento model, a to jak pro časově spojitou variantu, tak pro diskrétní varianty včetně řešícího algoritmu. Jsou uvedeny i některé numerické výsledky tohoto výpočtu. Na *Obr. 12* je ukázán výsledek experimentu a výpočtu pro tento model.

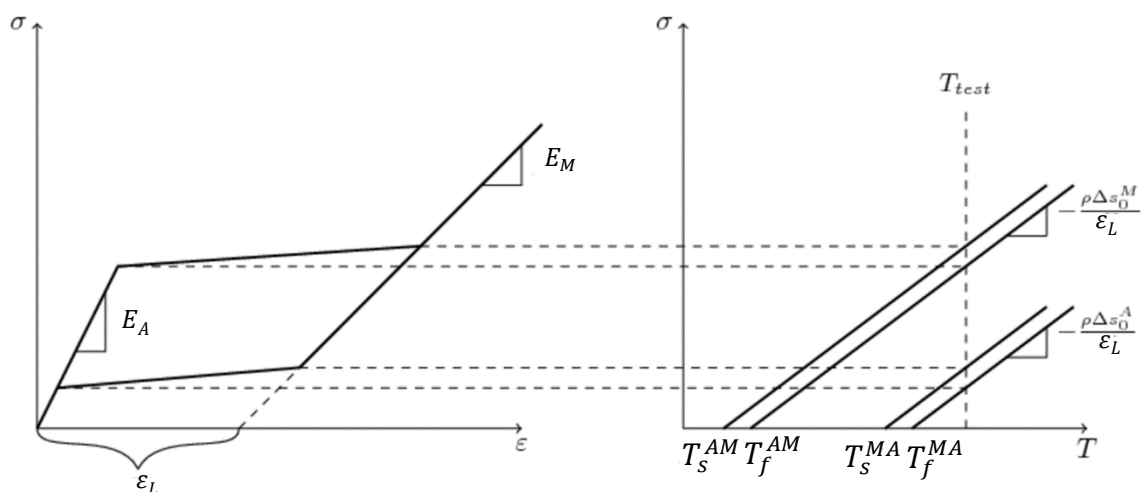


Obr. 12: Pseudoelastická odezva slitiny NiTi na rovnoměrné zatěžující cykly s maximem prodloužení 7%: a) experimentální výsledky, b) numerické výsledky [10].

2.3.2. Modelování SMA v prostředí Ansys

2.3.2.1. Pokročilé materiálové modely

Ve zdroji [11] je popsán pokročilý model vytvořený pro ANSYS 12.1 (software využívající metodu konečných prvků – MKP). Tento materiálový model byl implementován jako uživatelsky programovatelná vlastnost (user programmable feature – UPF) a je napsán ve Fortran kódu a kompilován pomocí Intel Fortran kompilátoru v10.1. Je spojen s konkrétní specifickou ANSYS funkcí pomocí Microsoft Visual Studio 2005 Professional. Na Obr. 13 lze vidět materiálové parametry tohoto modelu.



Obr. 13: Materiálové parametry pro SMA model, ukazující závislost napětí na poměrném prodloužení a teplotně-fázový diagram [11].

Jak je ukázáno v Tab. 1, termomechanické chování SMA modelu lze specifikovat pomocí 12 konstant z nichž je 9 i na Obr. 13. Tyto parametry lze zjistit z jednoosého testu v pseudoplastické fázi a z napětově teplotního diagramu. Koeficienty vlivu napětí $\rho\Delta s^A$ a $\rho\Delta s^M$ lze určit z následujících rovnic:

$$\rho\Delta s^A = -\frac{\sigma^A}{T_{test} - T_s^{MA}} \cdot \varepsilon_L, \quad (3.2)$$

$$\rho\Delta s^M = -\frac{\sigma^M}{T_{test} - T_s^{AM}} \cdot \varepsilon_L. \quad (3.3)$$

Na rozdíl od většiny ostatních materiálových modelů SMA, hodnoty napětí, při kterých martenzit a austenit začnou a skončí jejich fázové transformace nejsou konkrétně specifikovány. Místo toho jsou vyhodnoceny dle napětí-ovo-teplotního diagramu dle teploty, jak lze vidět na Obr. 13 [11].

Tab. 1: Vlastnosti pro materiálový model SMA [11].

Materiálový parametr	Hodnota
Modul pružnosti austenitu E_A	70 GPa
Modul pružnosti martenzitu E_M	30 GPa
Poissonův poměr μ	0,33
Koeficient teplotní roztažnosti austenitu α^A	$22 \cdot 10^{-6} K^{-1}$
Koeficient teplotní roztažnosti martenzitu α^M	$22 \cdot 10^{-6} K^{-1}$
Počáteční teplota martenzitu T_S^{AM}	291 K
Konečná teplota martenzitu T_f^{AM}	271 K
Počáteční teplota austenitu T_S^{MA}	295 K
Konečná teplota austenitu T_f^{MA}	315 K
Maximální transformační přetvoření ε_L	0,05
Koeficient vlivu napětí pro austenit $\rho\Delta s^A$	$-0,35 MPa \cdot K^{-1}$
Koeficient vlivu napětí pro martenzit $\rho\Delta s^M$	$-0,35 MPa \cdot K^{-1}$

2.3.2.2. Porovnání pokročilého modelu se standardním Ansys SMA modelem

Nejviditelnějším zlepšením oproti standardnímu modelu je schopnost modelovat SME. Standardní model se zabývá spíše modelováním pseudoplastické fáze. V normálním modelu je také specifikována jedna počáteční tuhost, a to austenitu před počátkem fázové přeměny. Protože martenzit může být podstatně méně tuhý než austenit, pokročilý model zvyšuje přesnost uvažováním této změny. Pokročilý model také zvládne modelovat transformační oblast napětovo-deformačních modelů pomocí exponenciálního či kosinového modelu. Jednou z výhod standardního modelu je existence parametru specifikujícího mez pevnosti v tahu [11].

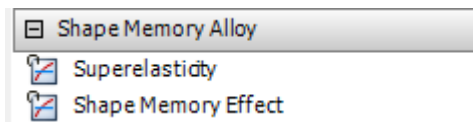
Materiálový model je schopný modelovat jak strukturní, tak teplotní úlohy. Pro přednostně strukturní analýzu, při konstantní teplotě, je materiál kompatibilní s prvky SOLID185/186. Když je nutno uvažovat teplotní změny a jejich efekty lze použít prvky SOLID226/227 [11].

Ve zdroji [11] je dále diskutováno ověření nahoře popsaného pokročilého modelu pomocí jednoosého testu, simulace SME, pseudoplastického zatěžování a teplotní aktuace. Jsou rozebrána i některá uplatnění tohoto modelu v praxi. Další podrobnější rozbor modelování SMA materiálů včetně rovnic lze nalézt ve zdroji [12]. Pokud bychom chtěli modelovat magnetický paměťový efekt jsou k dispozici informace ve zdroji [13].

3. Výpočtové modelování a řešení problému

3.1. Vytvoření modelu materiálu a jeho implementace do SW Ansys

V SW Ansys jsou dostupné dva základní modely pro modelování teplotně aktuovaných slitin s tvarovou pamětí, a to model superelastický (Superelasticity – SE) a model efektu tvarové paměti (Shape Memory Effect – SME) (Obr. 14). Pro modelování teplotní aktuace budeme používat SME model, protože je, na rozdíl od SE modelu, schopný správně modelovat vliv teploty na materiál při transformaci a tím pádem i vhodnější pro naše záměry.



Obr. 14: Modely dostupné v SW Ansys.

3.1.1. Materiálové konstanty

Pro definování modelu materiálu potřebujeme základní konstanty jako je Youngův modul pružnosti austenitu E_A a Poissonův poměr μ (Obr. 15).

Isotropic Elasticity		
Derive from	Y...	
Young's Modulus		MPa
Poisson's Ratio		
Bulk Modulus		Pa
Shear Modulus		Pa

Obr. 15: Konstanty potřebné k definování vlastnosti Isotropic Elasticity (v obrázku označeny žlutými políčky).

Pro plné definování modelu SME materiálu potřebujeme i žlutě označené konstanty z Obr. 16.

Shape Memory Effect		
Hardening Parameter		MPa
Reference Temperature		C
Elastic Limit		MPa
Temperature Scaling Parameter		MPa C ⁻¹
Maximum Transformation Strain		mm mm ⁻¹
Martensite Modulus		MPa
Lode Dependency Parameter		

Obr. 16: Konstanty potřebné k plné definici Shape Memory Effect materiálové vlastnosti v prostředí Ansys.

Při určování těchto konstant vycházíme z materiálových vlastností, které lze určit provedením tahové zkoušky. Vzhledem k tomu, že tato práce je čistě teoretická, tyto konstanty byly určeny dle dostupných literárních zdrojů [14] a potřebami na realizovatelnost modelu.

Potřebné konstanty jsou napětí, při kterém začíná transformace z austenitu na martenzit σ_s^{AM} , napětí, při kterém končí transformace z austenitu na martenzit σ_f^{AM} , napětí, při kterém začíná transformace z martenzitu zpět na austenit σ_s^{MA} a napětí, při kterém skončí transformace martenzitu na austenit σ_f^{MA} . Dále potřebujeme znát maximální transformační přetvoření ε_L (v Ansys modelu pojmenováno jako Maximum Transformation Strain) a modul pružnosti

martenzitu E_M (v Ansysu jako Martensite Modulus). Poslední potřebné parametry jsou referenční teplota T_0 (v Ansysu jako Reference Temperature, tato teplota odpovídá rovnováže fází martenzitu a austenitu) a teplota T , při které probíhala tahová zkouška. Všechny konstanty jsou vypsány v *Tab. 2*.

Tab. 2: Všechny konstanty potřebné pro definici SMA modelu.

E_A	70 GPa
E_M	30 GPa
μ	0,33
σ_s^{AM}	590 MPa
σ_f^{AM}	640 MPa
σ_s^{MA}	350 MPa
σ_f^{MA}	290 MPa
ε_L	0,05 mm · mm ⁻¹
T_0	22°C
T	40°C

Zbývající tři neznámé konstanty, parametr vytvrzení h (v Ansysu jako Hardening Parameter), elastický limit R (v Ansysu jako Elastic Limit) a parametr teplotní závislosti β (v Ansysu jako Temperature Scaling Parameter) odvodíme z následujících rovnic dostupných ve zdroji [3]

$$\sigma_s^{AM} = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot [\beta \cdot (T - T_0) + R], \quad (3.4)$$

$$\sigma_f^{AM} = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot [\beta \cdot (T - T_0) + R + h \cdot \varepsilon_L], \quad (3.5)$$

$$\sigma_s^{MA} = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot [\beta \cdot (T - T_0) - R + h \cdot \varepsilon_L], \quad (3.6)$$

$$\sigma_f^{MA} = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot [\beta \cdot (T - T_0) - R]. \quad (3.7)$$

Z těchto rovnic si vyjádříme potřebné parametry β , R a h a získáme

$$\beta = \frac{\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot (\sigma_s^{AM} + \sigma_f^{MA})}{2 \cdot (T - T_0)}, \quad (3.8)$$

$$R = \frac{\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot (\sigma_s^{AM} - \sigma_f^{MA})}{2}, \quad (3.9)$$

$$h = \frac{\sqrt{\frac{1}{6}} \cdot (\sigma_f^{AM} - \sigma_s^{AM} + \sigma_s^{MA} - \sigma_f^{MA})}{\varepsilon_L}. \quad (3.10)$$

Poté dosadíme hodnoty z *Tab. 2* do rovnic (3.8), (3.9) a (3.10) a získáme konkrétní hodnoty parametrů pro náš model

$$\beta = \frac{\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot (590 + 290)}{2 \cdot (40 - 22)} = 19,96 \text{ MPa} \cdot \text{°C}^{-1}, \quad (3.11)$$

$$R = \frac{\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot (590 - 290)}{2} = 122,47 \text{ MPa}, \quad (3.12)$$

$$h = \frac{\sqrt{\frac{1}{6}} (640 - 590 + 350 - 290)}{0,05} = 898,15 \text{ MPa}. \quad (3.13)$$

Z důvodu obtížnosti přesného určení parametrů vstupujících do výpočtů můžeme jejich hodnoty vypočtené v rovnicích (3.11), (3.12) a (3.13) použít do modelu zaokrouhlené $h = 900 \text{ MPa}$, $R = 122 \text{ MPa}$ a $\beta = 20 \text{ MPa} \cdot \text{°C}^{-1}$.

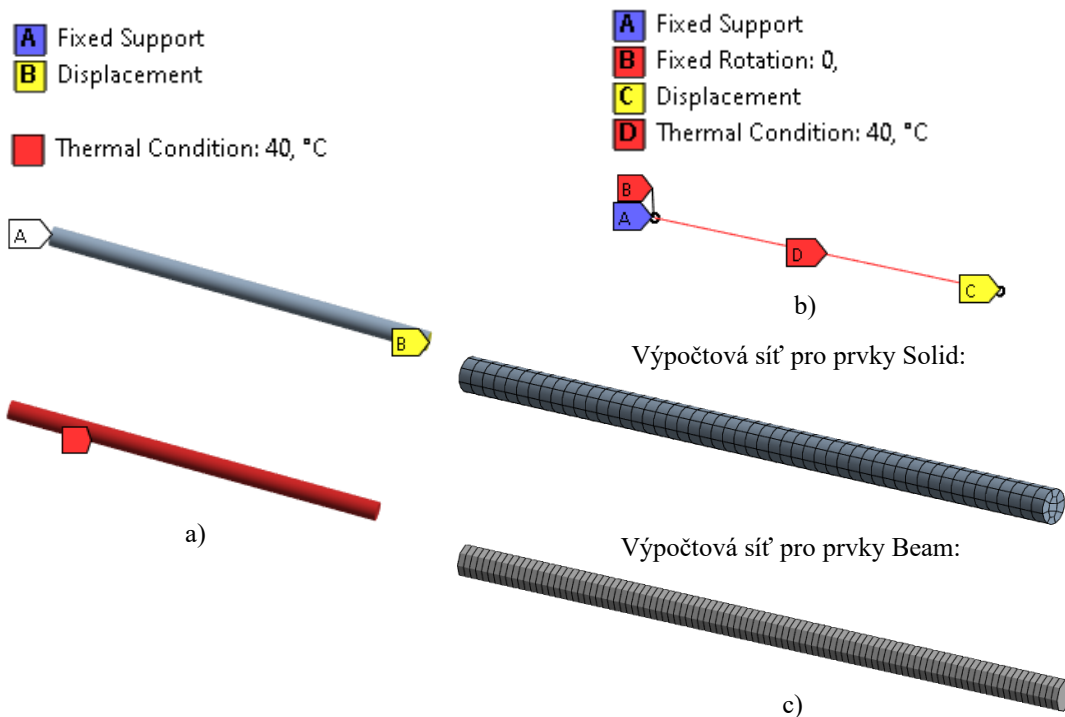
Posledním neurčeným parametrem modelu SME je Lodeho parametr závislosti (v Ansysu Lode Dependency Parameter – m). Tento parametr určuje, jak moc se materiál chová jinak v tlaku než v tahu. Tento parametr volíme pro zjednodušení $m = 0$.

3.1.2. Porovnání modelů materiálu dostupných v SW Ansys

Aby bylo možné porovnat mezi sebou SME a SE modelu musíme si nejdříve SE model vytvořit a nadefinovat. Pro definování superelastického modelu využijeme konstanty z *Tab. 2*, kdy parametry na *Obr. 17* odpovídají následujícím hodnotám: Sigma SAS = σ_s^{AM} , Sigma FAS = σ_s^{AM} , Sigma SSA = σ_s^{MA} , Sigma FSA = σ_f^{MA} , Epsilon = ϵ_L , Es = E_M a Alpha odpovídá Lodeho parametru závislosti a volíme jej stejně jako u předchozího modelu nulový.

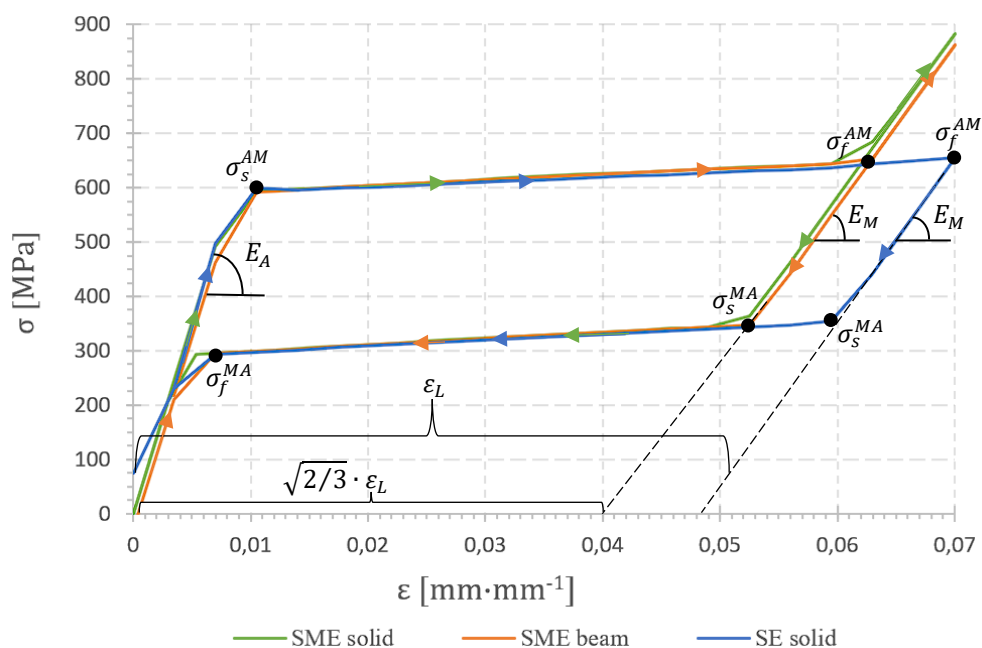
Superelasticity		
Sigma SAS		MPa
Sigma FAS		MPa
Sigma SSA		MPa
Sigma FSA		MPa
Epsilon		mm mm ⁻¹
Alpha		
Es		MPa

Obr. 17: Konstanty potřebné k plné definici materiálové vlastnosti Superelasticity v prostředí Ansys.



Obr. 18: Okrajové podmínky pro model z prvků Solid (a), Beam (b) a výpočtové sítě pro tyto modely (c).

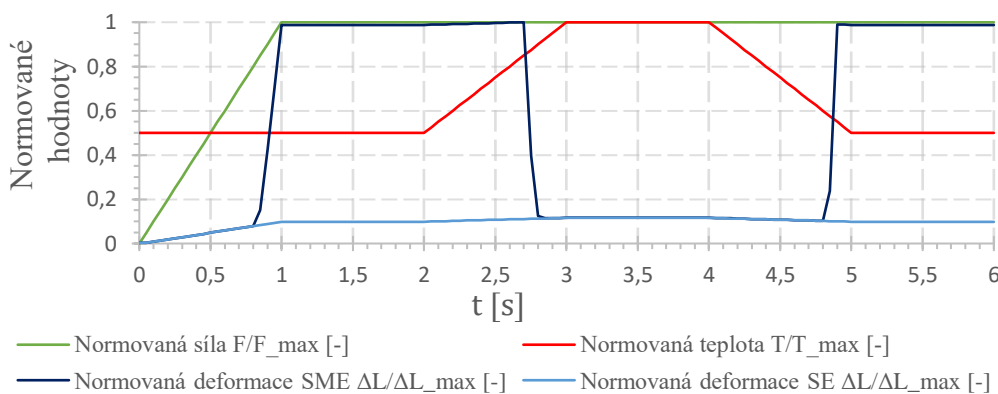
Pro porovnání modelů mezi sebou provedeme simulaci tahové zkoušky při zvýšené teplotě 40°C. Tahová zkouška byla provedena na vzorku o délce 100 mm a průměru 5 mm. Na jednu stranu vzorku byla aplikována okrajová podmínka vetknutí a na druhou stranu okrajová podmínka deformace, kdy vzorek byl natažen o 7 mm a poté uvolněn a navrácen zpět do původního tvaru. Teplota byla aplikována teplotní okrajovou podmínkou na celé zkušební těleso po celou dobu simulace (Obr. 18). Výsledky simulace jsou znázorněny na Obr. 19.



Obr. 19: Porovnání výsledků tahové zkoušky mezi SME a SE modelem.

Z výsledků na *Obr. 19* lze vyčíst, že u SE modelu vzniká větší transformační smyčka než u SME modelu, tento rozdíl je způsoben stylem, jakým jsou definovány modely v SW Ansys, a tudíž výsledky odpovídají teoretickým poznatkům. Díky velmi malým rozdílům mezi SME solid a SME beam můžeme pro další modelování SME používat prvky typu Beam a nedopouštíme se velkých chyb. Pro SE model lze použít pouze prvky typu Solid (tento model neumožňuje použití Beam prvků). Dále lze v grafu vidět rozdílné moduly pružnosti pro fáze austenit E_A a martenzit E_M a také počáteční a konečné transformační napětí těchto fází σ_s^{AM} , σ_f^{AM} , σ_s^{MA} , σ_f^{MA} . Hodnoty, které lze odečíst z grafu, odpovídají zadaným vstupním hodnotám pro určení parametrů SME modelu a z tohoto důvodu lze konstatovat, že model je definován správně.

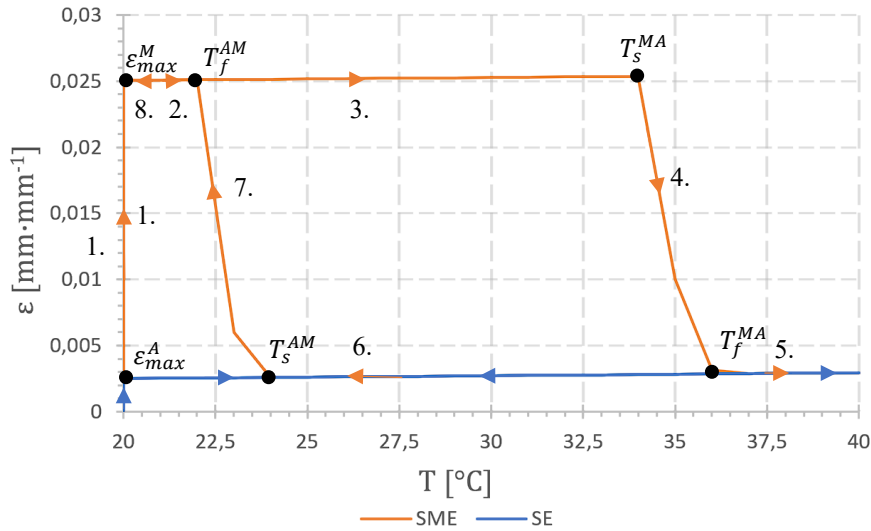
Dále otestujeme chování modelů při zatížení konstantní silou a proměnnou teplotou. Zatěžující cyklus pro tento test je na *Obr. 20* společně s deformací jím způsobenou.



Obr. 20: Průběh zatěžujícího cyklu a způsobené deformace.

Testovací tyče byly zatíženy silou tak, že v čase 0 – 1 s narůstala síla z hodnoty 0 N na 3500 N a po zbytek cyklu byla tato síla konstantní (síla nahrazuje okrajovou podmínku displacement ve směru kolmém na zatěžovanou plochu a byla umístěna do stejného bodu (*Obr. 18b*)). Teplota v časech 0 – 2 s a 5 – 6 s byla 20°C, v čase 3 – 4 s byla teplota 40°C a mezičasech docházelo k ohřevu nebo ochlazování. Hodnoty veličin v zatěžujícím cyklu jsou na *Obr. 20* vždy normovány maximální hodnotou dané veličiny.

Průběhy deformace pro SME a SE model se začínají výrazně lišit přibližně v čase 0,8 s, kdy deformace SME modelu začne významně narůstat, zatímco pro SE model zůstává téměř konstantní. Tento rozdíl je způsoben tím, že vlastnosti SE modelu nejsou ovlivňovány teplotou, zatímco SME modelu ano. Konstanty pro SME model byly vypočteny z tahové zkoušky při 40°C, zpočátku zatěžujícího cyklu má však tyč teplotu pouze 20°C a tím pádem se změní i hodnoty transformačních napětí. V tomto případě například začne transformace z austenitu na martenzit u SME modelu již při zhruba 150 MPa, zatímco pro SE model je potřebné napětí stále 590 MPa. Proto, v tomto případě, u SE modelu ani nedochází k fázové transformaci a deformace zůstává v oblasti konstantní síly také téměř konstantní, až na lehké změny způsobené teplotní roztažností a lze říct, že deformace závisí pouze na síle. Naopak deformace SME modelu pro tento případ silně závisí jak na síle, tak na teplotě. Ohřev opět způsobí změnu hodnot transformačních napětí do takové míry, že zatěžující síla již nezpůsobuje dostatečné napětí pro zachování martenzitu a dojde k transformaci zpět na austenit a navrácení tyče do tvaru před začátkem transformace. Ochlazení způsobí další změnu transformačních napětí a až jejich hodnota dostatečně klesne, zatěžující síla opět vytváří dostatečné napětí pro průběh transformace a tyč se opět natáhne na délku před ohřevem.



Obr. 21: Srovnání závislosti poměrného prodloužení na teplotě mezi SME a SE modelem. Čísla u oranžových šipek udávají jejich pořadí vzniku při výpočtu.

Na Obr. 21 lze vidět porovnání závislosti poměrného prodloužení na teplotě pro SME a SE model. Při změně teploty u SE modelu nedochází ke změně deformace vlivem fázové transformace, ale pouze vlivem teplotní roztažnosti. U SME modelu dochází při změně teploty i k výrazným změnám deformace a konkrétně je možné z grafu vyčíst při jakých teplotách začínají a končí fázové transformace. Transformační teploty v grafu jsou značené ve stejném stylu jako transformační napětí (např. σ_s^{MA} odpovídá teplotě T_s^{MA}). Hodnoty těchto teplot odečtené z grafu jsou pro tuto konkrétní simulaci vypsány v Tab. 3. Hodnoty těchto teplot označují hodnoty maximálního přetvoření pro martenzitu, respektive austenitu.

Tab. 3: Transformační teploty

T_s^{MA}	34°C
T_f^{MA}	36°C
T_s^{AM}	24°C
T_f^{AM}	22°C

Teploty z Tab. 3 lze určit i analyticky z rovnic (3.4) - (3.7) při vyjádření hodnot T následujícím způsobem

$$T_s^{MA} = \frac{\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \sigma_{max} + R - h \cdot \varepsilon_L}{\beta} + T_0, \quad (3.14)$$

$$T_f^{MA} = \frac{\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \sigma_{max} + R}{\beta} + T_0, \quad (3.15)$$

$$T_s^{AM} = \frac{\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \sigma_{max} - R}{\beta} + T_0, \quad (3.16)$$

$$T_f^{AM} = \frac{\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \sigma_{max} - R - h \cdot \varepsilon_L}{\beta} + T_0. \quad (3.17)$$

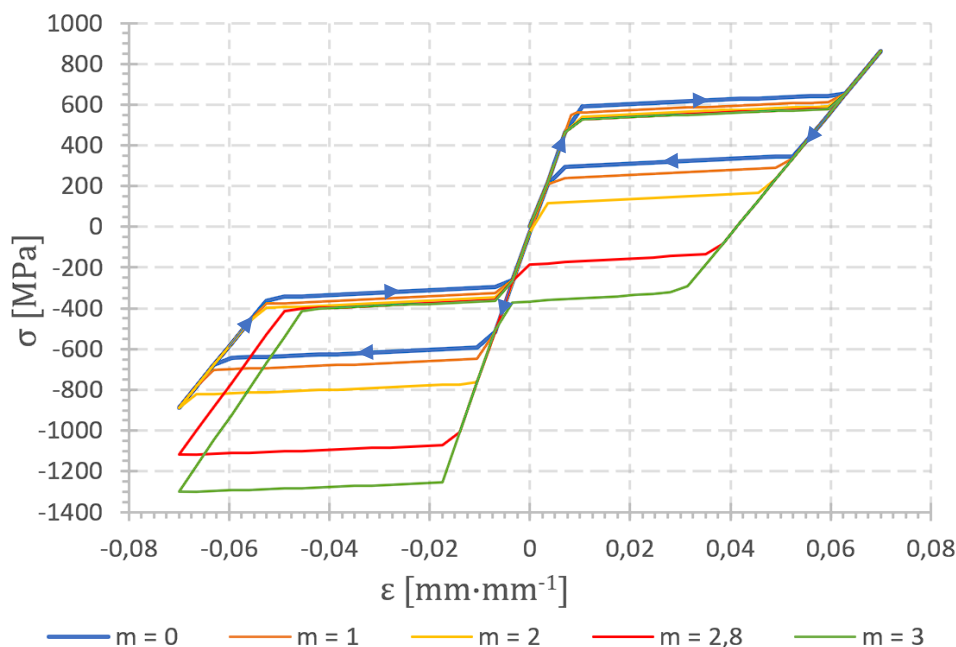
Maximální napětí při zatížení testovacích tyčí silou 3500 N vycházelo $\sigma_{max} = 178,4 \text{ MPa}$. Pro toto napětí jsou pak vypočtené teploty následující: $T_s^{MA} = 33,1^\circ\text{C}$, $T_f^{MA} = 35,4^\circ\text{C}$, $T_s^{AM} = 23,2^\circ\text{C}$ a $T_f^{AM} = 20,9^\circ\text{C}$. Rozdíly mezi teplotami určenými analyticky a odečtenými z grafu jsou způsobeny nepřesností numerického výpočtu a samotným odečtem.

3.2. Testování modelu materiálu

Tato kapitola se zabývá testováním toho, jak se změní odezva materiálu při změně materiálových parametrů. Tyto testy budou demonstrovány pomocí křivek podobných těm na Obr. 19 a Obr. 21. Všechny testy probíhají se Shape Memory Effect (SME) modelem (Obr. 16, Obr. 18b).

3.2.1. Křivka závislosti napětí na přetvoření

Pro tuto závislost otestujeme, jaký vliv má změna Lodeho parametru závislosti m na chování v tahu/tlaku (Obr. 22), kdy tento parametr určuje, jak se mění chování v tlaku oproti tahu. Také otestujeme změnu chování, pokud tahovou zkoušku provedeme při různých teplotách (Obr. 23).

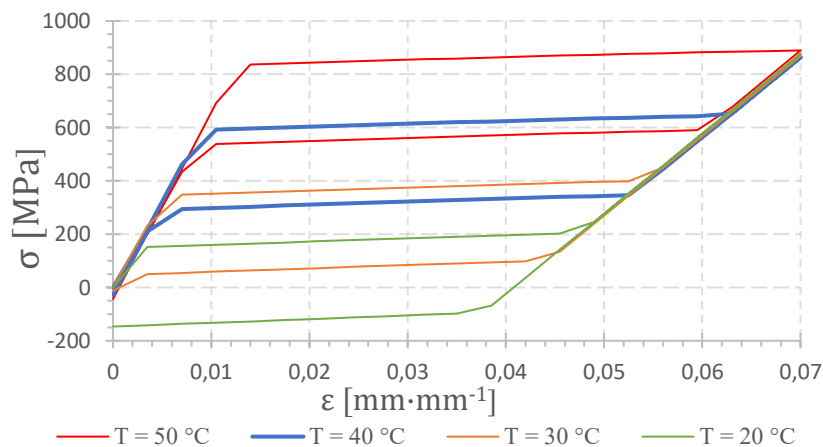


Obr. 22: Křivky závislosti napětí na poměrném prodloužení pro různé Lodeho parametry závislosti.

Z Obr. 22 lze vyčíst, že pokud zvyšujeme parametr m dochází k poklesu tahových transformačních napětí, a naopak k nárůstu tlakových transformačních napětí. Napětí potřebná k transformaci z austenitu na martenzit při natahování zůstávají při změně m téměř stejná, ale při stlačování velmi zjevně narůstají. Napětí potřebná k transformaci z martenzitu na austenit zůstávají při stlačování téměř stejná, a naopak při natahování velice rychle klesají, pro $m = 2,8$ a $m = 3$ jsou již dokonce tlaková i při kladném poměrném prodloužení. To znamená, že pokud materiál vrátíme do původního tvaru před natažením nebude v něm nulové napětí a při uvolnění by se chtěl oproti původní délce samovolně protáhnout. Transformace z martenzitu na austenit

při hodnotě $m = 3$ již probíhá při téměř totožných napětích jak při natahování vzorku, tak při stlačování vzorku a v obou případech vzniká v materiálu tlakové napětí. Tučně zvýrazněná křivka odpovídá SME křivce na *Obr. 19* a šipky na ní znázorňují průběh napětí ve vzorku v závislosti na deformaci. Směr průběhu napětí je stejný pro všechny křivky.

Na *Obr. 23* je vyobrazena závislost tvaru transformační křivky na teplotě při které probíhá tahová zkouška. Křivka se při poklesu teploty posouvá směrem dolů a doleva, přičemž při poklesu pod referenční teplotu T_0 (v tomto případě 22°C) je již téměř půlka křivky v tlakových napětích, přestože vzorek má stále kladné poměrné prodloužení (aby mohlo dojít k transformaci zpět na austenit musejí ve vzorku vzniknout tlaková napětí). Tučně zvýrazněná křivka opět odpovídá SME křivce na *Obr. 19*. Pro vznik těchto křivek byly využita stejná analýza jako na *Obr. 18b*, pro každou křivku byla pouze změněna hodnota T_0 .

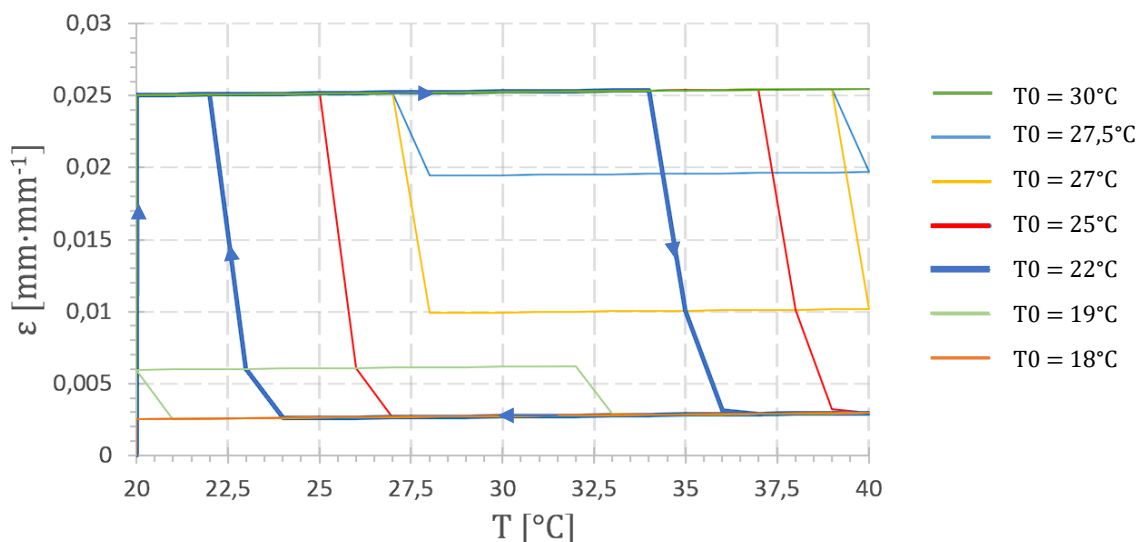


Obr. 23: Křivky závislosti napětí na poměrném prodloužení vypočtená při různých teplotách.

3.2.2. Křivka závislosti přetvoření na teplotě

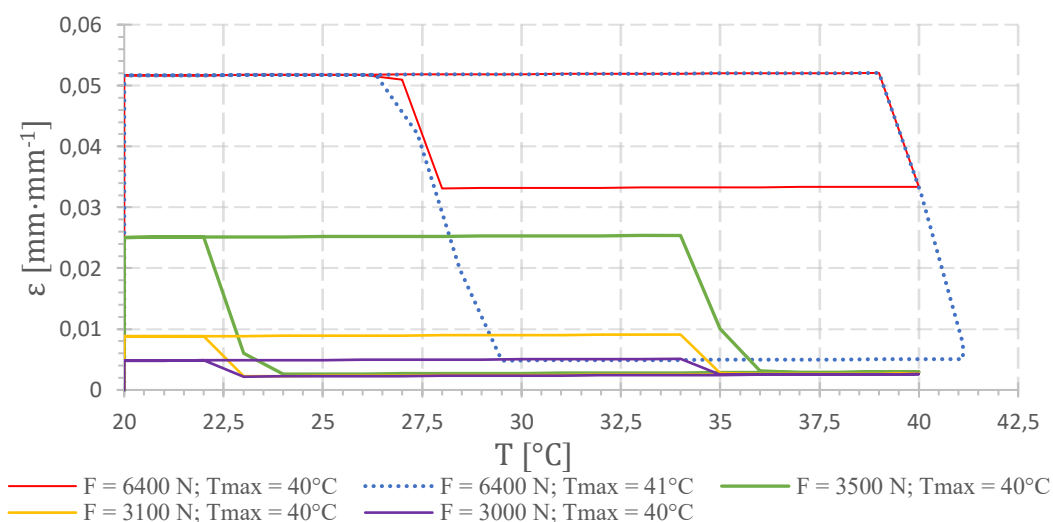
Pro tuto závislost otestujeme, jaký vliv má změna referenční teploty T_0 na chování v tahu (*Obr. 24*). Také otestujeme změnu chování, pokud tahovou zkoušku provedeme při různých zatíženích (*Obr. 25*).

Na *Obr. 24* lze vidět, jak se mění transformační smyčka při změně referenční teploty T_0 . Všechny křivky byly získány pomocí stejného zatěžujícího cyklu jako je na *Obr. 20*. Při snižování pod hodnotu 22°C dochází ke zmenšení plochy transformační smyčky a zároveň k poklesu transformačních teplot i maximálního přetvoření. Pro referenční teplotu 18°C již transformace vůbec neproběhne a materiál zůstane ve fázi austenitu. Při zvýšení hodnoty T_0 nad 22°C dochází k posunu transformační smyčky směrem doprava, což je způsobeno zvýšením transformačních teplot. Transformační smyčky pro referenční teploty 27°C a $27,5^\circ\text{C}$ se zdají být menší než křivky pro nižší teploty, ale tento rozdíl je způsoben pouze nedostatečnou teplotou k průběhu kompletní transformace. Pro referenční teplotu $T_0 = 30^\circ\text{C}$ již dojde pouze k transformaci na martenzit vlivem napětí, ke zpětné transformaci na austenit již nedojde z důvodu nedostatečného ohřevu. Tučně zvýrazněná křivka odpovídá SME křivce na *Obr. 21*. Šipky znázorňují postupný průběh křivky, pro všechny křivky je směr průběhu stejný.



Obr. 24: Křivky závislosti poměrného prodloužení na teplotě pro různé hodnoty referenční teploty.

Obr. 25 znázorňuje, co se děje s transformační křivkou při změně zatížení. Tučně zvýrazněná křivka opět odpovídá SME křivce na Obr. 21. Pokud snižujeme zatížení dochází také k menším deformacím a při zahřátí dojde stále k plnému navrácení do původního tvaru, zachována je pouze malá deformace vzniklá před transformací. Při zvýšení zatížení úměrně vzroste i maximální deformace. Na křivce vzniklé při zatížení $F = 6400 \text{ N}$ lze vidět, že při zachování maximální teploty 40°C již nedojde k plnému navrácení do původního tvaru. Deformace se obnoví pouze částečně a zbytkové poměrné prodloužení dosahuje hodnoty přibližně 0,034, což při maximální hodnotě 0,052 znamená, že se zachová více jak polovina deformace. Tento problém lze snadno vyřešit ohřevem na vyšší teplotu (v tomto případě postačuje navýšení na 41°C - znázorněno tečkovanou křivkou). Díky tomuto navýšení se již deformace téměř vynuluje a zůstane opět pouze část vzniklá před transformací. Dále lze říct, že při síle 6400 N již dojde k využití téměř celého možného transformačního přetvoření $\varepsilon_L = 0,05$. Z tohoto důvodu již nemá smysl v tomto konkrétním případě sílu příliš zvětšovat, pokud chceme, aby došlo k téměř plnému zotavení tvaru. Směry průběhů křivek jsou stejné jako na Obr. 24.



Obr. 25: Křivky závislosti poměrného prodloužení na teplotě pro různé hodnoty zatěžující síly.

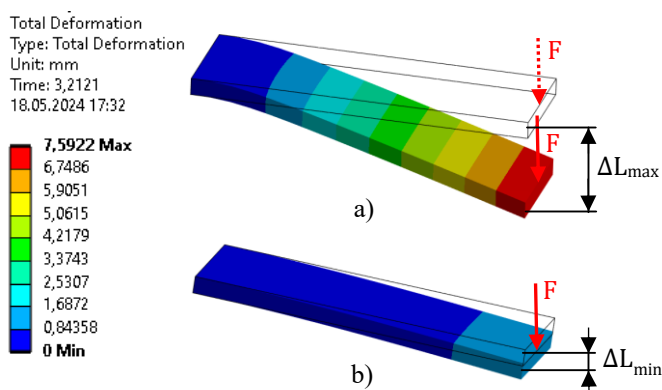
3.3. Tvorba modelu aktuátoru s paměťovým efektem

Tato kapitola se zabývá návrhem konkrétního aktuátoru. Nejdůležitější částí návrhu je volba správného tvaru aktuačního členu a poté jeho zakomponování do ucelené konstrukce. Všechny modely jsou realizovány pomocí Shape memory effect modelu (SME).

3.3.1. Volba tvaru aktuačního členu

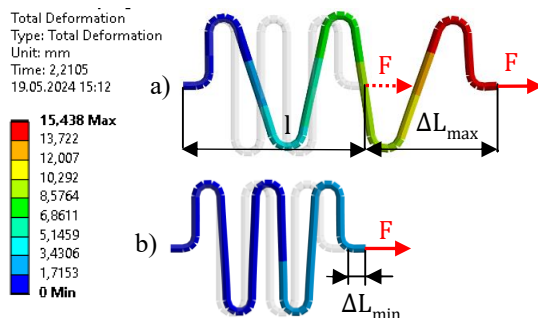
Jak je rozebráno v kapitole 2.2.1.1., jedněmi z nejčastějších forem aktuačních členů ze slitin s tvarovou pamětí (SMA) jsou dráty či pružiny, případně i různé plíšky. Každá z těchto forem může být vhodná pro jiný způsob akce. Vzhledem k tomu, že čistě rovný drát nevykazuje příliš velké aktuační možnosti, budeme se spíše zabývat pružinami či plíškami. Všechny testované materiály mají stejné materiálové konstanty jako v Tab. 2.

Na Obr. 26 je plíšek o rozměrech $30 \times 10 \times 1,5 \text{ mm}$, na levé straně je vetknutý a na pravé straně je zatížen silou 28 N . Na celé těleso je aplikována teplotní okrajová podmínka stejně jako je znázorněna na Obr. 20, pouze maximální teplota byla změněna na 45°C . Těleso bylo modelováno pomocí Shell prvků. Bylo dosaženo maximální deformace $\Delta L_{max} = 7,6 \text{ mm}$ ve svislém směru a zbytková deformace po transformaci byla $\Delta L_{min} = 1,2 \text{ mm}$. Na Obr. 26 je také obrys nedeformovaného tvaru. Takovýto jednoduchý aktuační člen by bylo možné použít např. na ovládání nějakého spínače, kdy plíšek je konstantně zatížen a při jeho ohřevu dojde k rozepnutí spínače.



Obr. 26: Aktuační člen z plíšku, a) deformovaný tvar, b) tvar po transformaci (navrácení deformace).

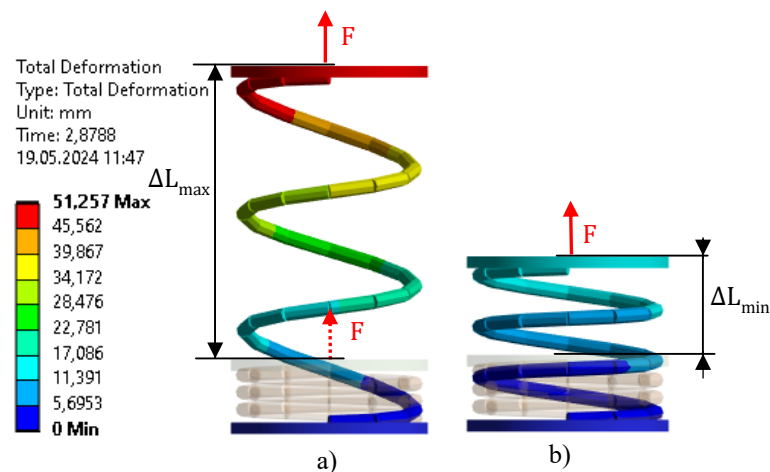
Dalším testovaným aktuačním členem je „2D“ pružina (Obr. 27). Tato pružina je vytvořena z drátu o průměru 1 mm a její délka je $l = 21 \text{ mm}$, na levé straně je vetknutá a na pravé straně je zatížena silou 4 N a je povolen posuv jen ve směru síly. Na celé těleso je aplikována teplotní okrajová podmínka stejná jako na Obr. 20. Pružina byla modelována pomocí Beam prvků.



Obr. 27: Aktuační „2D“ pružina, a) deformovaný tvar, b) tvar po transformaci (navrácení deformace).

Bylo dosaženo maximální deformace $\Delta L_{max} = 15,4 \text{ mm}$ v podélném směru a zbytková deformace po transformaci byla $\Delta L_{min} = 2,5 \text{ mm}$. Na Obr. 27 je také znázorněn obrys nedeformovaného tvaru. Tuto pružinu by bylo možné použít např. při realizaci tlačného či tažného pístového aktuátoru.

Posledním testovaným aktuačním členem byla klasická pružina (Obr. 28). Tato pružina je vytvořena z drátu o průměru $2,5 \text{ mm}$, její průměr je 30 mm a její výška v nedeformovaném tvaru je 9 mm . Pro správnou simulaci pohybu byly na každé straně namodelovány pomocné disky, se kterými byla pružina spojena napevno kontaktem typu Bonded. Na spodní disk je aplikována okrajová podmínka vetknutí a na horní disk podmínka zamezení rotace a je povolen posuv jen ve směru zatěžující síly. Horní disk je také zatížen tažnou silou 25 N . Na celé těleso je aplikována teplotní okrajová podmínka stejná jako na Obr. 20. Pružina byla modelována pomocí Beam prvků. Bylo dosaženo maximální deformace $\Delta L_{max} = 51,3 \text{ mm}$ v podélném směru a zbytková deformace po transformaci byla $\Delta L_{min} = 17,5 \text{ mm}$. Na Obr. 28 je také opět znázorněn obrys nedeformovaného tvaru. Tuto pružinu by bylo možné použít stejně jako „2D“ pružinu např. při realizaci tlačného či tažného pístového aktuátoru.



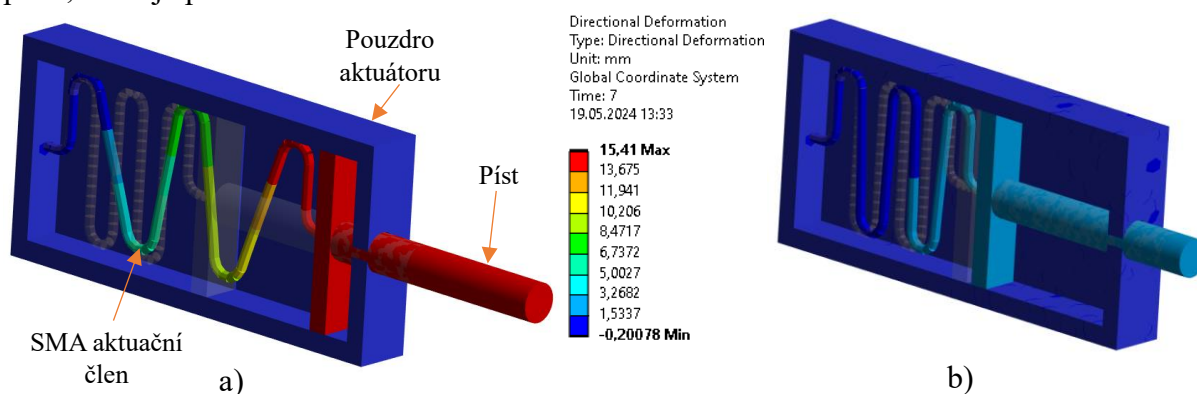
Obr. 28: Klasická aktuační pružina, a) deformovaný tvar, b) tvar po transformaci (navrácení deformace).

Z testovaných tvarů pro další testování volíme „2D“ pružinu (Obr. 27), protože se jeví jako nejvhodnější pro naše záměry. Případně by bylo možné využít i aktuační člen v podobě plíšku. U klasické pružiny docházelo k velkým problémům s konvergencí výpočtu (pravděpodobně způsobeno velkými deformacemi), a proto musela být modelována pomocí prvků Beam místo prvků Solid. Ani model z Beam prvků však nebyl bez problému s konvergencí. Z tohoto důvodu musela být síť (diskretizace tělesa) tak řídká, jako je vidět na Obr. 28.

3.3.2. Tvorba modelu aktuátoru

V této části se zabýváme tvorbou návrhu konkrétního typu aktuátoru. Vzhledem ke zvolenému tvaru aktuačního členu v kapitole 3.3.1. bude asi nejvhodnějším typem aktuátoru aktuátor translační. Translační pohyb realizujeme pomocí pístu, který může být jak tažný, tak tlačný. Konstrukce zvoleného aktuátoru sestává z pružiny, pístu a pouzdra aktuátoru.

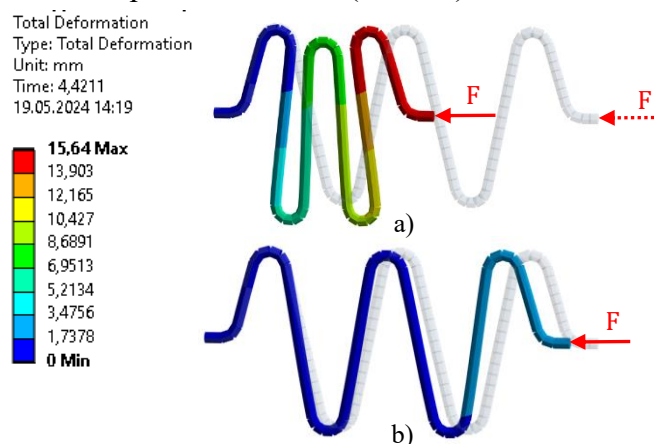
Na Obr. 29 lze vidět, jak by aktuátor popsáný v předchozím odstavci mohl ve zjednodušené podobě vypadat. Tento aktuátor pracuje v tažném režimu (silou je pružina natahována a SME vytváří tažnou sílu, díky které se píst aktuátoru zasune zpět). Světle šedou barvou je opět naznačen nedeformovaný tvar. Pružina použitá v tomto aktuátoru má stejné parametry jako ta na Obr. 27 a její teplotní i silové zatížení je také stejné, z toho vyplývá i maximální vysunutí pístu, které je přibližně 15 mm.



Obr. 29: Zjednodušený model pístového translačního aktuátoru, a) deformovaný tvar, b) tvar po transformaci (navrácení deformace).

Pouzdro aktuátoru má vnější rozměry $45 \times 22 \times 8 \text{ mm}$ a tloušťku stěny 2 mm. Píst má průměr 4 mm a délku 25 mm. Délka pružiny je 21 mm a její průměr 1 mm. Poloměry ohnutí jsou 3 mm, délka jednoho závitů je stejná jako poloměr ohnutí a výška závitů od osy je 8 mm.

Tento aktuátor by také mohl při jiném počátečním tvaru SMA pružiny fungovat jako tlačný. Pružina by byla silou nejprve stlačena a poté by SME efekt při zvýšení teploty vytvořil tlačnou sílu, která by navrátila pružinu do původního tvaru (Obr. 30).



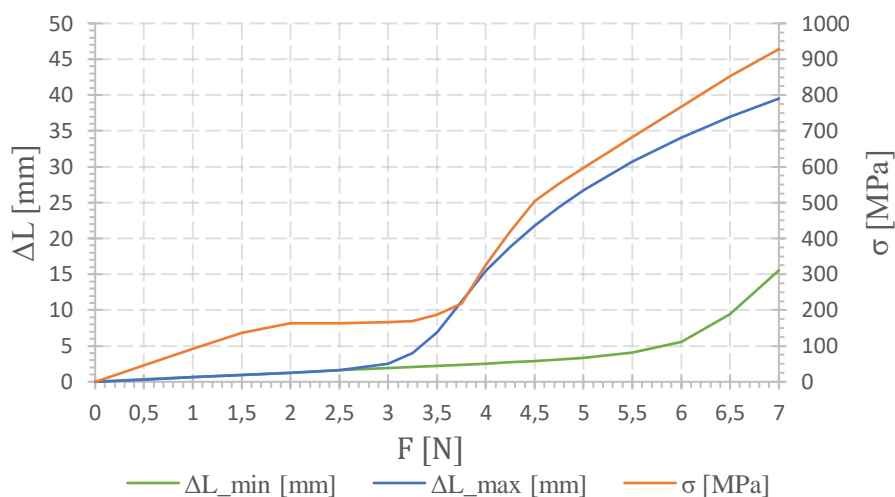
Obr. 30: Aktuační člen při stlačování, a) deformovaný tvar, b) tvar po transformaci (navrácení deformace).

3.4. Analýza aktuačního (silového) potenciálu zvoleného aktuátoru

V této kapitole otestujeme typ aktuátoru navržený v kapitole 3.3.2. na Obr. 29. Provedeme testy aktuačního potenciálu při různých zatíženích a při různých rozměrech aktuačního členu. Také otestujeme vliv modelu materiálu. Všechny testy budeme provádět pouze s modelem aktuačního členu místo modelu celého aktuátoru z důvodu urychlení výpočtů. Tuto záměnu můžeme provést, protože veškerá deformace a síly se převádí na píst napřímo.

3.4.1. Aktuační potenciál při různých zatíženích

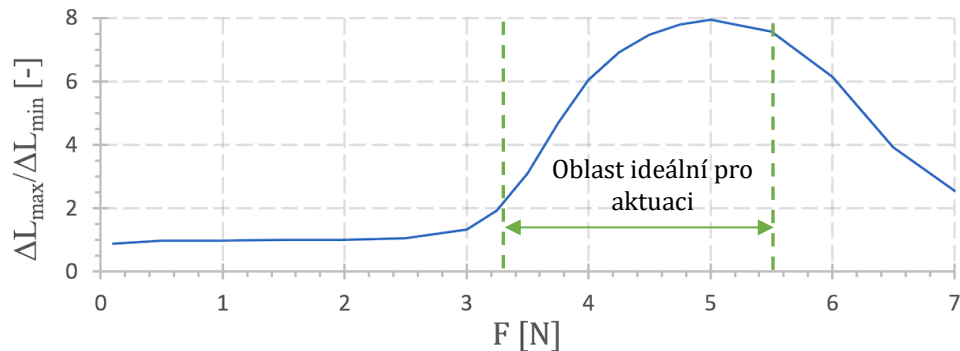
Na Obr. 31 lze vidět, jak se mění deformace a napětí v závislosti na zatěžující síle. Testování probíhalo na stejné pružině, jaká je použita v aktuátoru na Obr. 29, za stejných okrajových podmínek, pouze se měnila velikost tažné síly. ΔL_{max} označuje maximální prodloužení ve směru síly, které bylo dosaženo danou silou. ΔL_{min} označuje zbytkovou deformaci po ohřevu a návratu do původního tvaru. Vzhledem k tomu, že při testování vznikaly deformace větší než dovoluje navržené pouzdro aktuátoru, bylo by nutné jej prodloužit (společně s pístem) pokud bychom chtěli provozovat navržený aktuátor při větších silách.



Obr. 31: Závislost deformace a napětí na tažné síle.

Pro rozmezí síly $F = 0 - 2 \text{ N}$ dochází k pomalému nárůstu napětí z nuly až na 160 MPa a velmi pomalému nárůstu deformace. Tento pomalý nárůst je způsoben nedostatečným napětím pro transformaci z martenzitu na austenit. V této oblasti tudíž mají ΔL_{max} a ΔL_{min} stejné hodnoty. V rozmezí síly $F = 2 - 3,25 \text{ N}$ je napětí konstantní $\sigma = 160 \text{ MPa}$ a deformace stále narůstá stejným tempem jako předtím až do hodnoty $F = 2,75 \text{ N}$, kdy začne narůstat rychleji a dochází ke vzniku zvětšujícího se rozdílu mezi ΔL_{max} a ΔL_{min} . Tzn. od této hodnoty síly začne docházet k obnově tvaru vlivem teploty, a tedy k transformaci z martenzitu na austenit a zpět. V oblasti $F = 3,25 - 5,5 \text{ N}$ dochází k výrazně rychlejšímu nárůstu hodnot ΔL_{max} v porovnání s ΔL_{min} a tato oblast je tak nejvhodnější pro realizaci aktuace a provoz aktuátoru. V této oblasti však také dochází k relativně rychlému nárůstu napětí z hodnoty $\sigma = 160 \text{ MPa}$ na hodnotu $\sigma = 680 \text{ MPa}$. V oblasti $F = 5,5 - 7 \text{ N}$ již začne docházet k prudkému nárůstu hodnot ΔL_{min} a ohřevem již nejsme schopni dobře obnovit původní tvar. Z tohoto důvodu již tato oblast není úplně vhodná pro aktuaci. Hodnoty napětí nadále stoupají až do hodnoty $\sigma = 930 \text{ MPa}$ při síle 7 N . Při takovémto napětí by již pravděpodobně došlo k porušení materiálu (mez pevnosti v tahu bývá $900 - 1100 \text{ MPa}$), a proto není vhodné sílu nadále zvyšovat.

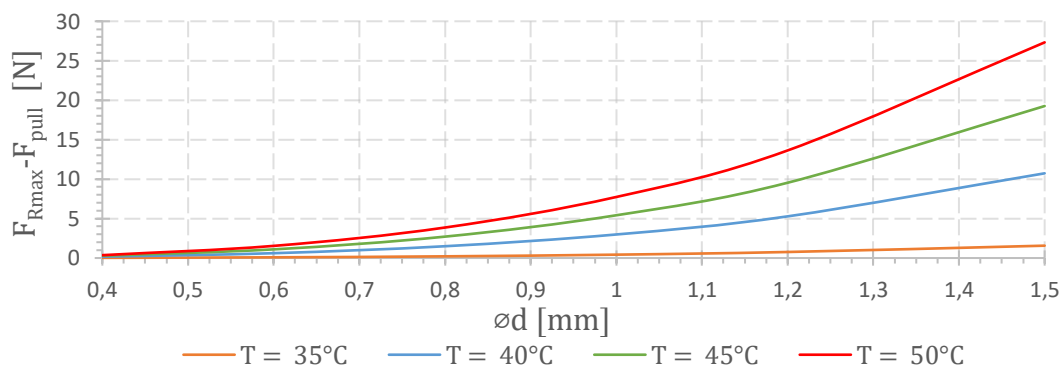
Na Obr. 32 lze vidět závislost poměru maximálního a minimálního prodloužení na tažné síle. Z tohoto grafu lze lehce vyčíst ideální oblast pro dosažení maximálního protažení při zachování schopnosti navrátit se do původního tvaru. V oblasti mezi 3 – 5 N dochází k postupnému růstu poměru hodnot deformace a z tohoto důvodu je tato oblast vhodná pro aktuaci. V rozmezí 5 – 7 N hodnota poměru deformací opět klesá a s ní i vhodnost pro aktuaci. V této oblasti již pružina přestává být schopná obnovy tvaru.



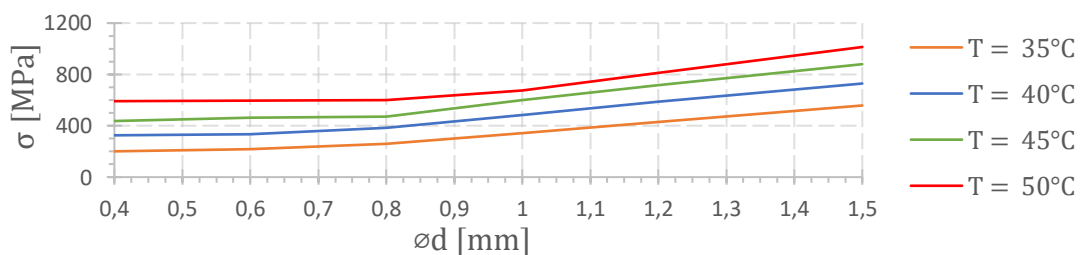
Obr. 32: Závislost poměru maximálního a zbytkového prodloužení na síle.

3.4.2. Aktuální potenciál pro různé rozměry aktuálního členu

Křivky na Obr. 33 byly určeny pomocí reakční síly vypočtené z okrajové podmínky displacement, kdy aktuální pružina byla natažena o 15 mm. F_{pull} odpovídá síle potřebné k natažení pružiny o 15 mm a F_{Rmax} odpovídá reakční síle vzniklé při ohřevu pružiny na maximální teplotu. Hodnoty těchto teplot jsou uvedeny v legendě grafu. V grafu je vykreslena závislost přídavné reakční síly vzniklé ohřevem na průměru drátu pružiny, každá křivka ukazuje hodnoty pro jinou maximální teplotu zatěžujícího cyklu (stejný jako na Obr. 20). Přídavná reakční síla ($F_{Rmax} - F_{pull}$) roste kvadraticky s průměrem pružiny a lineárně se zvyšující se teplotou. Hodnoty napětí také rostou se zvětšujícím se průměrem i teplotou (Obr. 34). Pro větší průměry již dochází ke vzniku velkých napětí, a proto je vhodné dráty s větším průměrem méně deformovat anebo je méně ohřívat, případně využít kombinace menšího ohřevu a deformace.

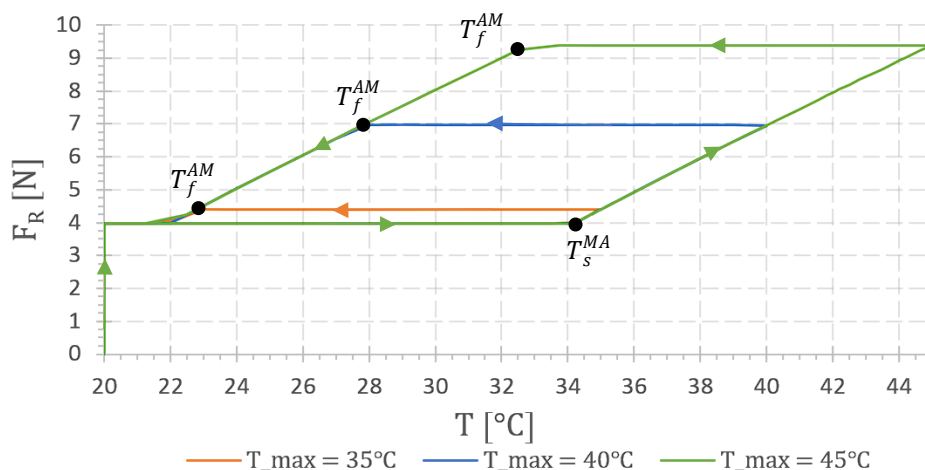


Obr. 33: Závislost přídavné reakční síly na průměru drátu pružiny a na teplotě.



Obr. 34: Závislost maximálního napětí na průměru drátu pružiny a na teplotě.

Pokud se blíže podíváme na průběh reakční síly F_R v místě okrajové podmínky displacement při různých teplotách získáme křivky znázorněné na Obr. 35. Poté, co pružinu natáhneme a začneme ji ohřívat reakční síla začíná růst, jakmile dosáhneme teploty počátku přeměny na austenit T_s^{MA} . Reakční síla poté roste až do maximální teploty ohřevu. Pokud začneme pružinu ochlazovat je reakční síla konstantní až do teploty konce transformace na martenzitu T_f^{AM} , kdy začne klesat zpět na hodnotu před ohřevem. Hodnota teploty transformace na martenzitu je různá podle toho, jaké je v daný okamžik v pružině napětí.

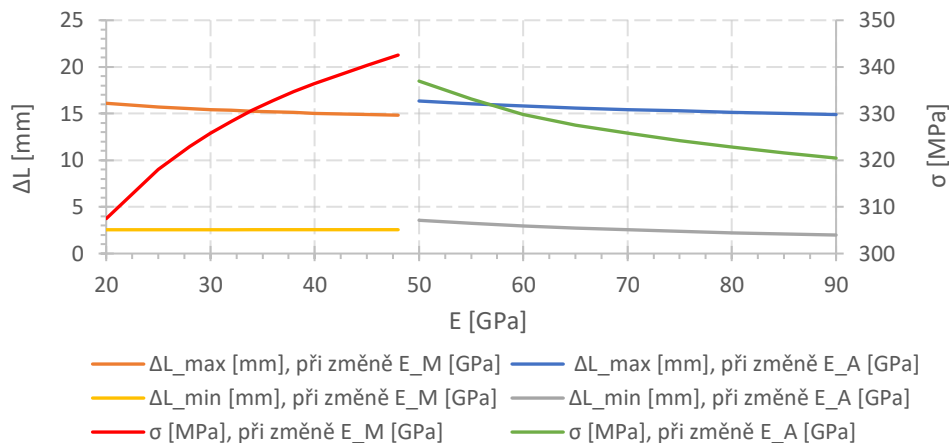


Obr. 35: Závislost reakční síly na teplotě při různých maximálních teplotách.

3.4.3. Vliv modelu materiálu

V této části otestujeme vliv různých materiálových parametrů na aktuální potenciál. Byl testován vliv změny modulu pružnosti austenitu E_A a martenzitu E_M . Také byl testován vliv parametru teplotní závislosti β , elastického limitu R a parametru vytvrzení h . Testování opět bylo provedeno se stejnou pružinou jako je v aktuátoru na Obr. 29.

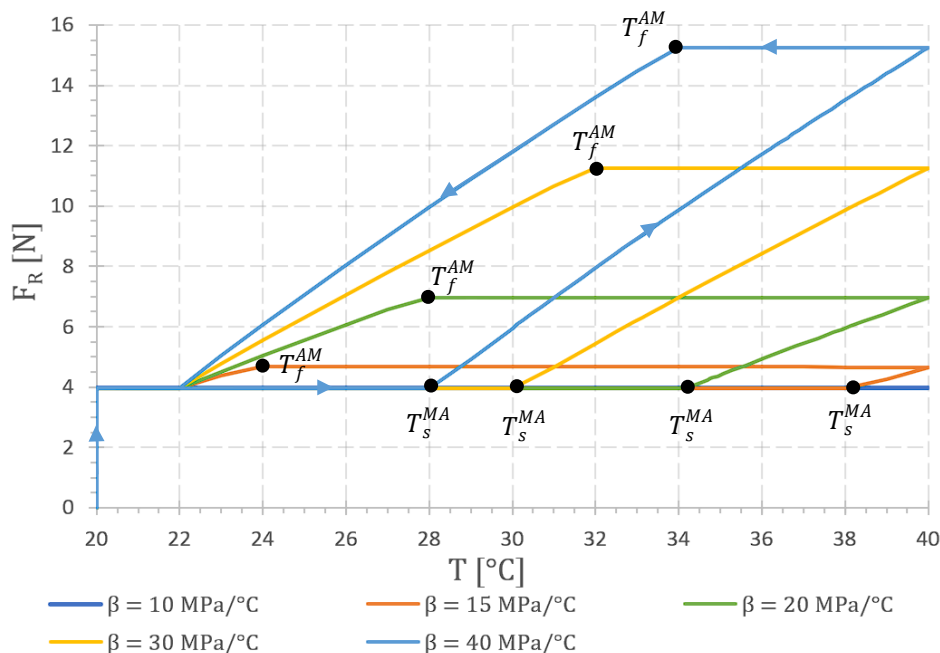
Na Obr. 36 lze vidět závislost maximální hodnoty prodloužení ΔL_{max} , hodnoty prodloužení po ohřevu a navrácení do původního tvaru ΔL_{min} a napětí σ na modulu pružnosti austenitu E_A a martenzitu E_M . Testování bylo provedeno v rozsahu 20 – 40 GPa pro modul pružnosti martenzitu (levá část grafu) a v rozsahu 50 – 90 GPa pro modul pružnosti austenitu (pravá část grafu). Pružina byla zatížena silou 4 N a maximální teplota zatěžujícího cyklu byla 40 °C. Hodnota E_M při změně E_A byla použita 30 GPa a hodnota E_A při změně E_M byla použita 70 GPa. Při navyšování hodnoty E_A docházelo k mírnému poklesu maximální deformace a zbytkové deformace. Také docházelo k poklesu maximálního napětí a to z hodnoty 337 MPa na 320 MPa. Při navyšování hodnoty E_M také docházelo k mírnému poklesu maximální deformace, ale hodnota zbytkové deformace zůstávala konstantní. Hodnota maximálního napětí se zvyšováním E_M naopak oproti E_A výrazně rostla a to z hodnoty 307 MPa na 343 MPa. Z těchto závislostí lze vyvodit, že pokud chceme dosahovat co největších prodloužení při relativně nízkých napětích potřebujeme materiál s nízkým modulem pružnosti martenzitu. Určení optimálního modulu pružnosti pro austenit již není tak jednoznačné protože jak napětí tak maximální prodloužení při zvětšování modulu klesají. Pokud chceme maximalizovat prodloužení volíme materiál s nižším E_A a pokud chceme minimalizovat napětí volíme materiál s vyšším E_A . Vliv modulů pružnosti na maximální deformaci však není nijak zásadně výrazný.



Obr. 36: Závislost prodloužení a napětí na modulech pružnosti martenzitu a austenitu.

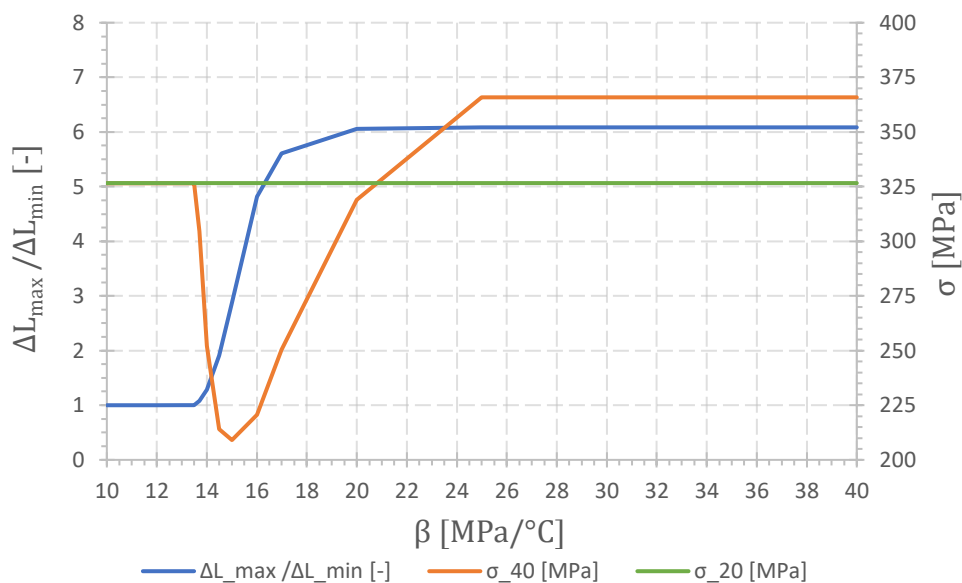
Vliv parametru teplotní závislosti β je vykreslen na Obr. 37. Reakční síla F_R byla opět vypočtena z okrajové podmínky displacement, kdy pružina byla natažena o 15 mm. Maximální teplota zatěžujícího cyklu byla 40°C. Ostatní parametry modelu byly ponechány bez změny. Šipky na obrázku znázorňují průběh reakční síly v pružině v závislosti na teplotě. Směr průběhu síly je stejný pro všechny křivky.

Při zvětšování parametru β dochází ke vzniku větší reakční síly. Síla vždy začne narůstat při teplotě počátku transformace na austenit T_s^{MA} . Tato teplota se však vlivem parametru β mění a to tak, že při snižování β hodnota transformační teploty roste. Z tohoto důvodu např. pro $\beta = 10 \text{ MPa} \cdot \text{°C}^{-1}$ nedojde k transformaci. Pro její začátek by byl nutný ohřev na vyšší teplotu. Reakční síla poté dále narůstá až do maximální teploty ohřevu. Pokud začneme pružinu ochlazovat, reakční síla zachovává konstantní hodnotu až do teploty konce přeměny zpět na martenzit T_f^{AM} . Hodnota této teploty je závislá na napětí a parametru β .



Obr. 37: Závislost reakční síly na teplotě pro různé hodnoty parametru teplotní závislosti.

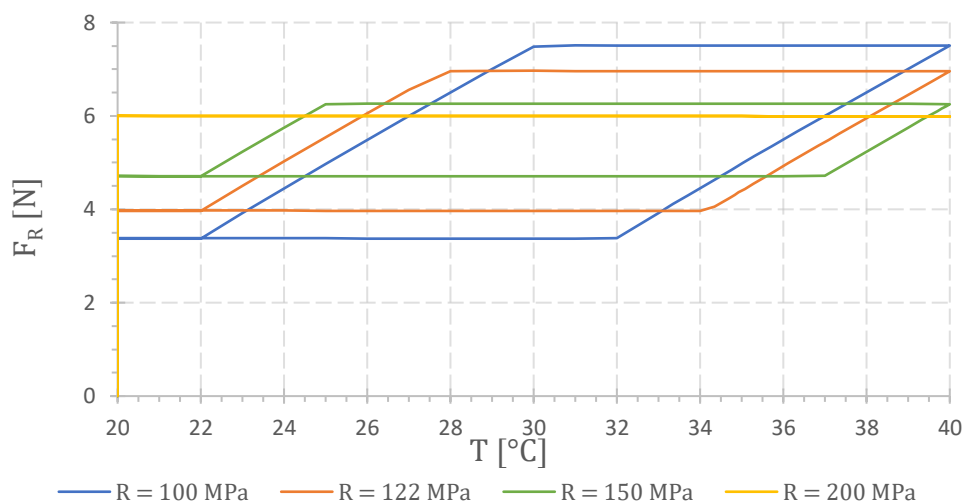
Pokud testujeme vliv parametru β na deformaci při zatížení dojdeme k závislostem na Obr. 38. Při těchto testech byla pružina natahována silou 4 N a maximální teplota byla 40 °C. V grafu je vynesena závislost poměru maximálního prodloužení ΔL_{max} a zbytkového prodloužení ΔL_{min} na parametru β . Lze vidět, že pokud má tento parametr příliš nízkou hodnotu ($10 - 13,5 \text{ MPa} \cdot \text{°C}^{-1}$) vůbec nedojde k obnově tvaru. V oblasti $\beta = 13,5 - 20 \text{ MPa} \cdot \text{°C}^{-1}$ dochází k nárůstu schopnosti obnovy tvaru a pro vyšší hodnoty β již dochází k maximální možné obnově tvaru. Křivka σ_{20} odpovídá napětí po natažení na maximální délku při teplotě 20°C a při změně parametru β nedochází ke změně hodnoty napětí σ_{20} . Křivka σ_{40} odpovídá napětí po obnově tvaru pružiny. Při nízkých hodnotách parametru β je napětí σ_{40} totožné s napětím σ_{20} . V oblasti $\beta = 13,5 - 25 \text{ MPa} \cdot \text{°C}^{-1}$ dochází nejprve k poklesu hodnoty napětí a od $\beta = 15 \text{ MPa} \cdot \text{°C}^{-1}$ dochází k nárůstu napětí až na maximální hodnotu 365 MPa pro $\beta = 25 \text{ MPa} \cdot \text{°C}^{-1}$. Při dalším zvyšování parametru β je již hodnota napětí σ_{40} konstantní.



Obr. 38: Závislost poměru maximálního a zbytkového prodloužení a napětí na parametru teplotní závislosti.

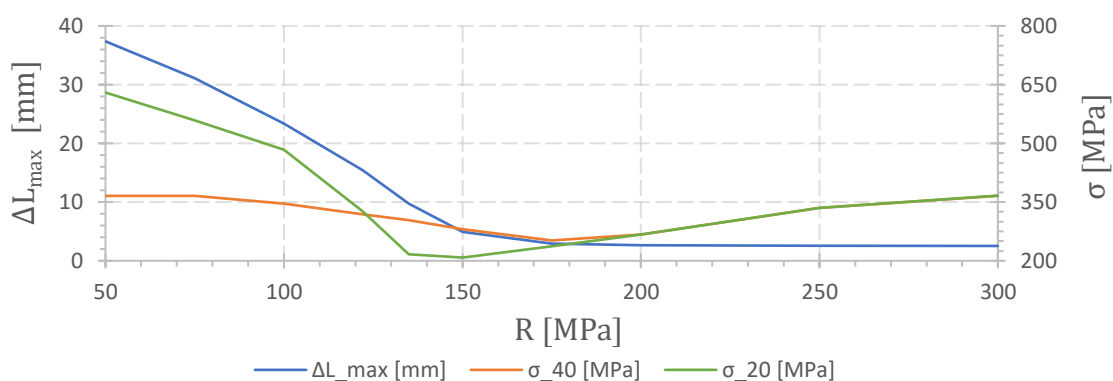
Vliv parametru elastického limitu R je vykreslen na *Obr. 39*. Reakční síla F_R byla opět vypočtena z okrajové podmínky displacement, kdy pružina byla natažena o 15 mm . Maximální teplota zatěžujícího cyklu byla opět 40°C . Ostatní parametry modelu byly ponechány bez změny. Směr průběhu reakční síly v pružině v závislosti na teplotě je stejný jako u křivek na *Obr. 37*.

Při navyšování hodnoty elastického limitu R dochází k nárůstu síly potřebné k natažení pružiny o 15 mm , další nárůst síly způsobený ohřevem se však při navyšování elastického limitu snižuje. Pro hodnotu $R = 200\text{ MPa}$ se již síla vlivem teploty nezmění, jejího navýšení lze dosáhnout pouze dalším ohřevem.



Obr. 39: Závislost reakční síly na teplotě pro různé hodnoty elastického limitu.

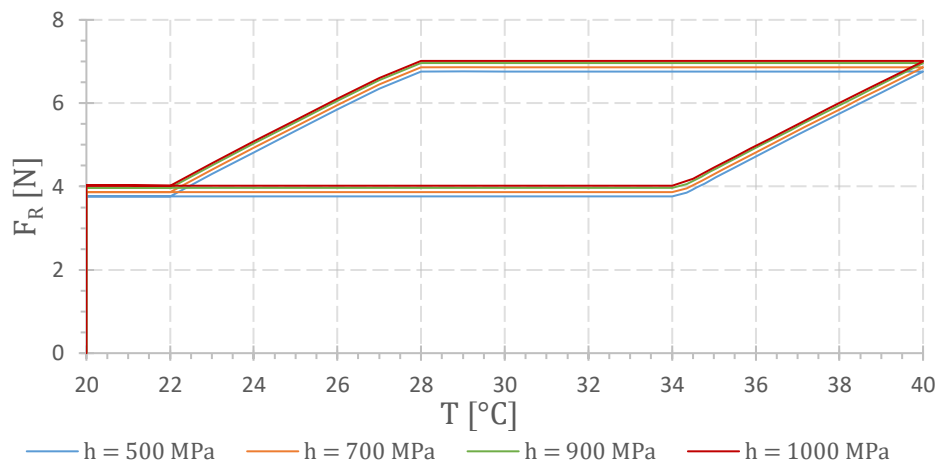
Při testování vlivu elastického limitu na maximální prodloužení jsme došli k závislostem na *Obr. 40*. V grafu je vynesena závislost maximálního prodloužení ΔL_{max} na elastickém limitu R , kdy při navyšování hodnoty R dochází nejprve k poklesu maximálního prodloužení až do hodnoty $R = 200\text{ MPa}$ a poté dojde k ustálení hodnoty ΔL_{max} . Křivky napětí σ_{20} a σ_{40} mají stejný význam jako na *Obr. 38*. Hodnota σ_{20} nejprve prudce klesá až do hodnoty $R = 150\text{ MPa}$, kde má své minimum. Při dalším navyšování parametru R již dochází k pozvolnému růstu tohoto napětí. Napětí σ_{40} také nejprve klesá, ale zhruba z poloviční hodnoty vůči σ_{20} . Jakmile dosáhne hodnoty $R = 175\text{ MPa}$ hodnota napětí začne narůstat a od $R = 200\text{ MPa}$ je jeho průběh totožný se σ_{20} . Pro všechny hodnoty R byla pružina schopná navrácení do původního tvaru.



Obr. 40: Závislost maximálního prodloužení a napětí na elastickém limitu.

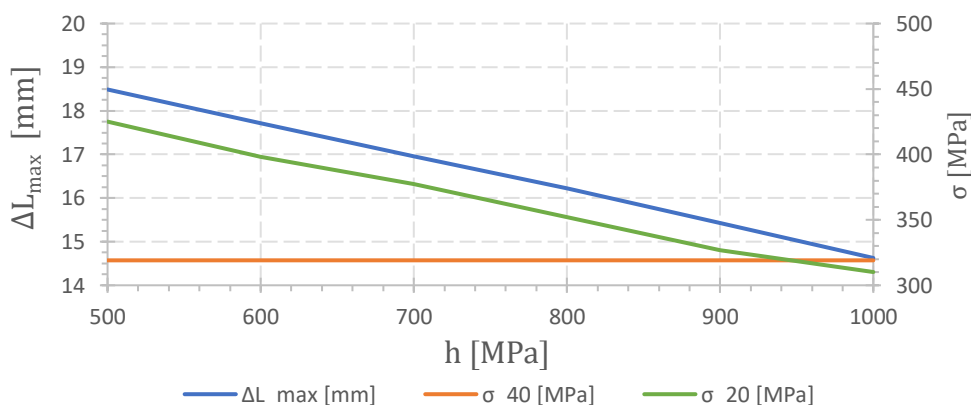
Posledním testovaným parametrem je parametr vytvrzení h . Výsledky testu jsou vykresleny na Obr. 41. Reakční síla F_R byla opět vypočtena z okrajové podmínky displacement, kdy pružina byla natažena o 15 mm. Maximální teplota zatěžujícího cyklu byla znovu 40°C. Ostatní parametry modelu byly ponechány bez změny. Směr průběhu reakční síly v pružině v závislosti na teplotě je jako u předchozího parametru stejný jako u křivek na Obr. 37.

Změna parametru vytvrzení h nezpůsobila žádné výrazné změny, celá křivka závislosti reakční síly na teplotě se při změně h o 500 MPa pouze lehce posunula směrem nahoru.



Obr. 41: Závislost reakční síly na teplotě pro různé hodnoty parametru vytvrzení.

Také byl otestován vliv parametru h na maximální prodloužení ΔL_{max} (Obr. 42). Při navyšování hodnoty tohoto parametru lineárně klesalo jak maximální prodloužení, tak napětí σ_{20} , napětí σ_{40} se vlivem změny h nijak neměnilo. Pro všechny hodnoty parametru h byla pružina schopná návratu do původního tvaru.



Obr. 42: Závislost maximálního prodloužení a napětí na parametru vytvrzení.

Lze říct, že ze všech testovaných parametrů modelu materiálu má na chování aktuátoru největší vliv parametr teplotní závislosti β , který výrazně měnil jak chování reakční síly, tak schopnost obnovy tvaru. Nejmenší vliv na chování aktuátoru měla změna modulu pružnosti austenitu E_A a martenzitu E_M . Velmi malý vliv měl i parametr vytvrzení h .

4. Diskuse

4.1. Doporučení pro modelování aktuátorů využívajících efekt tvarové paměti

Pro realizaci aktuátorů využívajících efekt tvarové paměti je velmi důležitá schopnost správně modelovat jejich chování pro zjednodušení a urychlení návrhu těchto aktuátorů. Základem modelování je volba správného numerického modelu pro danou situaci. Pokud nechceme vytvářet numerický model zcela od počátku jsou k dispozici dva základní v SW Ansys, a to model Superelasticity (SE) a Shape Memory Effect (SME). Porovnání těchto modelů je provedeno v kapitole 3.1.2., kdy pro modelování aktuátorů se jeví jako vhodnější model SME.

Aby bylo možné model správně definovat musíme získat jeho materiálové konstanty. Základem je získání parametrů z Tab. 2. Pro hrubý návrh lze tyto parametry získat z informací dostupných na internetu (jak bylo učiněno v této práci), tyto hodnoty jsou však většinou udávány ve velkých rozmezích, a ne vždy je řečeno pro jaké konkrétní složení materiálu jsou platné. Jde-li však v modelování o co nejlepší shodu s reálným materiálem, jedinou spolehlivou cestou, jak tyto parametry získat je experimentálně pomocí tahové zkoušky na zkušební vzorku z konkrétního materiálu. V takovém případě by bylo snadné ověřit i správnost modelu. Z hodnot získaných z tahové zkoušky provedeme úpravu pro daný model dle kapitoly 3.1.1., nebo dle kapitoly 3.1.2. pro SE model.

Jakmile máme vytvořený model materiálu můžeme začít s modelováním aktuačního členu. Pokud je cílem použít SE model, jsme omezeni v SW Ansys pouze na prvky typu Solid. To znamená, že i pro jednoduché konstrukce může být výpočet časově velmi náročný. Díky jednoduchosti tohoto modelu (hodnoty transformačních napětí nejsou ovlivněny teplotou) však nedochází k problémům s konvergencí výpočtu. Při využití modelu SME již můžeme v SW Ansys použít jak Solid prvky, tak i Shell nebo Beam prvky. Tento model je tak velmi vhodný pro modelování jednodušších konstrukcí z plíšků a drátů (případně pružin). U prvků typu Beam je rychlost výpočtu dobrá a nedochází k častým problémům s konvergencí. Pokud však modelujeme aktuační člen pomocí Shell případně Solid prvků, není téměř možné realizovat výpočet deformace a následného obnovení tvaru v rozumném výpočetním čase při základním nastavení simulace. Časté jsou i problémy s konvergencí.

Problémy s konvergencí výpočtu jsou s největší pravděpodobností způsobeny velkou nelinearitou výpočtu a velkou změnou deformace za velmi krátký čas. Tento problém s konvergencí výpočtu lze omezit změnou nastavení analýzy. V Analysis Settings v prostředí Ansys Mechanical v části Nonlinear Controls přenastavíme možnost Newton-Raphson Option z Program Controlled na Unsymmetric. Newton-Raphsonova metoda je iterativního charakteru a slouží k řešení soustav nelineárních rovnic [15].



Obr. 43: Nastavení Nonlinear Controls.

Při modelování paměťového efektu pomocí SME modelu je také důležité správně nastavit teplotní a silové zatížení aktuálního členu (je nutné, aby byl aktuální člen stále zatížen, protože SME modelem lze modelovat pouze jednosměrný paměťový efekt). Silové zatížení musí vyvolat dostatečné napětí pro transformaci z austenitu na martenzit. Nesmíme však zatížit příliš velkou silou, protože by nebyl schopný vlivem ohřevu obnovit tvar. Teplotní zatížení musí být nejprve nižší než hodnota referenční teploty T_0 (Tab. 2) (tato teplota je zároveň teplotou rovnováhy obou strukturních fází). Pokud chceme, aby se aktuální člen po deformaci vrátil do původního tvaru musíme jej dostatečně zahřát na teplotu o několik stupňů vyšší než T_0 , aby při napětí způsobeném deformací mohlo dojít k transformaci zpět na austenit. Pokud chceme provádět opakované natahování a vrácení tvaru musíme aktuální člen opakovaně ohřívat a ochlazovat při konstantním zatížení.

4.2. Zhodnocení možnosti využití zvoleného modelu aktuátoru v praxi

V této práci byly testovány tři základní tvary aktuálního členu: plíšek, „2D“ pružina a klasická pružina, lze však modelovat a využívat i mnohem složitější tvary a formy aktuálních členu jako například kompozitní materiály nebo struktury podobné textilu (kapitola 2.2.1.). Tato práce se zabývá především modelováním teplotně aktuovaných slitin s tvarovou pamětí (TSMA), lze však využít i materiály aktuované působením magnetického pole (kapitola 2.2.4.) případně i polymerní materiály (kapitola 2.1.1.3.).

Jako aktuální člen k podrobnějšímu testování byla zvolena „2D“ pružina (Obr. 27). Tato pružina byla využita k vytvoření zjednodušené konstrukce aktuátoru, která se skládá z pružiny, pístu a pouzdra aktuátoru. Pružina je napojena na píst, aby bylo možné lépe zajistit plynulou translaci bez většího vychylování v radiálním směru. Díky způsobu uchycení pístu v pouzdře je také omezen vliv radiálních sil na aktuální člen a síly tak nezpůsobují nežádoucí deformace. Pouzdro také slouží k ochraně pružiny před vnějšími vlivy (především nechtěným zatížením, které není přenášeno přes píst). Aby aktuátor mohl fungovat, musíme zajistit možnost ohřevu a ochlazování aktuálního členu. Ohřevu lze dosáhnout např. odporovým ohřevem způsobeným průtokem elektrického proudu. Ochlazení by poté bylo možné provést např. pomocí chladicího média. Aktuaci by také bylo možno provádět průtokem kapaliny, která mění svou teplotu a tím způsobuje aktuaci. Přívod kapaliny by mohl být realizován např. z potrubí, ve kterém slouží daný aktuátor k ovládání průtokového ventilu. V takovém případě by se aktuátor do jisté míry choval i jako senzor, kdy při určité teplotě kapaliny by došlo ke změně stavu ventilu a pokud by teplota klesla pod tuto hodnotu, tak by se ventil navrátil do původní polohy. Jednou z nevýhod této konstrukce je nutnost působení konstantní axiální síly na píst, aby se aktivoval efekt tvarové paměti (SME) a došlo k aktuaci.

Nejvýraznějším omezením modelovaného aktuátoru je, že umožňuje pouze jednosměrnou aktuaci, tj. reaguje na deformující sílu tak, že po ohřevu aktuálního členu kompenzuje její vliv. Pokud bychom potřebovali aktuátor schopný obousměrné aktuace, museli bychom vytvořit model materiálu, který umožňuje zapamatovat si dva různé stálé tvary, mezi kterými by přecházel vlivem změny teploty (jeden tvar při nízké teplotě a druhý při vysoké). Tuto nevýhodu lze odstranit použitím dvou proti sobě působících aktuálních elementů (Obr. 7) a tím získáme obousměrný aktuátor (na oba elementy působíme silou a střídavě je ohříváme dle žádaného směru aktuace). Toto uspořádání je i výhodnější z pohledu dosažitelných sil.

5. Závěr

V kapitole 3.1. je podrobně zdokumentován postup vytvoření funkčního Shape Memory Effect (SME) modelu. Základem pro jeho vytvoření jsou konstanty vypsány v *Tab. 2*. Z těchto hodnot poté pomocí rovnic (3.4)-(3.7) získáme parametry teplotní závislosti β , elastického limitu R a vytvrzení h . Dále je v této kapitole provedeno porovnání s druhým modelem (Superelasticity – SE) dostupným v SW Ansys. Vzhledem k tomu, že hodnoty transformačních napětí modelu SE jsou definovány konstantně a hodnoty těchto napětí pro model SME jsou na teplotě závislé je vhodnější pro modelování aktuátoru použít SME model.

Kapitola 3.2. se zabývá testováním vytvořeného SME modelu. Je testován vliv změny Lodeho parametru m (*Obr. 22*) a teploty (*Obr. 23*) na křivku závislosti napětí na přetvoření. Lodeho parametr závislosti ovlivňuje chování materiálu v tahu a tlaku a může nabývat pouze kladných hodnot. Pokud je roven nule, křivka závislosti napětí na přetvoření je symetrická dle svého počátku i dle napětí vznikajících v tahu a tlaku. Při navyšování tohoto parametru dochází k posunu a roztažení celé křivky do záporných hodnot napětí až do hodnoty $m = 3$, kdy tlaková a tahová část křivky nemají společný začátek. Vlivem změny teploty pouze docházelo při jejím navyšování k růstu napětí v materiálu. Dále byl testován vliv změny referenční teploty T_0 (*Obr. 24*) (při této teplotě jsou fáze martenzit a austenit v rovnováze) a různých zatížení (*Obr. 25*) na křivku závislosti přetvoření na teplotě. Při zvětšování referenční teploty docházelo i k nárůstu transformačních teplot (3.14)-(3.17). Při nárůstu zatížení docházelo také k nárůstu přetvoření, ale aby došlo k plnému obnovení tvaru bylo nutné materiál více ohřát. Vzhledem k tomu, že maximální transformační přetvoření bylo zvoleno $\varepsilon_L = 0,05$ tak není žádoucí dále navyšovat sílu po dosažení této hodnoty, protože materiál již nebude schopen obnovy deformace.

Tvorba modelu aktuátoru je popsána v kapitole 3.3. Byly otestovány tři základní tvary aktuačního členu a to plíšek (*Obr. 26*), „2D“ pružina (*Obr. 27*) a klasická pružina (*Obr. 28*). Pro návrh aktuátoru byl zvolen druhý zmíněný z těchto členů, uvažovaná konstrukce aktuátoru je vyobrazena na *Obr. 29*. Tento aktuátor je schopen pracovat jak v tažném (aktuační člen je silou natahován) tak tlačném režimu (aktuační člen je silou stlačován).

Další kapitola (3.4.) se zabývá testováním aktuačního (silového) potenciálu zvoleného modelu aktuátoru. Testován je vliv různých zatížení, rozměrů a materiálových parametrů. Při testování různých zatížení bylo zjištěno, že ideální rozpětí sil pro zvolený aktuátor je 3,25 – 5,5 N (*Obr. 32*). Při testování různých průměrů aktuační pružiny bylo zjištěno, že aktuační síla závisí na průměru kvadraticky, tj. bude lineárně růst s průřezem aktuátoru. Při navyšování průměru však roste i napětí v materiálu. Velký vliv na aktuační sílu i napětí má i teplota, kdy hodnoty napětí i síly se zvyšující se teplotou rostou. Testování vlivu materiálu bylo provedeno změnou vybraných materiálových konstant. Největší vliv na aktuační sílu měl parametr teplotní závislosti β . Následkem navyšování tohoto parametru bylo snížení teploty počátku transformace z martenzitu na austenit a následkem této změny docházelo i k dřívějšímu (při nižší teplotě) nárůstu aktuační síly (*Obr. 37*). Parametr β měl také výrazný vliv na schopnost aktuátoru vrátit se do původní polohy (aktuátor při nízkých hodnotách β nebyl schopen téměř žádné obnovy deformace). Navyšování elastického limitu R mělo za následek nárůst aktuační síly, ale tento nárůst byl provázen nutností většího ohřevu pro plné využití transformační smyčky. Ostatní testované parametry neměli na chování aktuátoru výrazný vliv.

Poslední kapitola (4.) shrnuje obecný postup při definování modelu materiálu s tvarovou pamětí v SW Ansys, jak dosáhnout lepší konvergence výpočtu a správné nastavení výpočtové analýzy. Také je zde rozebráno možné využití a způsob realizace modelovaného aktuátoru.

Na tuto bakalářskou práci by bylo možné v budoucnosti navázat modelováním materiálu s paměťovým efektem s jiným způsobem ovládání než teplotou (např. magnetickým polem). Také by bylo možné navázat reálnou výrobou zvoleného aktuátoru a porovnáním získaných teoretických závislostí s reálným měřením.

Zdroje

- [1] I. Abavisani, O. Rezaifar, a A. Kheyroddin, „Multifunctional properties of shape memory materials in civil engineering applications: A state-of-the-art review", *Journal of Building Engineering*, roč. 44. Elsevier Ltd, 1. prosinec 2021. doi: 10.1016/j.jobbe.2021.102657.
- [2] M. S. Kim *et al.*, „Shape Memory Alloy (SMA) Actuators: The Role of Material, Form, and Scaling Effects", *Advanced Materials*, roč. 35, č. 33. John Wiley and Sons Inc, 17. srpen 2023. doi: 10.1002/adma.202208517.
- [3] „4.15. Shape Memory Alloy (SMA)". Viděno: 22. květen 2024. [Online]. Dostupné z: https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v241/en/ans_mat/smas.html?q=SME
- [4] W. M. Huang, Z. Ding, C. C. Wang, J. Wei, Y. Zhao, a H. Purnawali, „Shape memory materials", *Materials Today*, roč. 13, č. 7–8, s. 54–61, 2010, doi: 10.1016/S1369-7021(10)70128-0.
- [5] T. Banerjee, M. Enayati, J. M. Keller, M. Skubic, M. Popescu, a M. Rantz, „Monitoring patients in hospital beds using unobtrusive depth sensors", in *2014 36th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, EMBC 2014*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., lis. 2014, s. 5904–5907. doi: 10.1109/EMBC.2014.6944972.
- [6] N. Vasudha a K. Uma Rao, „Shape memory alloy properties, modelling aspects and potential applications - A review", in *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing Ltd, pro. 2020. doi: 10.1088/1742-6596/1706/1/012190.
- [7] V. Srivastava, S. A. Chester, a L. Anand, „Thermally actuated shape-memory polymers: Experiments, theory, and numerical simulations", *J Mech Phys Solids*, roč. 58, č. 8, s. 1100–1124, 2010, doi: 10.1016/j.jmps.2010.04.004.
- [8] S. Belyaev *et al.*, „Functional Properties of Shape Memory Bimetal Plate", in *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd, 2015, s. S723–S726. doi: 10.1016/j.matpr.2015.07.384.
- [9] „Magnetic Shape Memory Alloy". Viděno: 22. květen 2024. [Online]. Dostupné z: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=10525>
- [10] F. Auricchio, S. Marfia, a E. Sacco, „Modelling of SMA materials: Training and two way memory effects", *Comput Struct*, roč. 81, č. 24–25, s. 2301–2317, zář. 2003, doi: 10.1016/S0045-7949(03)00319-5.
- [11] K. Divringi a C. Ozcan, „Advanced Shape Memory Alloy Material Models for ANSYS". [Online]. Dostupné z: www.ozeninc.com
- [12] B. He, X. Dong, R. Nie, Y. Wang, S. Ao, a G. Wang, „Comprehensive shape memory alloys constitutive models for engineering application", *Mater Des*, roč. 225, led. 2023, doi: 10.1016/j.matdes.2022.111563.

- [13] H. Ji a Y. Wen, „Magnetic Field Analysis of MSMA Actuator Based on ANSYS", in *2010 International Symposium on Computational Intelligence and Design*, 2010, s. 88–91. doi: 10.1109/ISCID.2010.33.
- [14] „Nitinol technical properties | Johnson Matthey". Viděno: 22. květen 2024. [Online]. Dostupné z: <https://matthey.com/products-and-markets/other-markets/medical-components/resource-library/nitinol-technical-properties>
- [15] „14.10. Newton-Raphson Procedure". Viděno: 21. květen 2024. [Online]. Dostupné z: https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v241/en/ans_thry/thy_tool10.html?q=Newton-Raphson
- [16] „The Elephants of Materials Science: SMAs Never Forget Their Shape | COMSOL Blog". Viděno: 23. květen 2024. [Online]. Dostupné z: <https://www.comsol.com/blogs/the-elephants-of-materials-science-smas-never-forget-their-shape>

Seznam obrázků

Obr. 1: Znázornění chování materiálů s tvarovou pamětí při zatížení a změně teploty [16]. ..	11
Obr. 2: Krystalická struktura austenitu a martenzitu [1].	13
Obr. 3: Základní mechanismus SME [1].	14
Obr. 4: Základní mechanismus SE [1].	14
Obr. 5: a) jednosměrný SME, b) obousměrný SME [1].	14
Obr. 6: Dle materiálu, formy a tvaru mohou být aktuátory založené na SMA použity v širokém rozsahu aplikací jako je vidět na tomto obrázku [2].	17
Obr. 7: Různé aktuační módy dosažené různými podobami aktuátorů, kompozitní (SSC) aktuátory jsou zvýrazněny zeleně [2].	18
Obr. 8: Schématický diagram tvar-měnicích SSC aktuátorů. a) Kontrakce SMA generuje moment a ohybovou deformaci. b) Design SSC aktuátoru. Asymetrická nosná struktura nebo vrstvy textilu, které mají úhel rastru θ , upravují orientaci hlavní osy. Ohybový moment může být přenesen na kombinaci ohybu a krutu pro generaci komplexních deformací [2].	19
Obr. 9: Porovnání různých SMA aktuátorů [2].	20
Obr. 10: Prodloužení MSMA tyče působením magnetického pole [1].	22
Obr. 11: Mechanismy různých typů MSMA aktuátorů: a) pružinový aktuátor, b) push-push aktuátor, c) push-pull aktuátor [1].	23
Obr. 12: Pseudoelastická odezva slitiny NiTi na rovnoměrné zatěžující cykly s maximem prodloužení 7%: a) experimentální výsledky, b) numerické výsledky [10].	25
Obr. 13: Materiálové parametry pro SMA model, ukazující závislost napětí na poměrném prodloužení a teplotně-fázový diagram [11].	26
Obr. 14: Modely dostupné v SW Ansys.	28
Obr. 15: Konstanty potřebné k definování vlastnosti Isotropic Elasticity (v obrázku označeny žlutými políčky).	28
Obr. 16: Konstanty potřebné k plné definici Shape Memory Effect materiálové vlastnosti v prostředí. Ansys.	28
Obr. 17: Konstanty potřebné k plné definici materiálové vlastnosti Superelasticity v prostředí Ansys.	30
Obr. 18: Okrajové podmínky pro model z prvků solid (a), beam (b) a výpočtové sítě pro tyto modely (c).	31
Obr. 19: Porovnání výsledků tahové zkoušky mezi SME a SE modelem.	31
Obr. 20: Průběh zatěžujícího cyklu a způsobené deformace.	32
Obr. 21: Srovnání závislosti poměrného prodloužení na teplotě mezi SME a SE modelem. Čísla u oranžových šipek udávají jejich pořadí vzniku při výpočtu.	33
Obr. 22: Křivky závislosti napětí na poměrném prodloužení pro různé Lodeho parametry závislosti.	34
Obr. 23: Křivky závislosti napětí na poměrném prodloužení vypočtená při různých teplotách.	35
Obr. 24: Křivky závislosti poměrného prodloužení na teplotě pro různé hodnoty referenční teploty.	36
Obr. 25: Křivky závislosti poměrného prodloužení na teplotě pro různé hodnoty zatěžující síly.	36
Obr. 26: Aktuační člen z plíšku, a) deformovaný tvar, b) tvar po transformaci (navrácení deformace).	37

Obr. 27: Aktuační „2D“ pružina, a) deformovaný tvar, b) tvar po transformaci (navrácení deformace).....	37
Obr. 28: Klasická aktuační pružina, a) deformovaný tvar, b) tvar po transformaci (navrácení deformace).....	38
Obr. 29: Zjednodušený model pístového translačního aktuátoru, a) deformovaný tvar, b) tvar po transformaci (navrácení deformace).....	39
Obr. 30: Aktuační člen při stlačování, a) deformovaný tvar, b) tvar po transformaci (navrácení deformace).....	39
Obr. 31: Závislost deformace a napětí na tažné síle.	40
Obr. 32: Závislost poměru maximálního a zbytkového prodloužení na síle.	41
Obr. 33: Závislost přídavné reakční síly na průměru drátu pružiny a na teplotě.	41
Obr. 34: Závislost maximálního napětí na průměru drátu pružiny a na teplotě.	41
Obr. 35: Závislost reakční síly na teplotě při různých maximálních teplotách.	42
Obr. 36: Závislost prodloužení a napětí na modulech pružnosti martenzitu a austenitu.	43
Obr. 37: Závislost reakční síly na teplotě pro různé hodnoty parametru teplotní závislosti. ...	43
Obr. 38: Závislost poměru maximálního a zbytkového prodloužení a napětí na parametru teplotní závislosti.....	44
Obr. 39: Závislost reakční síly na teplotě pro různé hodnoty elastického limitu.	45
Obr. 40: Závislost maximálního prodloužení a napětí na elastickém limitu.	45
Obr. 41: Závislost reakční síly na teplotě pro různé hodnoty parametru vytvrzení.	46
Obr. 42: Závislost maximálního prodloužení a napětí na parametru vytvrzení.	46
Obr. 43: Nastavení Nonlinear Controls.	47

Seznam tabulek

Tab. 1: Vlastnosti pro materiálový model SMA [11]	27
Tab. 2: Všechny konstanty potřebné pro definici SMA modelu.	29
Tab. 3: Transformační teploty	33

Seznam příloh

Příloha A – Tvorba a testování modelu

Příloha B – Aktuální členy

Příloha C – Aktuátor a jeho testování

Všechny soubory jsou přiloženy formou ZIP archivu.