



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

ANALÝZA SMART MATERIÁLŮ

ANALYSIS OF SMART MATERIALS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MARTIN RAŠNER

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. ZDENĚK HADAŠ, Ph.D.

BRNO 2017

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student: **Martin Rašner**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D.**
Akademický rok: 2016/17

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

Analýza smart materiálů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Smart materiály stále častěji pronikají do inženýrské praxe. Známé jsou hlavně materiály s tvarovou pamětí či nelineárními materiálovými charakteristikami. Úkolem práce je rešerše smart materiálů, které lze použít při vývoji konstrukce moderních strojů a dále taky popis těchto materiálů a analýza individuálního použití těchto materiálů v inženýrské praxi.

Cíle bakalářské práce:

1. Vypracujte rešerši dostupných smart materiálů.
2. Popište jednotlivé fyzikální jevy smart materiálů a jejich využití v inženýrské praxi.
3. Analyzujte možnosti matematického popisu chování těchto materiálů z hlediska nelineárního kmitání.

Seznam literatury:

HU, Jinlian, Yong ZHU, Huahua HUANG a Jing LU, 2012. Recent advances in shape–memory polymers: Structure, mechanism, functionality, modeling and applications. Progress in Polymer Science. 12., roč. 37, č. 12, s. 1720–1763. ISSN 00796700.

JANOCHA, Hartmut, 2007. Adaptronics and Smart Structures. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-540-71965-6.

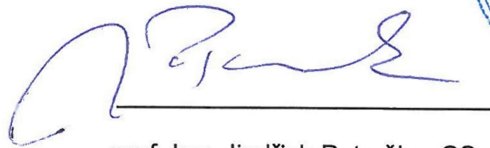
MÖHRING, Hans-Christian, Christian BRECHER, Eberhard ABELE, Jürgen FLEISCHER a Friedrich BLEICHER, 2015. Materials in machine tool structures. CIRP Annals - Manufacturing Technology. roč. 64, č. 2, s. 725–748. ISSN 00078506.

SCHALLER, R, 2003. Metal matrix composites, a smart choice for high damping materials. Journal of Alloys and Compounds. 6., roč. 355, č. 1–2, s. 131–135. ISSN 09258388.

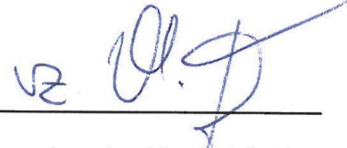
WEI, Z. G., R. SANDSTRÖM a S. MIYAZAKI, 1998. Shape-memory materials and hybrid composites for smart systems - Part I Shape-memory materials. Journal of Materials Science. roč. 33, č. 15, s. 3743–3762. ISSN 00222461.

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

V Brně, dne 3. 11. 2016



prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu



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

Abstrakt

Bakalářská práce „Analýza smart materiálů“ se zabývá popisem inteligentních materiálů z hlediska využitelnosti v technické praxi. Nejprve je v práci provedena rešerše smart materiálů, která je dále rozvedena na podrobný popis materiálů s tvarovou pamětí. Za účelem zkoumání funkčnosti materiálu a popisu jeho chování z hlediska nelineárního kmitání je navržen zjednodušený model. Praktická část se věnuje aplikaci pasivního tlumení na materiálu Nitinol. Řešení je provedeno v modelovacím prostředí MATLAB/Simulink.

Abstract

The bachelor's thesis "Smart Materials Analysis" deals with the description of intelligent materials in the way of usability in technical practice. At first, the research of smart materials is carried out, which is further elaborated on a detailed description of shape memory materials. In order to investigate the functionality of the material and the description of its behaviour in terms of non-linear oscillation, a simplified model is proposed. The practical part deals with the application of passive damping of Nitinol. The solution is accomplished by modelling program MATLAB / Simulink.

Klíčová slova

smart materiály, superelastická, martenzitická transformace, Nitinol, tlumení, nelineární kmitání

Key words

smart materials, superelasticity, martensitic transformation, Nitinol, damping, non-linear oscillation

RAŠNER, M. Analýza smart materiálů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 44 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D.

Čestné prohlášení:

Prohlašuji, že předložená bakalářská práce je původní a zpracoval jsem ji samostatně pod dohledem vedoucího práce. Prohlašuji, že citace použitých pramenů je úplná, že jsem ve své práci neporušil autorská práva.

V Brně dne 26. května 2017

.....

Martin Rašner

Poděkování:

Děkuji svému vedoucímu práce, panu doc. Ing. Zdeňku Hadašovi, Ph.D., za cenné rady, připomínky, odborné vedení a trpělivost při vypracování bakalářské práce. Dále děkuji své rodině a přátelům za podporu během studia.

OBSAH

ÚVOD.....	10
1 SMART MATERIÁLY	11
1.1 SMART materiály 1. druhu.....	11
1.2 SMART materiály 2. druhu.....	11
2 REŠERŠE DOSTUPNÝCH SMART MATERIÁLŮ	12
2.1 Piezoelektrické materiály	12
2.1.1 Piezoelektrický jev.....	12
2.1.2 Piezokeramika.....	13
2.1.3 Aplikace piezoelektrických materiálů	13
2.2 Paměťové materiály	14
2.3 Elektro-reologické materiály.....	14
3 MATERIÁLY S TVAROVOU PAMĚTÍ	15
3.1 Historie.....	15
3.2 Martenzitická transformace.....	15
3.3 Paměťový efekt	17
3.4 Superelastický jev	18
3.5 Polymery s tvarovou pamětí.....	18
3.6 Slitiny s tvarovou pamětí	19
3.7 Nitinol	20
3.8 Aplikace paměťových materiálů	22
3.8.1 Aktuace a sensorika	22
3.8.2 Využití pro tlumení	22
4 MECHANICKÉ KMITÁNÍ	23
4.1 Kmitání lineárních soustav.....	23
4.2 Kmitání nelineárních soustav	23
4.3 Tlumení kmitání	24
4.3.1 Absorbce energie při tlumení vibrací v SMA.....	24

5	DYNAMICKÝ MODEL SYSTÉMU.....	25
5.1	Předpoklady pro zjednodušení nelineárního chování	25
5.2	Omezení modelu	26
5.3	Aproximace hysterezní křivky	26
5.4	Nelinearita soustavy.....	27
6	REALIZACE MODELU	28
7	VÝSLEDKY ŘEŠENÍ SOUSTAVY.....	31
	ZÁVĚR	34
	Bibliografie	35
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	41
	SEZNAM GRAFŮ	42
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	43
	SEZNAM TABULEK	44

ÚVOD

V důsledku neustálého vývoje v oblasti technických aplikací dochází k velkému rozmachu inovačních materiálů. Smart materiály jsou novou třídou materiálů, které dokáží výrazně a zejména vratně přizpůsobit své vlastnosti vlivem vnějších proměnných podmínek. Nabízí se tedy jejich využití v řadě oblastí. Nejzajímavější třídou smart materiálů z hlediska konstrukčního využití jsou slitiny s tvarovou pamětí, které jsou schopny díky svým specifickým vlastnostem obnovit jejich původní konfiguraci dokonce i po velkých deformacích.

V technické praxi běžně řešíme systémy, které podléhají dynamickým účinkům. V případě pracujících strojů či stability budov se projevuje snaha omezit nežádoucí dynamická ovlivnění, mezi která patří kmitavé pohyby a vibrace. Kvalita hraje v dnešní době významnou roli, a proto jsou hledány nové materiály ke zlepšení vlastností systému. K zamezení nežádoucích vibrací se nabízí využití materiálů s tvarovou pamětí, které díky svým specifickým vlastnostem a nelineárním charakteristikám dokáží těmto nežádoucím jevům zamezit.

Cílem této práce je provést rešerši dostupných smart materiálů a popis základních fyzikálních jevů, na jejichž základu dosahují výjimečných vlastností, a představit možnosti jejich efektivního využití v technické praxi. Tato práce se rovněž věnuje analýze matematického popisu chování těchto materiálů z hlediska nelineárního kmitání.

V bakalářské práci je realizován model, který je schopen reprodukovat nelineární dynamické účinky materiálu s tvarovou pamětí včetně velké tlumící kapacity způsobené hysterezním chováním materiálu.

1 SMART MATERIÁLY

Smart materiály jsou inovační třídou materiálů, které mají schopnost výrazně a zejména vratně měnit svoje vlastnosti v závislosti na změně vnějších podmínek. Dokáží vhodně měnit svůj tvar, barvu, tuhost, vodivost a mnoho jiných vlastností s ohledem na změnu teploty, vlhkosti, tlaku, napětí, světla či elektrického pole [1]. Změna vlastností smart materiálu je jeho vlastní reakcí bez nutnosti dalšího řídicího zařízení.

Užitím těchto „inteligentních“ materiálů mohou inženýři použít struktury s jejichž předem známými reakcemi na nepředvídatelné okolnosti. Ve svých různých formách mohou fungovat jako aktuátory, které se přizpůsobí vnějším podmínkám změnou charakteristik, jako je tvar a tuhost anebo senzory, které poskytují informace o struktuře a vnějších změnách.

1.1 SMART materiály 1. druhu

Smart materiály mohou být rozděleny podle dvou základních principů. Materiály 1. druhu vykazují v závislosti na vnějších podmínkách změnu vlastností materiálu, jeho chemické nebo mikroskopické struktury. Jednotlivé typy se dělí podle specifických proměnných vlastností, předurčujících konkrétní využití. Hlavní oblastí využití pro technickou praxi jsou materiály s tvarovou pamětí.

Dalšími materiály jsou například magnetoreologické, elektoreologické, termochromní, mechanochromní, fotochromní, chemochromní, elektrochromní a vodivé polymery [2].

1.2 SMART materiály 2. druhu

V závislosti na vnějších podmínkách materiál transformuje dodávanou energii. Nemění svoji strukturu, ale energetický stav. Hlavním příkladem jsou piezoelektrické a feroelektrické materiály, které nachází využití jako senzory, aktuátory či tlumiče vibrací. Patří zde také fotovoltaické, termoelektrické a luminiscenční materiály [2].

2 REŠERŠE DOSTUPNÝCH SMART MATERIÁLŮ

Snímací zařízení, které reaguje na vnější podněty, je označováno jako senzor a řídicí prvek nazýváme aktuátor. Pokud jsou tyto mechanismy aktivní v aplikacích v reálném čase, jsou označovány jako „inteligentní“. Optimální časový interval, za který dojde ke změně, je rozhodující pro návrh inteligentních struktur a závisí na typu aplikace.

Různé formy látek, které mohou být součástí smart materiálu jako senzory a aktuátory, jsou například piezoelektrické a piezokeramické prvky. Optická vlákna se používají jako snímače [3], slitiny s tvarovou pamětí, polymery s tvarovou pamětí a elektro-reologické tekutiny nacházejí využití jako aktuátory.

V rešeršní části práce bude pozornost zaměřena na pochopení základních vlastností smart materiálů, na základě kterých bude dále vyvinut model pro popis jejich chování.

2.1 Piezoelektrické materiály

Piezoelektrické materiály dokáží přeměňovat dodávanou energii v závislosti na vnějších podmínkách díky změně svého energetického stavu. Dochází k transformaci energie z mechanické na elektrickou nebo naopak. Hlavní výhodou těchto materiálů je téměř okamžitá změna tvaru materiálu nebo generování elektrického pole.

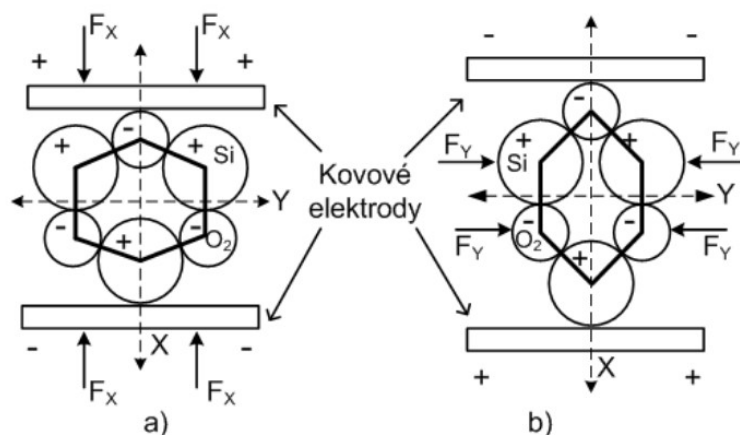
Piezoelektrickým materiálem je nejčastěji krystal, ve kterém je elektrická polarita indukována tlakem. V opačném případě se piezoelektrický materiál deformuje, když je vystaven elektrickému poli. S využitím těchto základních principů se používají jako senzory a akční členy.

2.1.1 Piezoelektrický jev

Vlastnosti piezoelektrických materiálů zakládají na piezoelektrickém jevu. V roce 1880 bratři Curie objevili neobyčejné vlastnosti u některých přírodních materiálů, například křemene a turmalínu. Dokázali, že při mechanickém zatížení materiál vykazuje elektrickou polarizaci. Tento efekt byl označen jako piezoelektrický jev podle řeckého slova „piezo“ což znamená v překladu tláčit [4].

Názorně je vznik náboje vidět na Obr. 1., na kterém je zobrazena schématická struktura krystalu křemene. Působením mechanického tlaku (stlačováním nebo roztahováním osy X) dochází na povrchu krystalu, tedy i na přilehlých elektrodách, ke vzniku volného náboje. Děje se tak v důsledku vyrušení kompenzačních účinků nábojů různých znamének. Tento princip je označován jako přímý piezoelektrický jev. Působící síla je přímo úměrná vzniklému elektrickému náboji.

Opačným postupem lze dosáhnout deformace některých krystalů způsobenou blízkým elektrickým polem. Tento děj se nazývá nepřímý piezoelektrický jev, nebo také elektrostriktce [5].



Obr. 1: Vznik náboje: a) stlačení - podélný jev a b) roztahání elementární krystalové buňky - příčný jev (převzato z: [5])

2.1.2 Piezokeramika

Piezoelektrické vlastnosti vykazuje řada monokrystalických přírodních, či uměle vytvořených látek. Hlavním příkladem přírodních materiálů je křemen (SiO_2), který dosahuje malých, ale velmi stabilních piezoelektrických vlastností.

Technologicky nejdůležitější třídou piezoelektrických látek je piezoelektrická a elektrostrikční keramika. Obecně jsou tyto materiály nazývány PZT keramikami. Jedná se o materiály ze smíšených krystalů PbZrO_3 (PT) a PbTiO_3 (PT). Je mnohem méně nákladná na výrobu ve srovnání s monokrystalami a dosahuje lepších piezo-elektrických a piezo-mechanických vlastností než přirozeně se vyskytující materiály [6].

Piezoelektrické materiály dělíme do dvou kategorií ([7], [8]):

Měkká PZT - Charakteristickou vlastností je dobrá pohyblivost doménových stěn. Polarizace je tedy možná i ve slabším elektrickém poli a nižší teplotě. Vznikne přidáním vhodného donoru do směsi. Výhodou je vyšší permitivita a vyšší nábojová konstanta. Dosahuje větších mechanických posuvů než keramika tvrdá a je vhodná pro senzory a aktuátory.

Tvrdá PZT – Doménové stěny jsou pevně fixovány, pro stabilní polarizaci je tedy nezbytné silnější elektrické pole a vyšší teplota. Vznikne přidáním vhodného akceptoru do směsi. Tato kombinace vlastností nachází využití zejména pro vysokofrekvenční aplikace, snímače (zrychlení, chvění) a akustické aplikace.

2.1.3 Aplikace piezoelektrických materiálů

Tvarová změna materiálu vlivem elektrického pole je díky jejich vysoké mechanické tuhosti a nízké hmotnosti velmi přesná a rychlá. Z toho důvodu piezoelektrické materiály nacházejí řadu využití.

- **Snímače**

Piezoelektrický jev lze využít v senzorech, které generují elektrický proud v reakci na mechanickou deformaci. Materiály mohou být užitečné v tlumících

systemech a při detekci zemětřesení moderních budov. Nejznámější aplikací senzoru je automobilový airbag [9].

- **Aktuátory**

Aktuátory využívající piezoelektrického jevu vykazují výborné vlastnosti jako například přesnost polohování, vysokou tuhost a dynamiku pohybu. Deformace materiálu jsou malé, řádově 0,1 % až 1 %, a proto jsou vhodné zejména pro mikro polohování [10]. Dalšími příklady využití jsou piezoelektricky řízené relé, rušiče hluku nebo přesná polohovadla. Lze je také aplikovat v různých odvětvích na měření vibrací a nárazů, jejich kontrole a tlumení [11].

2.2 Paměťové materiály

Materiály s tvarovou pamětí jsou významnou skupinou smart materiálů, které dosahují specifických vlastností vlivem teploty, či napětí. Zahrnují slitiny s tvarovou pamětí, keramiky a také poměrně novou třídu polymerů s tvarovou pamětí [1]. Z hlediska konstrukčního využití se jeví jako nejvhodnější materiály, a proto bude jejich detailnímu popisu chování věnována celá další kapitola.

2.3 Elektro-reologické materiály

Elektro-reologické materiály jsou materiály, jejichž reologické vlastnosti a deformační chování závisí na elektrickém poli. Tyto materiály jsou typicky kapaliny (ale také gely nebo elastomery), avšak při dostatečném smykovém napětí a vystavení působení elektrického pole tuhnou do viskoelastických pevných látek. Za přítomnosti elektrického pole se z polovodičových součástek, obsažených v kapalině, vytvoří vláknitá struktura, která brání smykové deformaci a tečení. Ve svém pevném stavu mají značnou tlumící kapacitu a schopnost absorbovat energii při nárazech. Tato schopnost je silně závislá na elektrickém poli. Tyto změny jsou reverzibilní a nastávají téměř okamžitě se změnou působení. Jejich hlavní vlastnost, reologická viskozita, může být vlivem elektrického pole zvýšena až tisíckrát [11].

Tyto materiály mohou být efektivně použity pro řízení a tlumení vibrací prostřednictvím zpětné vazby různých dynamických systémů, například při konstrukci tlumičů, u kterých je rychlost reakce zásadním kritériem [12].

Elektro-reologické materiály jsou vhodné pro budování inteligentních konstrukcí a strojů, protože zajišťují plynule měnící se podmínky s okamžitou odezvou, pro řízení mechanických vibrací. Komplexní přehled o elektro-reologických zařízeních můžeme nalézt v publikaci [13], kde jsou popsány klíčové způsoby činnosti a kontroly zpětné vazby systému.

- **Magneto-reologické materiály**

Jejich vlastnosti jsou prakticky stejné jako u elektro-reologických materiálů, s tím rozdílem, že ke změně dochází vlivem magnetického pole [11].

3 MATERIÁLY S TVAROVOU PAMĚTÍ

Nejzajímavější třídou SMART materiálů z hlediska konstrukčního využití jsou díky svým dynamickým vlastnostem slitiny s tvarovou pamětí (z ang.: shape memory alloys-SMA) [14]. Vlivem martenzitické transformace se v SMA objevuje pozoruhodný efekt tvarové paměti a superelastivity, předurčující materiály k využití v mnoha technických oblastech. Aktuálně jsou SMA aplikovány v například v medicíně, elektrickém a leteckém průmyslu a speciálně pro stavebnictví při seizmické ochraně budov [1].

V této kapitole budou popsány speciální jevy martenzitické transformace, superelastivity a paměťového efektu, díky kterým jsou tyto materiály atraktivní z hlediska konstrukčního využití.

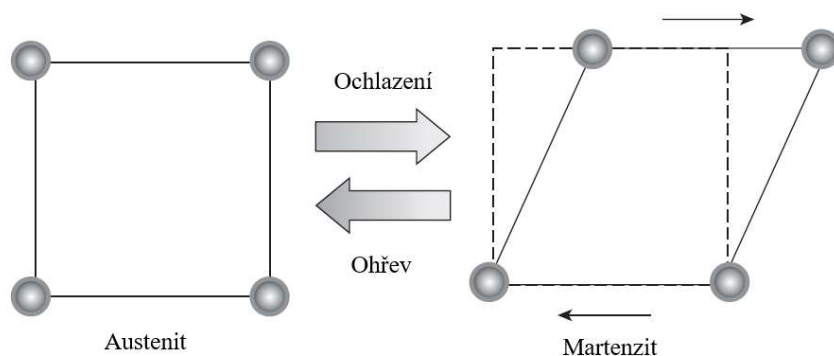
3.1 Historie

Výjimečný jev tvarové paměti byl poprvé pozorován na slitině Au-Cd roku 1932 [15]. Významný objev v historii SMA uskutečnili vědci z U.S. Naval Ordnance Laboratory roku 1962 na slitině NiTi. Spojením názvu laboratoře (Naval Ordnance Laboratory) a názvu prvků (Nickel Titanium) vzniklo komerční označení slitiny – NiTinol [16].

První studie na téma tlumení materiálu pomocí Nitinolu byla provedena v roce 1991 Graesserem [17], který zkoumal tlumení vlivem fázových transformací pro seizmickou izolaci.

3.2 Martenzitická transformace

Funkční vlastnosti SMA jsou úzce spojeny s martenzitickou přeměnou. Jedná se o bezdifúzní transformaci probíhající nukleací a pohybem vnitřních rozhraní v pevném skupenství za teplot, kdy jsou difúzní procesy atomů v krystalové mřížce významně potlačeny.

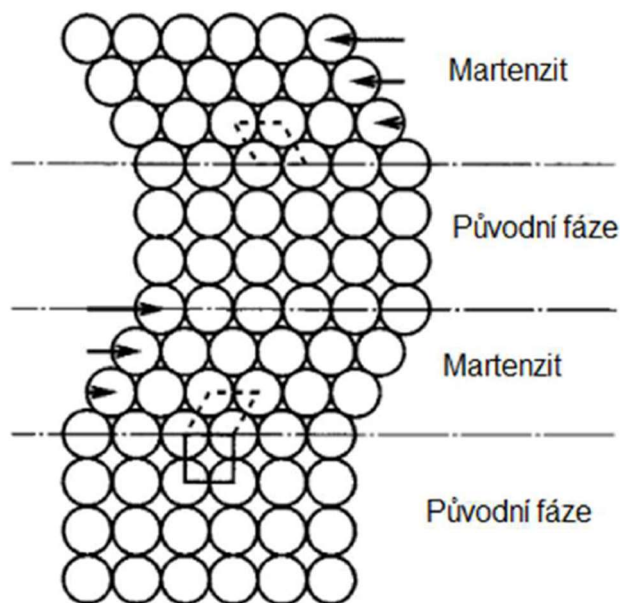


Obr. 2: Schématické znázornění změny tvaru buňky při martenzitické přeměně vlivem teploty (převzato z: [18] a upraveno)

Austenit (A) je fáze vysokoteplotní a má obecně uspořádanou kubickou prostorově středěnou mřížkou (bcc). Druhou fází je nízkoteplotní fáze nazývaná martenzit (M), která

má odlišnou krystalickou strukturu od martenzitu (tetragonální, ortorombickou nebo monoklinickou) [19].

Martenzitická transformace je způsobena pohybem vnitřních rozhraní mezi těmito dvěma stabilními pevnými fázemi (A) - (M), které se mohou relativně snadno vratně pohybovat v závislosti na změně napětí či teploty [20]. Tyto specifické vratné pohyby jsou důležitým principem a způsobující jedinečné vlastnosti slitin materiálů s tvarovou pamětí.



Obr. 3: Schéma martenzitickej transformace (převzato z: [21] a upraveno)

Při této transformaci může mít každá elementární buňka vůči austenitické struktuře jinou krystalografickou orientaci, tzv. variantu. V závislosti na koherenci jednotlivých fází se vytvoří daný počet variant. V systému slitiny Nitinolu existuje až 24 různých variant martenzitu [22]. Při zahřívání materiálu z martenzitickej fáze dochází k přeměně zpět na austenit, který má pouze jedinou možnou variantu. Tento přechod se nazývá reverzní transformace.

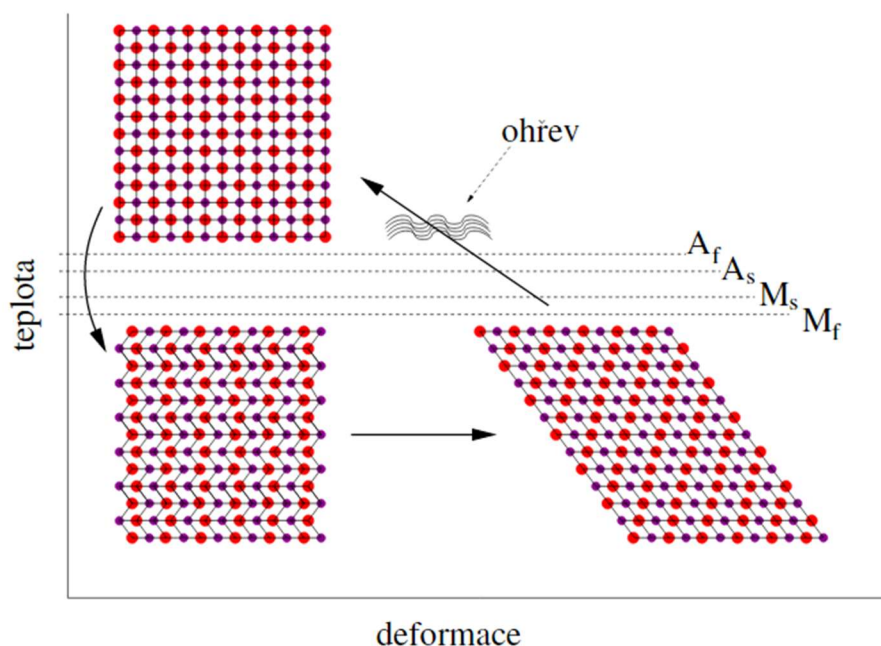
Martenzitickou transformací austenitu na martenzit nedochází k makroskopickým změnám tvaru. Mění se pouze struktura materiálu za pomoci mechanismu dvojčatění.

Při dvojčatění dochází k bezdifúznímu posunu atomů z jejich rovnovážných poloh tím, že v materiálu vznikne rovina (tzv. rovina dvojčatění), která zrcadlí krystalografické uspořádání atomů [20].

3.3 Paměťový efekt

Slitiny s tvarovou pamětí jsou známy především pro svoji vlastnost pamatovat si a obnovit svůj původní tvar dokonce i po velkých deformacích bez trvalého následku.

Nízkoteplotní, deformovatelná fáze martenzitu se při zahřátí na speciální teplotu transformuje do stabilnější austenitické fáze při vyšších teplotách a tím získá materiál zpět svoji geometrickou konfiguraci (tzv. jednocestný paměťový efekt). Schéma jednocestného paměťového efektu je znázorněna na Obr. 4. a Obr. 5. a).

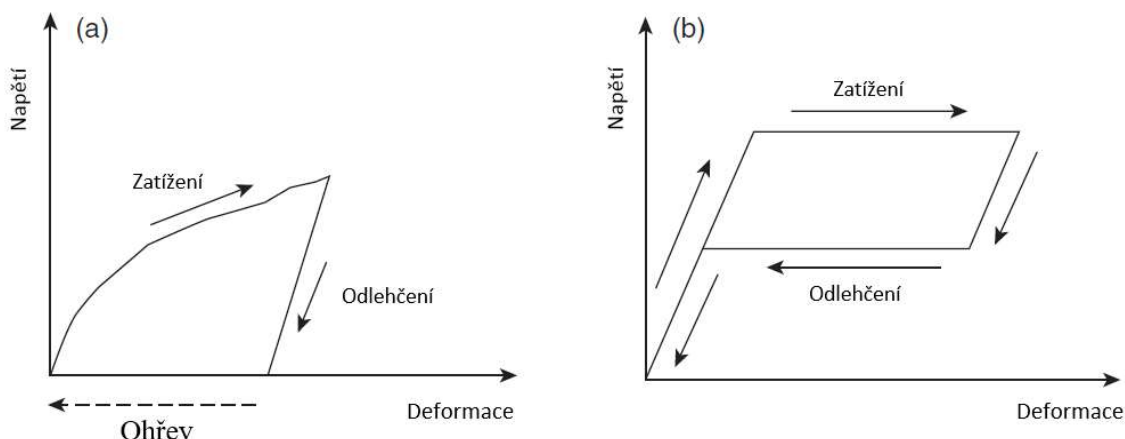


Obr. 4: Princip paměťového efektu ve slitinách SMA (převzato z: [23])

Při zahřívání se SMA začne transformovat z martenzitu na austenit. Teplota A_s (austenit start) označuje začátek transformace austenitu při zahřívání a A_f (austenit finish) značí konec přeměny na austenit.

Během ochlazování se transformace vrací zpět. Při teplotě M_s (martenzit start) je začátek martenzitické transformace při chlazení a M_f (martenzit finish) znamená konec transformace na martenzit. Hlavní hysterezní smyčka se v SMA vyznačuje úplným transformačním přechodem z austenitu na martenzit a zpět.

SMA mohou být také "vycvičeny" pro efekt obousměrné tvarové paměti. Takový materiál má uložený tvar v martenzitické i austenitické fázi [24]. Tento efekt je teoreticky ideální pro aplikace s tvarovou pamětí, avšak praktické využití je nevhodné z důvodu nestability chování a náročným požadavkům na zpracování [11].



Obr. 5: Křivky napětí a deformace pro a) efekt tvarové paměti, b) superelastické chování (převzato z: [18] a upraveno)

3.4 Superelastický jev

Většina běžných kovů dokáže obnovit pouze méně než 1 % deformace před zplastizováním. SMA však podstoupí bezdifúzní termoelastickou martenziticou fázovou transformaci, která umožňuje kompletní obnovení deformace až do 8 % ([18], [25]). V materiálu nedochází k běžnému skluzovému mechanismu, ale děje se tak v důsledku dvojčatění.

Tento efekt, známý také jako pseudoelastická, popisuje materiálové změny v závislosti na aplikovaném zatížení (deformace, napětí), které jsou izotermicky obnoveny pro dosažení významných mechanických vlastností.

Princip chování je v podstatě stejný jako při teplotním tvarově paměťovém efektu, avšak při superelastickém jevu fázová transformace austenitu probíhá při teplotách nižších [11]. Pokud je austenitická fáze pod náporu aplikovaného zatížení, je indukována martenziticá fáze. Po odstranění aplikovaného zatížení materiál v podstatě přejde do austenitické fáze a způsobené deformace se okamžitě obnoví. Hysterezní křivka napětí a deformace je znázorněna na Obr. 5.

Dynamický model, vytvořený k popisu chování těchto materiálů (viz kapitola 6), bude zakládat právě na jevu superelasticity.

3.5 Polymery s tvarovou pamětí

Polymery s tvarovou pamětí (z ang.: shape memory polymers-SMP) jsou poměrně novou třídou smart materiálů, které však vykazují zajímavé vlastnosti včetně snadného zpracování a schopnosti velké deformace, která může dosahovat až 300 % [26]. Změny tvaru jsou v SMP většinou vyvolány ohřevem nad specifickou spínací teplotu skelného přechodu. Nejpožívanějšími polymery jsou tzv. segmentové polyuretany [27].

SMP mají oproti SMA několik výhod. Kromě teploty, která způsobuje jejich změny vlastností mohou využívat i další externí podněty jako například světlo, magnetické pole,

chemikálie a další. Jejich vlastnosti mohou být dobře upravovány z důvodu možnosti kompozitních a syntetických metod. Mohou být velmi lehké a zabírat velký objem. Polymery s tvarovou pamětí nacházejí využití na příkladu funkčních textilií, adaptivních biomedicínských zařízení či interaktivních elektronických přístrojů [28].

3.6 Slitiny s tvarovou pamětí

Nejpoužívanější slitinou s tvarovou pamětí je kvůli svým specifickým vlastnostem Nitinol. Dalším typem mohou být slitiny mědi, které jsou snáze vyrobitelné a levnější ve srovnání s Ni-Ti slitinami. Jejich vlastnosti však nedosahují takových kvalit. Srovnání slitiny NiTi a CuZnAl je pro představu uvedeno v tabulce 2. Porovnání dalších SMA s Nitinolem z hlediska transformačních teplot a transformačních hysterezí můžeme vidět v tabulce 1.

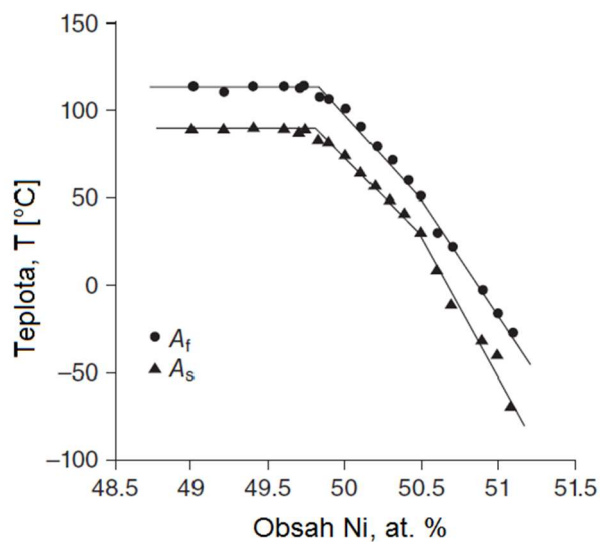
Tabulka 1: Přehled běžných materiálů s tvarovou pamětí (převzato z: [29] a upraveno)

Slitina	Složení	Rozsah transformačních teplot A_s [°C]	Transformační hystereze [°C]
AgCd	44 ~ 49 at % Cd	190 ~ 50	~ 15
AuCd	46.5 ~ 50 at % Cd	30 ~ 100	~ 15
CuAlNi	14 ~ 14.5 hm % Al 3 ~ 4.5 hm % Ni	140 ~ 100	~ 35
CuSn	~ 15 at % X	120 ~ 30	
CuZn	38.5 ~ 41.5 hm % Zn	180 ~ 10	~ 10
CuZn X (X=Si,Sn,Al)	malé množství X	180 ~ 200	~ 10
InTi	18 ~ 23 at % Ti	60 ~ 100	~ 4
NiAl	36 ~ 38 at % Al	180 ~ 100	~ 10
TiNi	46.2 ~ 51 at % Ti	50 ~ 110	~ 30
TiNi X (X=Pt,Pd)	50 at % Ni+X 5 ~ 50 at % X	200 ~ 700	~ 100
TiNiCu	~ 15 at % Cu	150 ~ 100	~ 50
TiNiNb	~ 15 at % Nb	200 ~ 50	~ 125
TiNiAu	50 at % Ni+Au	20 ~ 610	
TiPd X (X=Cr,Fe)	51 at % Pd+X ~ 15 at % X	0 ~ 600	~ 50
MnCu	5 ~ 35 at % Cu	250 ~ 180	~ 25
FeMnSi	32 hm % Mn. 6 hm % Si	200 ~ 150	~ 100
FePt	~ 25 at % Pt	~ 130	~ 4
FePd	~ 30 at % Pd	~ 50	

Tabulka 3: Chemické a fyzikální vlastnosti NiTi (převzato z: [30] a upraveno)

teplota tavení [°C]	1310
hustota [kg · dm ⁻³]	6,45
elektrická rezistivita [10 ⁻⁶ Ωm]	0,5 ÷ 1,1
tepelná vodivost [W · m ⁻¹ · K ⁻¹]	10 ÷ 18
transformační entalpie [J · kg ⁻¹ · K ⁻¹]	490
pevnost v tahu [MPa]	700 ÷ 1000
rozsah transformačních teplot [K]	173 ÷ 383
hystereze [K]	30
maximum jednocestného jevu [%]	8
normální dvoucestný jev [%]	1,2
počet tepelných cyklů	100 000
maximální teplota ohřevu [°C]	400
korozní odolnost	výborná
biologická kompatibility	výborná

Vlastnosti Nitinolu (např. rozsah transformačních teplot) můžeme ovlivnit způsobem zpracování či změnou hmotnostního zastoupení prvků. Na obrázku 6 je znázorněn zásadní vliv poměru niklu na transformační teplotu.



Obr. 7: Změna transformační teploty dle obsahu Ni (převzato z: [18] a upraveno)

Vlastnosti, které předurčují Ni-Ti materiál pro inženýrské aplikace jsou [1]:

- Opakovaná absorpce velkého množství deformační energie při zatížení bez trvalé deformace.

- Možnost podstoupit širokou škálu cyklického zatěžování díky změně vlastností SMA.
- Mimořádná odolnost proti únavě při velkých deformacích

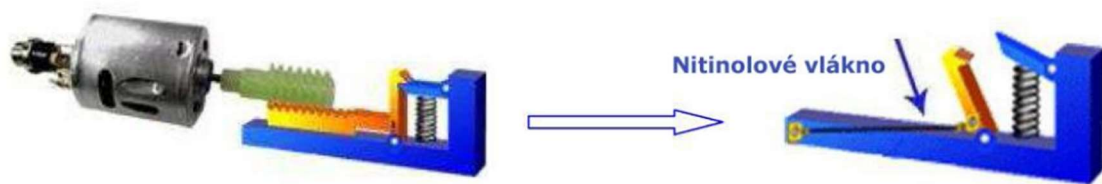
3.8 Aplikace paměťových materiálů

Zajímavé termomechanické vlastnosti SMA umožňují navrhnout inteligentní struktury, které se otvírají inovačním aplikacím v mnoha strojírenských oborech. Navrhované konstrukce založené na takových materiálech se pohybují od leteckých/mechanických aplikací [18] (např. adaptivní inteligentní řízení křídel letadel a pohonů, mechanismy pro ovládání satelitů a antén) až po biomedicínské (např. endovaskulární stenty, kardiovaskulární chirurgie) a civilní aplikace [31] (např. zařízení pro pasivní a aktivní kontrolu stavebních konstrukcí).

3.8.1 Aktuace a sensorika

Jednou z nejdůležitějších oblastí aplikace materiálu SMA je medicína, kde se využívá zejména jejich superelastického chování například pro stenty, filtry a ortodontické dráty.

Aktuátory a senzory, založené na jevu martenzitické transformace, umožňují miniaturizaci do oblasti nano rozměrů, bez jakéhokoliv omezení. – NiTi vlákna.



Obr. 8: Rozdíl mezi běžným aktuátorem a Nitinolovým vláknem (převzato z: [32])

3.8.2 Využití pro tlumení

V minulosti byly použity vysoce tlumící materiály založené na polymerech díky jejich viskoelastickému chování. Polymerní materiály však typicky vykazují nízký modul pružnosti a nejsou stabilní při relativně nízkých teplotách [17].

Jedním z nejzajímavějších materiálů pro tlumení vibrací jsou právě SMA. Hysterezní fázová transformace mezi austenitem a martenzitem představuje vnitřní mechanismus disipace energie, která nezpůsobuje trvalé plastické poškození materiálu a má za následek značnou kapacitu tlumení.

Potenciální aplikace materiálu mohou být například při eliminaci kmitání strojů a jejich součástí a také ochraně civilních struktur, jako jsou budovy a mosty, kde mohou SMA poskytnout účinnou seizmickou ochranu [33]. V oblasti vojenské vědy se SMA používají pro absorpci šokových vln v ochranných systémech [34].

SMA mohou být obecně používány pro řízení a útlum vibrací za různých zatěžovacích podmínek, od impulsního typu až po harmonické kmitání.

4 MECHANICKÉ KMITÁNÍ

Kmitání se vyskytuje téměř všude kolem nás. Jedná se o převážně nežádoucí jev, který např. v případě obráběcího stroje negativně ovlivňuje kvalitu obrobku, bezpečnost a trvanlivost stroje. Pomocí metod vibrační analýzy jsme schopni určit slabé oblasti materiálu nebo zabránit rezonančním stavům.

Inteligentní materiály mohou pracovat "chytřeji" v tom smyslu, že vhodně změní jejich fyzikální vlastnosti [11]. Tyto změny mohou vést ke zvýšení životnosti a opotřebení bez významného zvýšení ceny, velikosti materiálu nebo hmotnosti.

Kmitání můžeme rozdělit na volné a vynucené [35].

- **Volné kmitání** nastává, když je systém vychýlen ze své rovnovážné polohy a ponechán bez dalšího silového působení. Na těleso působí pouze elastické síly, které ho po vychýlení vrací zpět do rovnovážné polohy. Když je energie systému rozptýlena vlivem tření nebo jiných odporů, považujeme kmitání za tlumené.
- **Vynucené kmitání** vzniká nejčastěji stálým působením periodických vnějších sil. Při popisu chování strojů nebo vibrací budov během zemětřesení uvažujeme deterministické periodické buzení.

4.1 Kmitání lineárních soustav

Systém považujeme za lineární, platí – li princip superpozice [36]. Kmitání soustavy je tedy lineárně závislé na buzení. Lineární soustavy lze popsat lineárními diferenciálními rovnicemi druhého řádu s konstantními koeficienty. Reálné soustavy jsou však vlivem různých parametrů nelineární. Lineární řešení je z hlediska modelace mnohem jednodušší, a proto se využívá pro hrubou představu kmitání. Pro vyřešení nelinearity se potom pohybová rovnice doplní nelineárními členy.

4.2 Kmitání nelineárních soustav

Obsahuje-li mechanická soustava alespoň jeden prvek, jehož charakteristika je charakterizována nelineárními rovnicemi, je soustava označována jako nelineární. Popis je realizován pomocí nelineární diferenciální rovnice. Nelineární závislost pružných a tlumících sil souvisí s fyzikálními vlastnostmi materiálů. Typické jevy pro nelineární soustavy jsou například [35]: závislost vlastní frekvence a tlumení na amplitudě kmitání, víceznačnost řešení, oblasti nestability, vznik subharmonických a vícesložkových kmitů. U nelineárních soustav neplatí princip superpozice. K utlumení kmitání se často využívají regulační a řídicí prvky s nelineárními charakteristikami, které mají významný vliv na chování soustavy.

4.3 Tlumení kmitání

Vysoké úrovně nežádoucích vibrací vedou k porušení různých typů systémů. Mohou být vyvolány například zemětřesením, nevyváženým rotujícím zařízením, vibracemi při obrábění či nedbalým řešením konstrukcí, kde jsou vlastní frekvence konstrukčních členů velmi blízko u sebe. To může způsobit velmi rychlé selhání téměř jakékoliv struktury. Vibrační izolátory se často používají například v základech velkých budov při ochraně před zemětřesením ([1], [37]).

Vibrace systému je možné eliminovat aktivními, či pasivními prvky. Tradiční metody využívají pasivní elementy ke zvýšení tuhosti a tlumení. V současnosti však hraje kvalita a bezpečnost významnou roli při optimalizaci systému, a proto jsou hledány nové konstrukční řešení a specifické materiály ke zlepšení vlastností systému. Aplikace smart materiálu, který reaguje nezávisle na okolní podněty bez nutnosti využití dalších prvků, je tedy vhodným řešením pro tlumení nežádoucích vibrací.

4.3.1 Absorbce energie při tlumení vibrací v SMA

Schopnost absorbovat energii nalezená v martenzitické i v austenitické fázi SMA je nepřímou spojena s chováním tvarové paměti. Typy zařízení, které využívají tuto vlastnost jsou rozděleny do dvou kategorií ([11], [38]):

- **Martenzitické** tlumicí zařízení pracují s použitím pouze martenzitické fáze SMA. Energie je absorbována martenzitem během jeho dvojitého přeorientování a přizpůsobuje velké napětí pro vysokofrekvenční a nízkofrekvenční zatížení. Přestože nemohou obnovit velká napětí bez následného ohřevu, poskytují dobré tlumicí vlastnosti v širokém teplotním rozmezí.
- **Superelastické** tlumicí zařízení využívají plošnou hysterezní část křivky napětí a deformace. Materiály SMA jsou předpřaty tak, aby dosahovaly tohoto zlomu křivky tuhosti a jakékoliv dodatečné napětí jsou přizpůsobeny změnami vlastností.

5 DYNAMICKÝ MODEL SYSTÉMU

Jak dokládá nedávná široká literatura v oboru ([19], [39], [40]), je pro reprodukci chování SMA potřeba sestavit vhodný konstituční model.

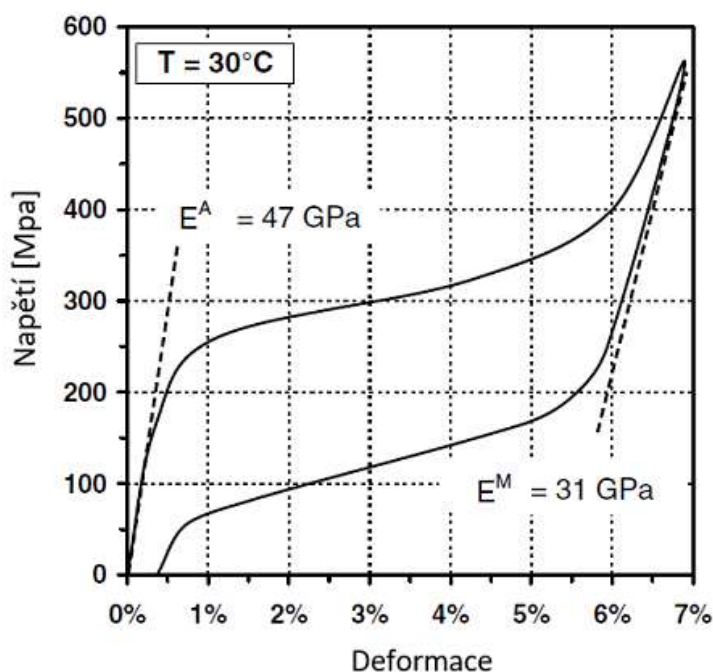
Modely mohou být rozdělené na mikro, mikro-makro a makro modely [41].

Navržený model v této práci je řešený z makro pohledu, který je neúčinnější pro inženýrské aplikace a je schopen popsat globální strukturální chování SMA bez explicitního modelování chování na mikroúrovni. Důkladná recenze dostupných modelů je popsána v literatuře [39].

V této kapitole bude navržen model pro popis martenzitické transformace a nelineárního chování Nitinolu vlivem zatěžujícího napětí.

Model je vytvořen za předpokladu ideálního chování během martenzitické transformace [39] na základě hysterezní křivky materiálu Nitinol, sestrojené Lagoudasem z experimentálních dat při izotermickém zatěžování, charakterizované na Obr. 9.

Kde E^A je lineární Youngův modul pružnosti pro austenitickou fázi a E^M pro fázi martenzitickou.



Obr. 9: Hysterezní křivka materiálu NiTi při $T=30^\circ\text{C}$ (převzato z: [19] a upraveno)

5.1 Předpoklady pro zjednodušení nelineárního chování

Přesné popsání chování materiálu s nelineárními charakteristikami při kmitání je často velmi obtížné. Pro ideální pseudo-elastické chování je nutno zavést určité předpoklady ([11], [19], [39]):

- Elastická tuhost se mění lineárně v závislosti na deformaci. Předpoklad je v souladu se zákonem zachování objemu pro martenzitickou, přechodovou a austenitickou tuhost. Youngův modul E^* se tedy předpokládá jako lineárně izotropní.
- Teplotní závislost materiálu – koeficient tepelné roztažnosti (α) je konstanta [42]. Při modelaci tedy pracujeme s izotermickým materiálem.

5.2 Omezení modelu

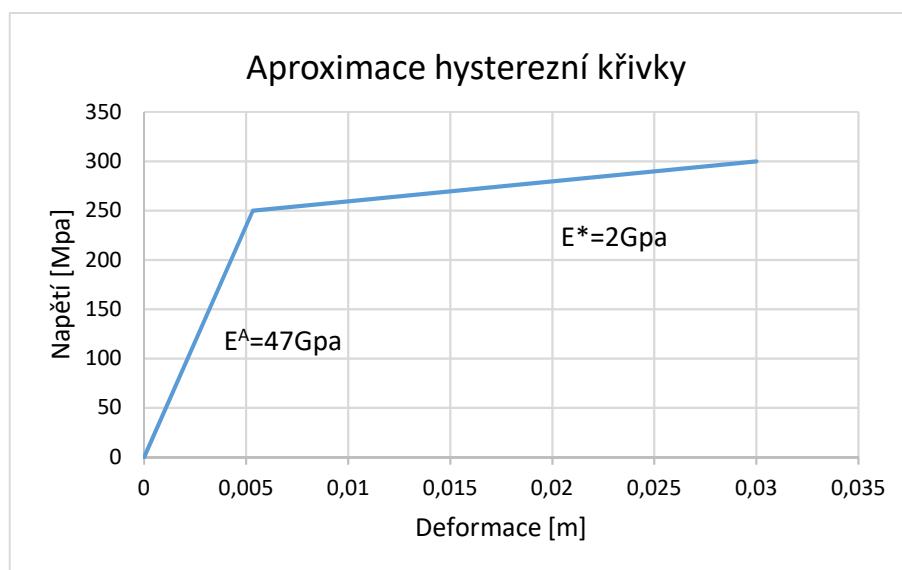
Omezením většiny modelů je předpoklad, že fázové diagramy řídící fázové transformace jsou charakterizovány částečně (po částech) - lineárními transformačními křivkami navzdory vysokým nelinearitám. Navíc jsou obecně zanedbávány různé přímé a reverzní transformační napětí (spojené s různou kinetikou transformace), stejně jako jejich závislost na teplotě [39]. Pro komplexní inženýrské aplikace jsou tato zjednodušení méně vhodná, avšak pro naše potřeby popisu chování materiálu z makro pohledu jsou dostačující.

5.3 Aproximace hysterezní křivky

Vzhledem k zavedení předpokladu, že se deformace mění lineárně s napětím, můžeme přechodovou plošnou část hysterezní křivky (Obr. 9) aproximovat a znázornit jako dvě lineární přímky se směrnici odpovídajícími modulu pružnosti v tahu: E^A a E^* . K jejich změně dochází po překročení napětí 250 Mpa – viz graf 1.

Youngův modul pružnosti lze definovat jako poměr napětí a jím vyvolané deformace, vyjádřené vztahem:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad 1$$

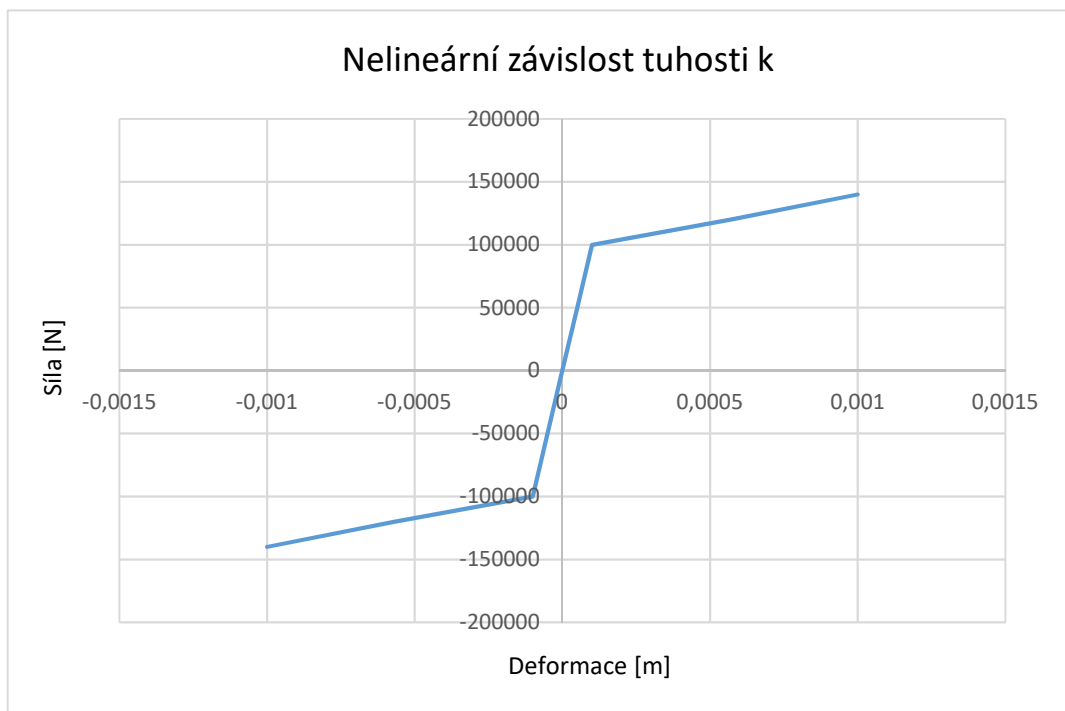


Graf 1 : Zjednodušení hysterezního chování materiálu dle předpokladu lineární elastické tuhosti

5.4 Neliarita soustavy

V tomto mechanismu podpěra z Nitinolu funguje jako komplexní pružina, která mění svoji tuhost v závislosti na deformaci. Nelineární závislost tuhosti je zobrazena grafem 2. Vzhledem k tomu, že hmotnost zátěže je mnohem větší než hmotnost podpěry, můžeme považovat pružinu za nehmotný člen.

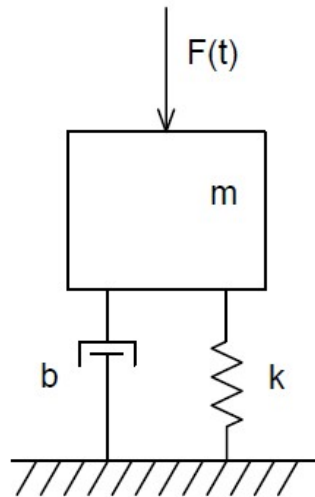
Změnou tuhosti vykazuje materiál žádané tlumící vlastnosti. Superelastické tlumící zařízení jsou předepjaty tak, aby dosahovaly tohoto zlomu nelineární křivky při provozních podmínkách a aby další neobvyklé stavy byly rozptýleny vlivem změny tuhosti materiálu.



Graf 2: Nelineární závislost tuhosti materiálu

6 REALIZACE MODELU

Na základě zjednodušení, prezentovaných v této kapitole, můžeme pro popis chování materiálu použít jednoduchý model kmitání s jedním stupněm volnosti, znázorněný na Obr. 10.



Obr. 10: Harmonicky buzený mechanický oscilátor (převzato z: [35] a upraveno)

Parametry x , \dot{x} a \ddot{x} představují polohu, rychlost a zrychlení kmitající soustavy. Polohu tělesa x o hmotnosti m určujeme vzhledem ke stabilní rovnovážné poloze. Působící budící sílu, závislou na čase označujeme $F(t)$, tuhost pružiny k a tlumení b [43].

Pohybová rovnice bude mít tvar:

$$m \cdot \ddot{x} + b \cdot \dot{x} + k \cdot x = F(t) \quad 2$$

neboli:

$$m \cdot \ddot{x} + 2b_p \cdot \dot{x} + \Omega_0^2 \cdot x = F(t) \quad 3$$

kde

$$\Omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad 4$$

je vlastní úhlová frekvence pro lineární kmitání.

Poměrný útlum je vyjádřen jako:

$$b_p = \frac{b}{2m\Omega_0} \quad 5$$

Pro technické aplikace uvažujeme, že budící síla je harmonickou funkcí času a lze ji vyjádřit jako:

$$F(t) = F_0 \cdot \sin(\omega t) \quad 6$$

Pro bezrozměrný parametr Q , tzv. faktor kvality platí:

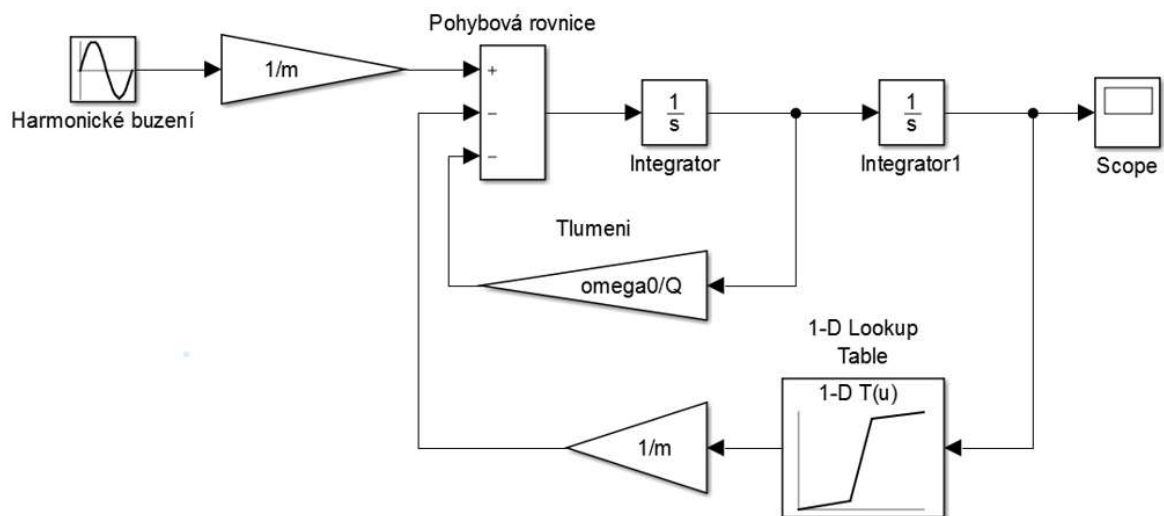
$$Q = \frac{1}{2b_p} \quad 7$$

Pro systémy se smart materiály je běžná hodnota $Q=50$ [1].

Výsledný tvar pohybové rovnice bude:

$$\ddot{x} + \frac{\Omega_0}{Q} \dot{x} + \frac{k}{m} x = \frac{F(t)}{m} \quad 8$$

Na základě této diferenciální rovnice je sestaven model v prostředí MATLAB/Simulink.



Obr. 11: Realizace modelu v prostředí MATLAB/Simulink

Materiál Nitinolu je předpokládán ve tvaru podpěry o daných rozměrech tak, aby při zatížení hmotností m dosahoval napětí 250 MPa a poměrné deformace přibližně 0,5 %, po jejímž překročení dochází ke změnám vlastností.

Tabulka 4: Vstupní parametry modelu

Veličina	Hodnota	Název
l [m]	0,0188	Výška
a [m]	0,02	Šířka
m [kg]	10194	Zátěž
E [GPa]	47	Modul pružnosti austenitu
Q [-]	50	Faktor kvality
ρ [kg/m ³]	6450	Hustota Nitinolu
g [m/s ²]	9,81	Tíhové zrychlení

Pomocné výpočty při řešení:

Průřez podpěry: $S = a \cdot a$ [m²]

Tíhová síla: $F = m \cdot g$ [N]

Napětí: $\sigma = \frac{F}{S}$ [Pa]

Stlačení podpěry: $x = \frac{F \cdot l}{E \cdot S}$ [m]

Hmotnost podpěry: $m_{\text{podpěry}} = \rho \cdot l \cdot S$ [kg]

Perioda kmitu: $T = \frac{2\pi}{\Omega_0}$ [s]

Frekvence kmitu: $f = \frac{1}{T}$ [Hz]

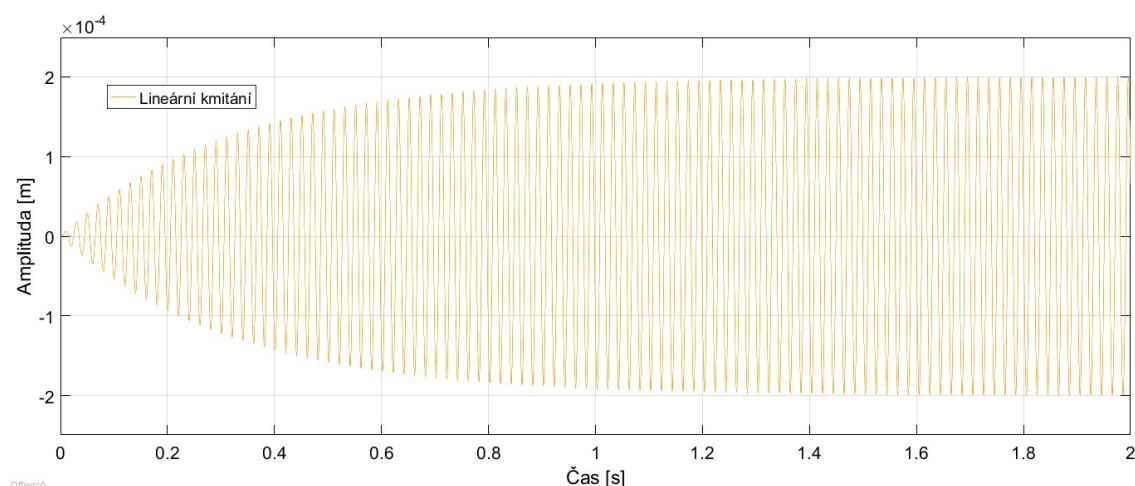
Poznámka k modelu: $m \gg m_{\text{podpěry}}$

7 VÝSLEDKY ŘEŠENÍ SOUSTAVY

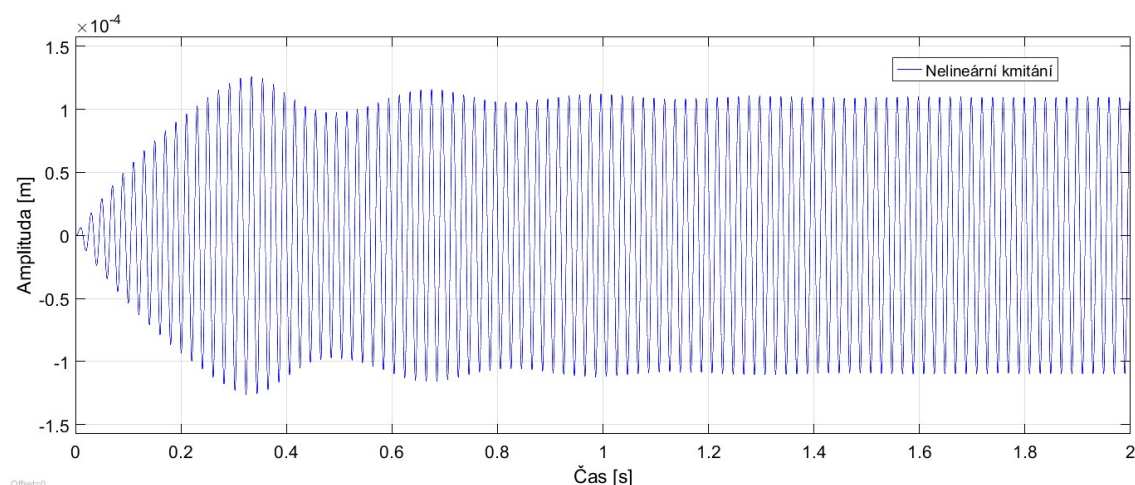
Dynamická analýza a návrh konstrukce pro tlumení nežádoucích kmitů využívá nelineárního chování materiálu – respektive změny tuhosti materiálu, ke které dochází po překročení napětí 250MPa a výchylky 0,0001m. Zlom křivek je znázorněn v kapitole 5 na grafech 1 a 2.

V této studii se zabýváme snížením ustáleného stavu kmitání buzeného harmonickou proměnnou silou. Nucené vibrace systému způsobují amplitudovou závislost v dynamickém chování, která je nelineární v důsledku hysterezní smyčky v křivce zatížení-deformace. Řešení je provedeno v prostředí Matlab/Simulink.

Pro řízení vibrací se zaměříme na konkrétní přechodovou oblast. Budeme porovnávat lineární řešení, pokud by nedošlo ke změně tuhosti materiálu, v kontrastu s nelineárním řešením, které vykazuje po překročení kritické výchylky utlumení z důvodu změny tuhosti k.



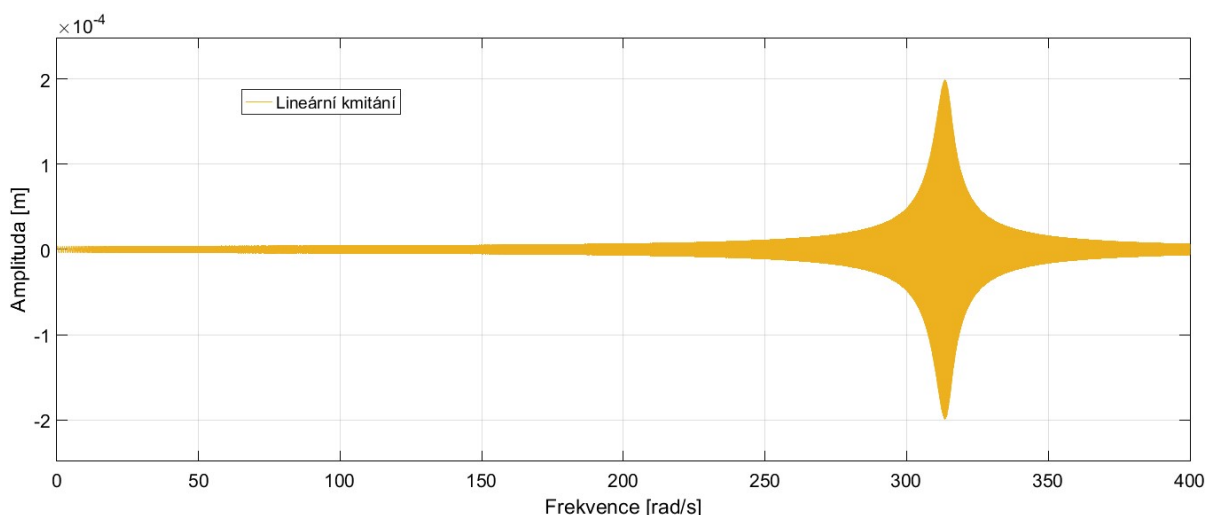
Graf 3: Výchylka kmitání v závislosti na čase pro lineární kmitání



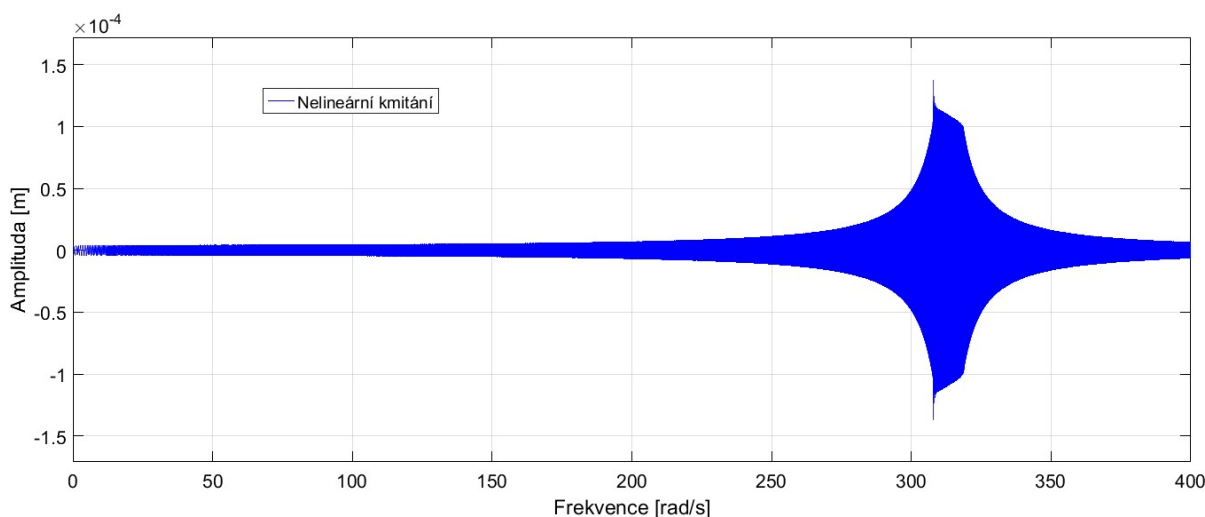
Graf 4: Výchylka kmitání v závislosti na čase pro nelineární kmitání

Amplitudová charakteristika lineárního kmitání je znázorněna grafem 3, kde je systém buzen harmonicky proměnnou silou 4000 N o frekvenci rovné vlastní frekvenci kmitání materiálu $\Omega_0 = 312,2 \text{ rad/s}$. V porovnání s nelineárním řešením, zobrazeným v grafu 4, dochází k utlumení téměř o polovinu. Děje se tak díky hystereznímu chování materiálu, kdy předepnutý materiál po překročení zlomu křivky napětí/deformace změni svoji tuhost a dochází k utlumení. V tomto případě vlivem nelineárního kmitání nedojde k ustálení na určité hodnotě ihned, ale dochází k poklesu a vzrůstu hodnot amplitudy po dobu přechodového děje. Tento jev označujeme jako zázněje.

Amplitudo-frekvenční charakteristika představuje závislost výchylky tělesa na úhlové frekvenci budící síly a pro lineární řešení je znázorněná grafem 5. Změna budící frekvence je realizovaná pomocí funkce CHIRP signal od 0 do 60 Hz. V oblasti frekvence budící síly, která je shodná s vlastní úhlovou frekvencí tělesa, dochází k výraznému navýšení. Tento jev označujeme jako rezonance.

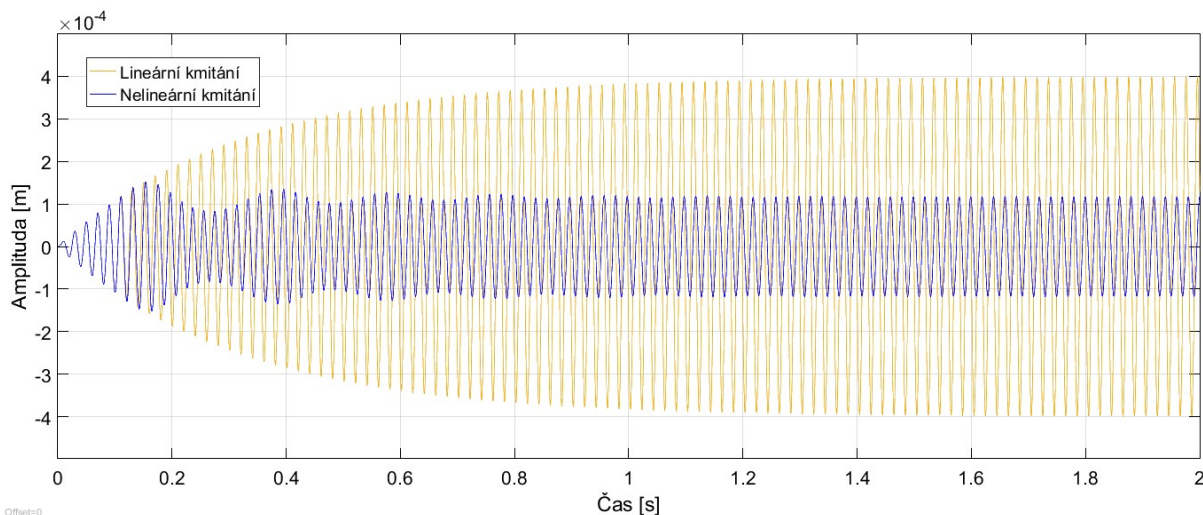


Graf 5: Amplitudo-frekvenční charakteristika lineárního kmitání



Graf 6: Amplitudo-frekvenční charakteristika nelineárního kmitání

Pro budící frekvence v rezonanční oblasti materiálu dochází při nelineárním řešení (graf 6) k významnému, téměř čtyřnásobnému snížení amplitudy kmitů. Tento fakt potvrzuje možnost využití Nitinolu pro účinné tlumení vibrací bez použití dalších doplňujících prvků.



Graf 5: Porovnání výchylek amplitudové charakteristiky lineárního a nelineárního řešení při budící síle 8000 N a frekvenci buzení Ω_0 .

Vlivem nelinearity se amplitudo-frekvenční charakteristika deformuje v závislosti na tvaru skeletové křivky [35]. V důsledku toho vznikají v určitých pásmech budících frekvencí oblasti nestability, kdy jedné frekvenci odpovídá více amplitud kmitání. V našem případě má křivka měknoucí charakter, ale ke k oblastím nestability řešení nedochází.

Při změně (zvětšení) amplitudy budící síly se změní (zvětší) výchylka v amplitudové charakteristice lineárního kmitání, jak můžeme vidět v grafu 7. Materiál SMA však funguje stejně a při zvyšující se amplitudě vibrací tedy dochází k ještě většímu tlumení materiálu a k zvýšení účinnosti tlumení.

ZÁVĚR

V první části práce byla provedena rešerše dostupných smart materiálů. Byly popsány piezoelektrické, elektro-reologické materiály a hlavní pozornost byla zaměřena na materiály s tvarovou pamětí, které mají pro technickou praxi nejlepší využití.

Za účelem zkoumání funkčnosti materiálu a popisu jeho chování z hlediska nelineárního kmitání byl navržen model. Přesné popsání chování materiálu s nelineárními charakteristikami je však velmi obtížné, a proto byla zavedena určitá zjednodušení. Na základě předpokladů uvažujeme při transformaci materiálu izotermické podmínky a změnu elastické tuhosti po částech lineární. Pohybové rovnice kmitání systému byly řešeny v modelovacím prostředí MATLAB/Simulink.

Následující část práce se zabývala nalezením rezonanční oblasti materiálu a jejím utlumením. Materiál byl předepnut tak, aby dosahoval zlomu křivky tuhosti a jakékoliv dodatečné (nepředvídatelné) vlivy byly změnou tuhosti utlumeny.

Rovněž byly vykresleny amplitudo-frekvenční charakteristiky kmitání soustavy pro lineární a nelineární řešení, při kterém po dosažení kritického napětí přechodem přes žádanou oblast hysterezní smyčky došlo k utlumení mechanismu a vychýlení z rezonance. Porovnáním těchto křivek byla zjištěna výrazná tlumící schopnost materiálu.

Při zvýšení amplitudy budící síly bylo na základě amplitudových charakteristik zjištěno, že v důsledku nelinearity tlumení je tlumící výkon závislý na amplitudě vibrací. S výraznější budící silou tedy dochází k většímu utlumení.

Absorpce energie materiálu Nitinol prokázala význačné charakteristiky tlumení vibrací, které lze využít v různých tlumících aplikacích. Dosažené výsledky práce by tak měly rozšířit představu o využití smart materiálů pro technickou praxi, konkrétně při použití slitin s tvarovou pamětí jako tlumících materiálů.

Na závěr je nutno zdůraznit, že předložený model pro simulaci nelineárních kmitů slouží primárně pro ilustraci hlavních rysů, metodiky modelování a schématu řešení nelineární pohybové rovnice v prostředí Simulink.

Metodika popisu nelineárního kmitání by mohla být v navazujících pracích rozšířena na případech složitějších konstrukcích, jako jsou kompozitní sendvičové nosníky s vloženými pseudoelastickými materiály SMA anebo dalšími možnostmi pasivního, či aktivního tlumení. Budoucí práce by také mohla zahrnout řešení teplotní změny při fázové transformaci materiálu.

BIBLIOGRAFIE

- [1] SCHWARTZ, Mel. *Smart materials*. 1. Boca Raton: CRC Press, 2009. ISBN 978-1-4200-4372-3.
- [2] ADDINGTON, D. Michelle. a Daniel L. SCHODEK. *Smart materials and new technologies: for the architecture and design professions*. Boston: Architectural Press, 2005. ISBN 0750662255.
- [3] KANG, Inpil, Yun Yeo HEUNG, Jay H. KIM et al. Introduction to carbon nanotube and nanofiber smart materials. *Composites Part B* [online]. Elsevier Ltd, 2006, **37**(6), 382-394 [cit. 2017-05-24]. DOI: 10.1016/j.compositesb.2006.02.011. ISSN 13598368. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S1359836806000114>
- [4] LEO, Donald J. *Engineering analysis of smart material systems*. Hoboken, N.J.: John Wiley & Sons, 2007. ISBN 0471684775.
- [5] PETRŽÍLKA, Václav. *Piezoelektrina a její technické použití*. 1. vyd. Praha: Nakladatelství Československé akademie věd, 1960.
- [6] *CeramTec: Piezokeramika* [online]. b.r. [cit. 2017-04-16]. Dostupné z: <http://www.ceramtec.cz/>
- [7] *APC International: APC MATERIALS* [online]. b.r. [cit. 2017-04-16]. Dostupné z: <https://www.americanpiezo.com/>
- [8] KOUKOLÍK, Václav. *Využití piezoelektrického jevu v praxi*. Plzeň, 2013. Diplomová práce. Vedoucí práce Doc. Ing. Eva Kučerová, CSc.
- [9] GODDARD, N. D. R., R. M. J. KEMP a R. LANE. An overview of smart technology. *Packaging Technology and Science* [online]. Chichester: John Wiley, 1997, **10**(3), 129-143 [cit. 2017-05-23]. DOI: 10.1002/(SICI)1099-1522(19970501/30)10:3129::AID-PTS3933.0.CO;2-C. ISSN 08943214. Dostupné z: [http://onlinelibrary.wiley.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/wol1/doi/10.1002/\(SICI\)1099-1522\(19970501/30\)10:3%3C129::AID-PTS393%3E3.0.CO/full](http://onlinelibrary.wiley.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/wol1/doi/10.1002/(SICI)1099-1522(19970501/30)10:3%3C129::AID-PTS393%3E3.0.CO/full)

- [10] HRADIL, A. *Návrh mikroaktuátoru s využitím SMART materiálů*. Brno, 2011. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D.
- [11] SCHWARTZ, Mel M. *Encyclopedia of smart materials*. New York: J. Wiley, 2002. ISBN 0471177806.
- [12] HONG, S R, S B CHOI, Y T CHOI a N M WERELEY. Non-dimensional analysis for effective design of semi-active electrorheological damping control systems. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering* [online]. SAGE Publications, 2003, **217**(12), 1095-1106 [cit. 2017-05-23]. DOI: 10.1243/09544070360729437. ISSN 09544070. Dostupné z: <http://search.proquest.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/docview/220693180?OpenUrlRefl d=info:xri/sid:primo&accountid=17115>
- [13] R STANWAY, . Applications of electro-rheological fluids in vibration control: a survey. *Smart Materials and Structures* [online]. 1996, **5**(4), 464-482 [cit. 2017-05-23]. DOI: 10.1088/0964-1726/5/4/011. ISSN 09641726. Dostupné z: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0964-1726/5/4/011/meta>
- [14] SEELECKE, Stefan. Modeling the dynamic behavior of shape memory alloys. *International Journal of Non-Linear Mechanics* [online]. Elsevier Ltd, 2002, **37**(8), 1363-1374 [cit. 2017-05-06]. DOI: 10.1016/S0020-7462(02)00030-6. ISSN 00207462.
- [15] ÖLANDER, Arne. AN ELECTROCHEMICAL INVESTIGATION OF SOLID CADMIUM-GOLD ALLOYS. *Journal of the American Chemical Society* [online]. 1932, **54**(10), 3819-3833 [cit. 2017-04-09]. DOI: 10.1021/ja01349a004. ISSN 00027863.
- [16] JACKSON, Curtis M, Roman Jerzy WASILEWSKI a H. J WAGNER. UNITED STATES. *55-Nitinol--the alloy with a memory: its physical metallurgy, properties, and applications*. Technology Utilization Office, National Aeronautics and Space Administration; for sale by the Supt. of Docs., U.S. Govt. Print. Off., 1972.
- [17] KERRIGAN, C A, K K HO, K P MOHANCHANDRA a G P CARMAN. Sputter deposition and analysis of thin film Nitinol/Terfenol-D multilaminate for vibration damping. *Smart Materials and Structures* [online]. 2009, **18**(1), 015007 [cit. 2017-05-21]. DOI: 10.1088/0964-1726/18/1/015007. ISSN 09641726. Dostupné z: <http://iopscience.iop.org.ezproxy.lib.vutbr.cz/article/10.1088/0964-1726/18/1/015007/meta;jsessionid=D8373B5DEC3BAD4F2BFBEB82CEA09C9F.c4.iopscience.cld.iop.org>

- [18] *Shape memory and superelastic alloys: Applications and technologies* [online]. Elsevier, 2011 [cit. 2017-05-15]. Dostupné z: https://books.google.cz/books?hl=cs&lr=&id=Dx5tAgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Shape+memory+and+superelastic+alloys+Yamauchi+Ohkata&ots=vhm5hiUZ2G&sig=ZkeyCSCUF3tuM1H11TdPAebtcs0&redir_esc=y#v=onepage&q=Shape%20memory%20and%20superelastic%20alloys%20Yamauchi%20Ohkata&f=false
- [19] LAGOUDAS, Dimitris C. *Shape memory alloys: modeling and engineering applications*. New York: Springer, 2008. ISBN 9780387476841.
- [20] PILCH, Jan. *Studium funkčních vlastností tenkých vláken NiTi pro aplikace v smart strukturách a textiliích*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2011. Dizertační práce. Vedoucí práce Prof. RNDr. JAROSLAV POKLUDA, CSc.
- [21] OTSUKA, K. a X. REN. Physical metallurgy of Ti–Ni-based shape memory alloys. *Progress in Materials Science* [online]. Elsevier Ltd, 2005, **50**(5), 511-678 [cit. 2017-05-21]. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2004.10.001. ISSN 00796425.
- [22] LAGOUDAS, Dimitris, Darren HARTL, Yves CHEMISKY, Luciano MACHADO a Peter POPOV. Constitutive model for the numerical analysis of phase transformation in polycrystalline shape memory alloys. *International Journal of Plasticity* [online]. Elsevier Ltd, 2011, **32-33**, 155-183 [cit. 2017-05-18]. DOI: 10.1016/j.ijplas.2011.10.009. ISSN 07496419.
- [23] ŠESTÁK, Petr. *Strukturní a mechanické charakteristiky slitiny NiTi stanovené ab-initio metodami*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2009.
- [24] MOHD JANI, Jaronie, Martin LEARY, Aleksandar SUBIC at al Mark A. GIBSON. A review of shape memory alloy research, applications and opportunities. *Materials and Design* [online]. Elsevier Ltd, 2013, **56**(4), 1078-1113 [cit. 2017-05-21]. DOI: 10.1016/j.matdes.2013.11.084. ISSN 02613069. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0261306913011345>
- [25] WORDEN, K a J. Bullough HAYWOOD. *Smart Technologies* [online]. 1. River Edge: World Scientific Publishing Company, 2003 [cit. 2017-05-21]. DOI: 10.1142/4832. ISBN 9789812705310. Dostupné z: http://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpST000006/viewerType:toc/root_slug:smart-technologies

- [26] JOSEPH CHIODO, a NICK JONES. *Smart materials use in active disassembly*. b.r., , 8-24. DOI: 10.1108/01445151211198683. Dostupné také z: <http://www.emeraldinsight.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/doi/full/10.1108/01445151211198683>
- [27] MOHR, R., K. KRATZ, T. WEIGEL, M. LUCKA-GABOR, M. MONEKE a A. LENDLEIN. Initiation of Shape-Memory Effect by Inductive Heating of Magnetic Nanoparticles in Thermoplastic Polymers. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* [online]. National Academy of Sciences, 2006, **103**(10), 3540-3545 [cit. 2017-05-23]. DOI: www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.0600079103. ISSN 00278424. Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1383650/>
- [28] HU, Jinlian, Yong ZHU, Huahua HUANG a Jing LU. Recent advances in shape-memory polymers: Structure, mechanism, functionality, modeling and applications. *Progress in Polymer Science* [online]. Elsevier Ltd, 1212, **37**(12), 1720-1763 [cit. 2017-05-23]. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2012.06.001. ISSN 00796700. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0079670012000706>
- [29] HUANG, W., S. PELLEGRINO a D.P. BASHFORD. Shape memory alloy actuators for deployable structures. *European Space Agency, (Special Publication) ESA SP* [online]. 1996, (386), 53-61 [cit. 2017-05-21]. ISSN 03796566.
- [30] KURSA, M., PACHOLEK, P. *Metalurgické charakteristiky tvarově paměťových materiálů na bázi Ni-Ti. 11. mezinárodní metalurgická konference METAL 2002. Ostrava, Tanger s.r.o., 2002, Paper No. 137. ISBN 80-85988-48-8.* b.r.
- [31] SONG, G., N. MA a H.-N. LI. Applications of shape memory alloys in civil structures. *Engineering Structures* [online]. Elsevier Ltd, 2006, **28**(9), 1266-1274 [cit. 2017-05-19]. DOI: 10.1016/j.engstruct.2005.12.010. ISSN 01410296. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0141029606000344>
- [32] JOSIEK, Robert. *Paměťové materiály*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2010.
- [33] WILDE, Krzysztof, Paolo GARDONI a Yozo FUJINO. Base isolation system with shape memory alloy device for elevated highway bridges. *Engineering Structures* [online]. Elsevier Ltd, 2000, **22**(3), 222-229 [cit. 2017-05-21]. DOI: 10.1016/S0141-0296(98)00097-2. ISSN 01410296. Dostupné z:

<http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0141029698000972>

- [34] VAN HUMBEECK, Jan a Sergey KUSTOV. Active and passive damping of noise and vibrations through shape memory alloys: applications and mechanisms. *Smart Materials and Structures* [online]. 2005, **14**(5), 171-185 [cit. 2017-05-19]. DOI: 10.1088/0964-1726/14/5/001. ISSN 09641726. Dostupné z: <http://iopscience.iop.org.ezproxy.lib.vutbr.cz/article/10.1088/0964-1726/14/5/001/meta>
- [35] *TECHNICKÉ KMITÁNÍ* [online]. 2012 [cit. 2017-05-14]. ISBN Jan Ondrouch, Jiří Podešva. Dostupné z: <chrome-extension://oemmndcblldboiebfnladdacbfmadadm/http://projekty.fs.vsb.cz/147/uc ebniopory/978-80-248-2762-9.pdf>
- [36] SLAVÍK, Jaromír. *POČÍTAČOVÉ METODY MECHANIKY* [online]. Brno, 2001 [cit. 2017-05-17]. Dostupné z: <http://www.umt.fme.vutbr.cz/img/fckeditor/file/opory/slavik/POCME.HTML>
- [37] HILDEBRAND, M. Vibration damping. *Adhesive Bonding: Science, Technology and Applications*. Elsevier Inc, 2005, s. 240-253. DOI: 10.1533/9781845690755.2.241. ISBN 9781855737419.
- [38] QIU, Ying, Marcus YOUNG a Xu NIE. Influence of Dynamic Compression on Phase Transformation of Martensitic NiTi Shape Memory Alloys. *Metallurgical and Materials Transactions A* [online]. New York: Springer US, 1510, **46**(10), 4661-4668 [cit. 2017-05-25]. DOI: 10.1007/s11661-015-3063-5. ISSN 10735623. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11661-015-3063-5>
- [39] MARINO, Michele. An ideal model for stress-induced martensitic transformations in shape-memory alloys. *Frattura ed Integrità Strutturale* [online]. Cassino: Gruppo Italiano Frattura, 2014, (29), 96-110 [cit. 2017-05-06]. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.29.10. Dostupné z: http://www.gruppofrattura.it/pdf/rivista/numero29/numero_29_art_10.pdf
- [40] SONG, G., N. MA a H.-N. LI. Applications of shape memory alloys in civil structures. *Engineering Structures* [online]. Elsevier Ltd, 2006, **28**(9), 1266-1274 [cit. 2017-05-18]. DOI: 10.1016/j.engstruct.2005.12.010. ISSN 01410296.
- [41] MODELS FOR SHAPE MEMORY ALLOY BEHAVIOR: AN OVERVIEW OF MODELING APPROACHES. *International Journal of Structural Changes in Solids*, [online]. 2009, **1**(1), 111-148 [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <https://journals.tdl.org/ijscs/index.php/ijscs/article/view/2318>

- [42] *A coupled thermomechanical model for shape memory alloys: A coupled thermomechanical model for shape memory alloys* [online]. 2008, , 481–48225389–394 [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092150930701547X>
- [43] BREPTA, Rudolf, Ladislav PŮST a František TUREK. *Mechanické kmitání*. 1. vyd. Praha: Sobotáles, 1994, 589 s. : il. ISBN 8090168485.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka	Popis
B19'	Ortorombická struktura martenzitu
B2	Uspořádaná struktura austenitu
SMA	Shape memory alloys – slitiny s tvarovou pamětí
SMP	Shape memory polymers – polymery s tvarovou pamětí
Nitinol	Komerční název pro slitinu niklu a titanu

Značka	Název	Jednotka
A	Amplituda kmitání	[m]
b	Koeficient tlumení	[Ns ² /m ²]
b _p	Poměrný útlum	[-]
k	Koeficient tuhosti	[N/m]
ω	Frekvence buzení	[rad/s]
Ω ₀	Vlastní frekvence lineárního kmitání	[rad/s]
m	hmotnost	[kg]
E	Youngův modul pružnosti	[Pa]
Q	Faktor kvality	[-]
σ	Napětí	[Pa]
ε	Poměrná deformace	[m]
T	Perioda	[s]
f	Frekvence	[Hz]
ρ	Hustota	[kg/m ³]

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 : Zjednodušení hysterezního chování materiálu dle předpokladu lineární elastické tuhosti.....	26
Graf 2: Nelineární závislost tuhosti materiálu	27
Graf 3: Výchylka kmitání v závislosti na čase pro lineární kmitání.....	31
Graf 4:Výchylka kmitání v závislosti na čase pro nelineární kmitání	31
Graf 5: Amplitudo-frekvenční charakteristika lineárního kmitání	32
Graf 6: Amplitudo-frekvenční charakteristika nelineárního kmitání	32
Graf 7: Porovnání výchylek amplitudové charakteristiky lineárního a nelineárního řešení při budící síle 8000 N a frekvenci buzení Ω_0	33

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Vznik náboje: a) stlačení - podélný jev a b) roztažení elementární krystalové buňky - příčný jev (převzato z: [5]).....	13
Obr. 2: Schématické znázornění změny tvaru buňky při martenzitické přeměně vlivem teploty (převzato z: [18] a upraveno).....	15
Obr. 3: Schéma martenzitické transformace (převzato z: [21] a upraveno).....	16
Obr. 4: Princip paměťového efektu ve slitinách SMA (převzato z: [23])	17
Obr. 5: Křivky napětí a deformace pro a) efekt tvarové paměti, b) superelastické chování (převzato z: [18] a upraveno).....	18
Obr. 6: Struktury slitiny NiTi při martenzitické přeměně a) martenzitická B19', b) austenitická B2 (převzato z: [23]).....	20
Obr. 7: Změna transformační teploty dle obsahu Ni (převzato z: [18] a upraveno).....	21
Obr. 8: Rozdíl mezi běžným aktuátorem a Nitinolovým vláknem (převzato z: [32])....	22
Obr. 9: Hysterezní křivka materiálu NiTi při $T=30^{\circ}\text{C}$ (převzato z: [19] a upraveno)....	25
Obr. 10: Harmonicky buzený mechanický oscilátor (převzato z: [35] a upraveno).....	28
Obr. 11: Realizace modelu v prostředí MATLAB/Simulink.....	29

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Přehled běžných materiálů s tvarovou pamětí (převzato z: [29] a upraveno)	19
Tabulka 2: Srovnání vlastností slitiny NiTi a CuZnAl (převzato z: [18] a upraveno) ...	20
Tabulka 3: Chemické a fyzikální vlastnosti NiTi (převzato z: [30] a upraveno)	21
Tabulka 4: Vstupní parametry modelu	30