



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta strojní



Numerické simulace odezvy MRE

Diplomová práce

Studijní program:

M2301 Strojní inženýrství

Studijní obor:

Aplikovaná mechanika – inženýrská mechanika

Autor práce:

Štěpán Votápek

Vedoucí práce:

doc. Ing. Iva Petříková, Ph.D.

Katedra mechaniky, pružnosti a pevnosti





Zadání diplomové práce

Numerické simulace odezvy MRE

Jméno a příjmení: **Štěpán Votápek**
Osobní číslo: S16000028
Studijní program: M2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: Aplikovaná mechanika – inženýrská mechanika
Zadávající katedra: Katedra mechaniky, pružnosti a pevnosti
Akademický rok: **2020/2021**

Zásady pro vypracování:

Na základě analytických metod mechaniky a metody konečných prvků stanovte odezvu na dynamické a kvazistatické zatěžování jednoduchých struktur obsahujících vrstvy z magnetoreologického elastomeru (MRE) při různých frekvencích a při různých úrovních magnetického pole. Použijte dané materiálové parametry MRE.

Rozsah grafických prací: dle potřeby
Rozsah pracovní zprávy: cca 40 stran
Forma zpracování práce: tištěná/elektronická
Jazyk práce: Čeština



Seznam odborné literatury:

NAM, Tran Huu; PETRÍKOVÁ, Iva; MARVALOVÁ, Bohdana. Experimental characterization and viscoelastic modeling of isotropic and anisotropic magnetorheological elastomers. *Polymer Testing*, 2020, 81: 106272.

NAM, T. H.; PETRIKOVÁ, I.; MARVALOVÁ, B. Experimental and numerical research of dynamic mechanical properties of magneto-sensitive elastomeric composites. In: *Constitutive Models for Rubber XI: Proceedings of the 11th European Conference on Constitutive Models for Rubber (ECCMR 2019), June 25-27, 2019, Nantes, France*. CRC Press, 2019. p. 138.

NAM, Tran Huu; PETRÍKOVÁ, Iva; MARVALOVÁ, Bohdana. Experimental and numerical research of stress relaxation behavior of magnetorheological elastomer. *Polymer Testing*, 2021, 93:106886. Aplikační návody sw Comsol Multiphysics

Vedoucí práce: doc. Ing. Iva Petříková, Ph.D.
Katedra mechaniky, pružnosti a pevnosti

Datum zadání práce: 23. listopadu 2020
Předpokládaný termín odevzdání: 23. května 2022

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan

L.S.

doc. Ing. Iva Petříková, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 31. října 2020

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má diplomová práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

28. dubna 2022

Štěpán Votápek

Abstrakt

Cílem práce je simulace chování magnetoreologického materiálu v programu COMSOL Multiphysics. Tento kompozit reaguje na magnetické pole změnou vlastností. Pro výpočty je používán kompozit složený ze silikonové pryže a mikročástic karbonylového železa. Pro jeho matematický popis je využito funkce volné energie. Namáhání je mechanické nebo pomocí magnetických sil. Porovnáno je chování v příčném a podélném směru magnetického pole s kvazistatickým namáháním. Při dynamickém namáhání je zkoumáno viskoelastické chování materiálu. Je znázorněna relaxace napětí ve vzorku a reakce na stlačení a uvolnění materiálu.

Klíčová slova: magnetoreologický elastomer, metoda konečných prvků, modelování viskoelastivity, relaxace napětí

Abstract

The aim of the thesis is a simulation of magnetorheological material's behaviour in COMSOL Multiphysics software. The composite reacts to a magnetic field with changing its properties. The simulation uses a composite made of silicone rubber and carbonyl iron particles. Its mathematical description applies a free energy function. The loading is mechanical or using magnetic forces. There is a comparison of behaviour with quasi-static loading between horizontal and vertical magnetic field. The effect of viscoelastic property of the material is researched during dynamic loading. There is an illustration of stress relaxation in a specimen and a reaction to compression and decompression of the material.

Key words: magnetorheological elastomer, finite element method, viscoelastic modelling, stress relaxation

Obsah

| | |
|---|-----------|
| Přehled označení veličin a zkratk | 6 |
| Seznam obrázků | 8 |
| Seznam tabulek | 9 |
| 1. Úvod | 10 |
| 2. Magnetoreologické elastomery | 11 |
| 2.1 Výroba MRE | 12 |
| 3. Viskoelastická | 13 |
| 4. Matematický model materiálu | 15 |
| 5. Tvorba modelu v COMSOL Multiphysics pro statické namáhání | 17 |
| 5.1 Založení nového modelu | 17 |
| 5.2 Úprava modelu pro dynamické namáhání..... | 21 |
| 6. Výsledky simulace | 25 |
| 6.1 Hyperelastický materiál | 25 |
| 6.1.1 Horizontální magnetické pole bez mechanického zatížení | 26 |
| 6.1.2 Horizontální magnetické pole s mechanickým zatížením..... | 28 |
| 6.1.3 Vertikální magnetické pole bez mechanického zatížení | 29 |
| 6.1.4 Vertikální magnetické pole s mechanickým zatížením..... | 32 |
| 6.1.5 Porovnání směrů magnetických polí | 34 |
| 6.1.6 Magnetické siločáry | 36 |
| 6.2 Relaxace materiálu | 40 |
| 7. Závěr | 44 |
| Seznam použité literatury | 45 |

Přehled označení veličin a zkratk

| | | |
|-----------------------|--|-------|
| α | magnetická konstanta materiálu | [-] |
| β | magnetická konstanta materiálu | [-] |
| b | levý Cauchy-Greenův tenzor | |
| B | vektor magnetické indukce | |
| C | pravý Cauchy-Greenův tenzor | |
| C_{10} | hyperelastická konstanta materiálu | [Pa] |
| C_{01} | hyperelastická konstanta materiálu | [Pa] |
| det | determinant matice | |
| E^c | konzervativní modul | [Pa] |
| E^{cc} | ztrátový modul | [Pa] |
| ε | relativní přetvoření | [-] |
| ε_0 | počáteční relativní přetvoření | [-] |
| F | tenzor deformačního gradientu | |
| F⁻¹ | inverzní matice deformačního gradientu | |
| g | charakteristická amplituda | [-] |
| Grad | gradient matice | |
| I_{1-6} | první až šestý invariant | |
| I_{1m} | modifikovaný první invariant | |
| I_{2m} | modifikovaný druhý invariant | |
| J | jacobián | [-] |
| κ | objemový modul | [Pa] |
| MRE | magnetoreologický elastomer | |
| μ | permeabilita vakua | [H/m] |
| σ | napětí | [Pa] |
| σ_0 | počáteční napětí | [Pa] |
| t | čas | [s] |
| t_0 | počáteční čas | [s] |
| $\tan \delta$ | ztrátový úhel | [-] |
| tr | stopa matice | |
| τ | čas relaxace | [s] |
| x | vektor prostorových souřadnic | |
| X | vektor materiálových souřadnic | |

| | | |
|-----------------------|--|------|
| χ | vektor předpokládaného pohybu | |
| Ω | celková volná energie | [Pa] |
| Ω_{iso} | hustota izochorické energie přetvoření | [Pa] |
| Ω_{m} | hustota magnetické energie přetvoření | [Pa] |
| Ω_{vol} | hustota objemové energie přetvoření | [Pa] |

Seznam obrázků

| | |
|---|----|
| Obr. 1 Izotropní struktura MRE pod mikroskopem (Nam, 2021) | 11 |
| Obr. 2 Závislost napětí na poměrném prodloužení v elastickém a viskoelastickém materiálu (Zhang, 2021) | 13 |
| Obr. 3 Creep (Zhang, 2021)..... | 14 |
| Obr. 4 Relaxace (Zhang, 2021)..... | 14 |
| Obr. 5 Geometrie modelu | 19 |
| Obr. 6 Detail výpočetní sítě | 20 |
| Obr. 7 Průběh namáhání | 22 |
| Obr. 8 Upravená výpočetní síť | 23 |
| Obr. 9 Deformace vzorku s volnou horní stranou (0,5 T)..... | 26 |
| Obr. 10 Napětí při horizontálním magnetickém poli bez mechanického zatížení | 27 |
| Obr. 11 Deformace vzorku s pevnou horní stranou (0,5 T)..... | 27 |
| Obr. 12 Deformace vzorku s volnou horní stranou při mech. zatížení (0,5 T)..... | 28 |
| Obr. 13 Deformace vzorku s pevnou horní stranou při mech. zatížení (0,5 T) | 29 |
| Obr. 14 Napětí při horizontálním magnetickém poli s mechanickým zatížením..... | 29 |
| Obr. 15 Deformace vzorku s volnou horní stranou při mech. zatížení (0,5 T)..... | 30 |
| Obr. 16 Deformace vzorku s pevnou horní stranou (0,5 T)..... | 31 |
| Obr. 17 Napětí při vertikálním magnetickém poli bez mechanického zatížení | 31 |
| Obr. 18 Deformace vzorku s volnou horní stranou při mech. zatížení (0,5 T)..... | 32 |
| Obr. 19 Deformace vzorku s pevnou horní stranou při mech. zatížení (0,5 T) | 33 |
| Obr. 20 Napětí při vertikálním magnetickém poli s mechanickým zatížením | 33 |
| Obr. 21 Porovnání napětí způsobených různými směry mag. pole – volná strana | 34 |
| Obr. 22 Porovnání napětí způsobených různými směry mag. pole – pevná strana | 35 |
| Obr. 23 Magnetické siločáry – horizontální pole bez mechanického zatížení (0,5 T) .. | 36 |
| Obr. 24 Magnetické siločáry – horizontální pole s mechanickým zatížením (0,5 T).... | 37 |
| Obr. 25 Magnetické siločáry – vertikální pole bez mechanického zatížení (0,5 T) | 37 |
| Obr. 26 Magnetické siločáry – vertikální pole s mechanickým zatížením (0,5 T)..... | 38 |
| Obr. 27 Rozdíl hustot magnetického toku – horizontální pole | 38 |
| Obr. 28 Rozdíl hustot magnetického toku – vertikální pole | 39 |
| Obr. 29 Průběh napětí při viskoelasticitě..... | 40 |
| Obr. 30 Relaxace – průběh napětí při 0 T | 41 |
| Obr. 31 Relaxace – napětí v závislosti na stlačení při 0 T | 42 |
| Obr. 32 Relaxace – napětí v závislosti na stlačení při 0,4 T | 42 |
| Obr. 33 Napětí při poloviční rychlosti zatěžování | 43 |

Seznam tabulek

| | |
|--|----|
| Tab. 1 Vstupní parametry modelu..... | 17 |
| Tab. 2 Hodnoty konstant hyperelastického materiálu..... | 21 |
| Tab. 3 Hodnoty viskoelastických konstant | 23 |

1. Úvod

Magnetoreologické elastomery (MRE) jsou kompozitní materiály, které jsou citlivé na magnetické pole. Tím dochází ke změnám jejich mechanických vlastností, jakým je například tlumení. Takové materiály se používají k výrobě izolátorů vibrací nebo aktivních tlumičů. Proto mají velký potenciál v řadě odvětví, např. automobilovém průmyslu.

První část práce seznamuje se základními vlastnostmi, rozdíl mezi izotropními a anizotropními MRE a popisuje jejich výrobu. Dále je vysvětlena viskoelasticita, která ovlivňuje chování těchto materiálů v průběhu času. Nakonec jsou ukázány rovnice, díky nimž lze chování MRE vyjádřit matematickými vztahy. Ty jsou potřebné pro simulace v softwaru používajícím metodu konečných prvků.

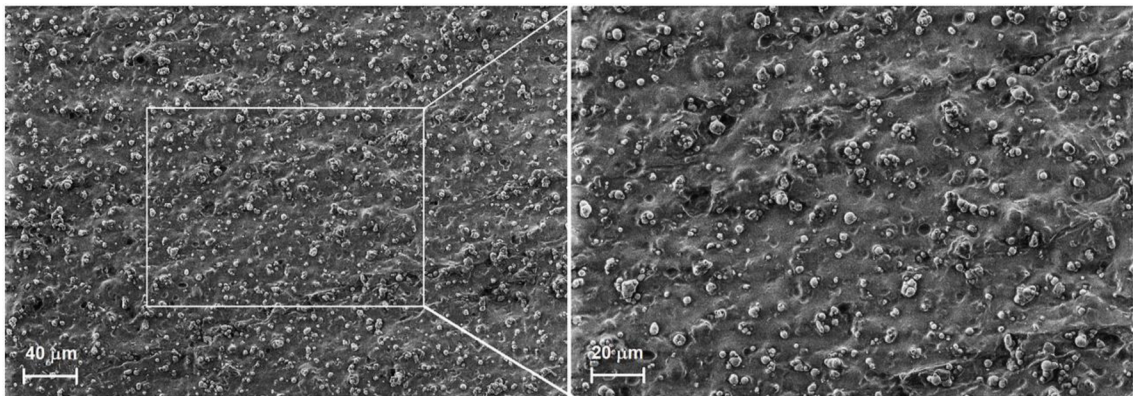
V druhé části se popisuje tvorba modelu pro simulace. Nejprve je vytvořen model pro kvazistatické namáhání. Pro simulace byl zvolen vzorek čtvercového tvaru z izotropního magnetoreologického materiálu. Zkoumají se vlivy magnetického pole na vzorek bez mechanického namáhání, poté se smykovým zatížením, které je definováno pomocí deformace, která činí 1,6 mm. Magnetické pole se liší v závislosti na svém směru – horizontální a vertikální. Magnetismus působí na mikročástice karbonylového železa, které způsobují změny chování materiálu při jeho působení. Následně je program upraven pro dynamické namáhání, při kterém se zkoumá viskoelasticita materiálu.

V závěrečné části jsou demonstrovány výsledky simulace. Ty jsou rozříděny podle typu magnetického pole a deformování vzorku. Následuje jejich porovnání a ukázka tvaru magnetických siločar. Nakonec se zkoumá vliv viskoelastického chování MRE.

2. Magnetoreologické elastomery

Elastomery obecně jsou typem plastů, které mají schopnost se výrazně elasticky deformovat při běžných teplotách.

Magnetoreologické elastomery (MRE), také označované jako magnetosenzitivní, jsou kompozity tvořené polymerní maticí vyplněnou mikročásticemi karbonylového železa. Materiály používané pro výrobu matice jsou přírodní, silikonové nebo pěnové pryže. Mikročástice mohou být v elastomeru rozptýleny náhodně – izotropní MRE, nebo uspořádány do vláknových a sloupcových struktur – anizotropní MRE. Pravidelné uspořádání částic je znázorněno na **Obr. 1**.



Obr. 1 Izotropní struktura MRE pod mikroskopem (Nam, 2021)

Výhodou MRE při jejich aplikaci je možnost plynule ovládat pomocí magnetického pole jejich modul pružnosti ve smyku (Gong et al., 2005). Při namáhání jsou částice donuceny opustit stav s nízkou energií, a proto je nutná dodatečná práce pro vyvolání deformace. Bylo zjištěno (Jolly, 1996), že maximální navýšení modulu pružnosti ve smyku je přibližně 50-60 % oproti modulu, který má materiál, když na něj nepůsobí žádné magnetické pole.

Možnost úpravy vlastností MRE byla v praxi využita např. při výrobě izolátoru vibrací (Bastola & Li, 2018). Při působení kombinace magnetického pole 520 mT a předpětí se zvýšila tuhost materiálu několikanásobně. Toto zjištění může vést k vyvinutí nových vysoce adaptovatelných izolačních systémů využívajících MRE.

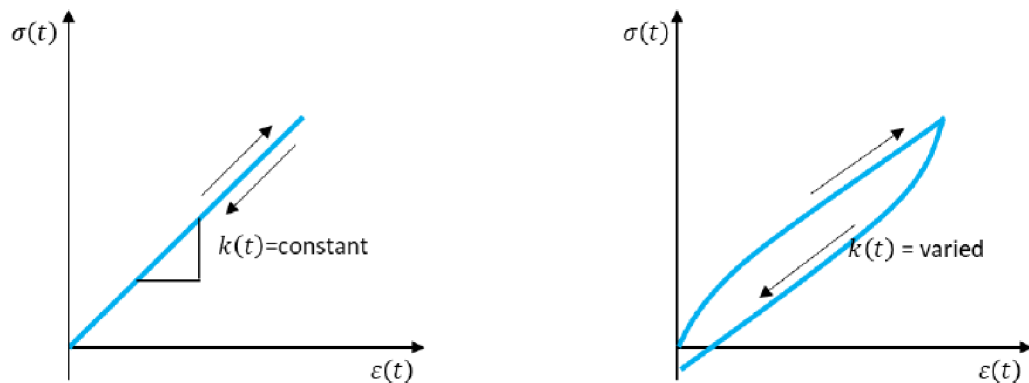
2.1 Výroba MRE

Výrobu MRE popisuje ve svém článku Nam (2021). Byly použity tekutý silikon ZA13, jeho katalyzátor a železné mikročástice (typ 44,890), které měly průměr 2-5 μm . Na začátku se smíchaly v poměru 1:1 silikon a katalyzátor. Poté byly přidány mikročástice, aby jejich objemový zlomek činil 27 %. Tato směs byla zamíchána ve skleněné nádobě a ponechána 15 minut v komoře s vakuem, aby se odstranily vzduchové bubliny, jež zůstaly uvnitř materiálu při míchání. Následně se směs přelila do plastové nádoby a opět byla nechána ve vakuu na 10 minut kvůli zbytkům vzduchu ve hmotě. Nakonec se nechala forma 24 hodin při pokojové teplotě uvnitř komory už bez zajišťování vakua. To zaručilo izotropní strukturu MRE.

Jsou-li částice uvnitř materiálu uspořádány náhodně, považujeme takový elastomer za izotropní. To znamená, že vlastnosti elastomeru jsou ve všech směrech stejné. Pokud jsou struktury uvnitř usměrněné působením magnetického pole v průběhu tuhnutí kaučuku, materiál je anizotropní. Platí, že díky uspořádanosti roste magnetoreologický efekt. Pro zlepšení tohoto efektu se využívá pórovitých struktur, přidání magnetických nanočástic nebo uhlíkových nanotrubelek (Vlach, 2009).

3. Viskoelasticita

Polymery vykazují časovou závislost některých svých vlastností při namáhání. Pro znázornění lze použít **Obr. 2**. Vlevo je čistě elastický materiál. U něho se po zatížení vrací závislost napětí na poměrném prodloužení při odlehčování po stejné křivce. Napravo je graf pro viskoelastický materiál. Závislost veličin přestává být lineární. Při odlehčení se dokonce ani nevrací po stejné křivce – napětí klesá rychleji. Pro pochopení chování takovýchto materiálů je nutné provést různé testy pro zjištění jejich chování např. creep, relaxace (Zhang, 2021).



Obr. 2 Závislost napětí na poměrném prodloužení v elastickém a viskoelastickém materiálu (Zhang, 2021)

U viskoelastických materiálů se určuje tzv. dynamický modul. Ten se skládá ze dvou složek – konzervativního (storage) a ztrátového (loss) modulu. Konzervativní modul (E') vyjadřuje elastické vlastnosti materiálu závislé na frekvenci. Ztrátový modul (E'') odpovídá disipační energii. Vztah mezi těmito dvěma moduly je vyjádřen pomocí ztrátového úhlu ($\text{tg } \delta$). Experimentálně se tyto hodnoty dají zjistit pomocí dynamické mechanické analýzy (DMA).

$$E' = \frac{\sigma}{\varepsilon} \cos \delta \quad (3.1)$$

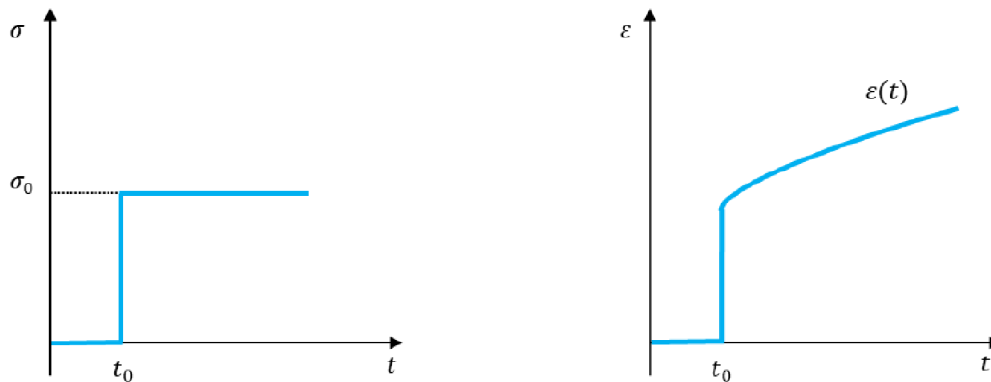
$$E'' = \frac{\sigma}{\varepsilon} \sin \delta \quad (3.2)$$

$$\text{tg } \delta = \frac{E''}{E'} \quad (3.3)$$

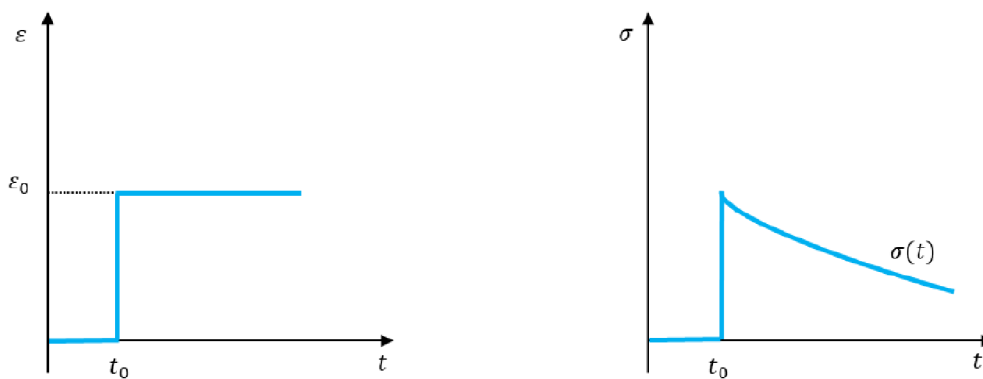
Z předchozích rovnic se dá odvodit, že je-li δ rovno 0° , jedná se o čistě elastický materiál. Pokud má δ hodnotu 90° , je materiál čistě viskózní. Pro hodnoty mezi 0° a 90° se jedná o viskoelastický materiál.

Při namáhání viskoelastického materiálu může docházet k jevu, který se označuje creep. Ten se projevuje jako pomalá deformace při působení neměnného napětí (**Obr. 3**). Při testování se v počátečním čase t_0 skokově zvýší hodnota napětí a zkoumá se změna relativního prodloužení v čase.

Dalším chováním je relaxace, při které dochází ke snižování napětí uvnitř materiálu za konstantní deformace (**Obr. 4**). Pro zjištění se materiál na počátku skokově deformuje a zaznamenává se časová změna napětí ve vzorku.



Obr. 3 Creep (Zhang, 2021)



Obr. 4 Relaxace (Zhang, 2021)

4. Matematický model materiálu

MRE je hyperelastický materiál – toto označení se používá u materiálů, které vykazují velké deformace. Závislost deformace na napětí není lineární. Pro její popis se využívá funkce hustoty deformační energie.

Pro simulaci MRE je nutné matematicky popsat jeho vlastnosti. Základem jsou rovnice z mechaniky kontinua. Předpokládaný pohyb označíme χ . V rovnicích figurují vektory materiálových \mathbf{X} a prostorových \mathbf{x} souřadnic. Lze definovat tenzor deformačního gradientu \mathbf{F} (4.1) a jacobíán J (4.2).

$$\mathbf{F} = \text{Grad}\chi, \quad F_{ia} = \frac{\partial x_i}{\partial X_a} \quad (4.1)$$

$$J = \det\mathbf{F} > 0 \quad (4.2)$$

Pro hodnoty deformace byl zaveden symetrický, pozitivně definitivní pravý Cauchy-Greenův tenzor \mathbf{C} a pro přetvoření symetrický, pozitivně definitivní levý Cauchy-Greenův tenzor \mathbf{b} .

$$\mathbf{C} = \mathbf{F}^T\mathbf{F} \quad (4.3)$$

$$\mathbf{b} = \mathbf{F}\mathbf{F}^T \quad (4.4)$$

Dále je nutné vypočítat invarianty, kterých je dohromady šest. První tři (4.4-4.6) potřebují pouze pravý Cauchy-Greenův tenzor, zbylé tři (4.7-4.9) obsahují i vektor magnetické indukce \mathbf{B} .

$$I_1 = \text{tr}(\mathbf{C}) \quad (4.4)$$

$$I_2 = \frac{1}{2}[(\text{tr}(\mathbf{C}))^2 - \text{tr}(\mathbf{C}^2)] \quad (4.5)$$

$$I_3 = \det\mathbf{C} \quad (4.6)$$

$$I_4 = |\mathbf{B}|^2 \quad (4.7)$$

$$I_5 = (\mathbf{C}\mathbf{B}) \cdot \mathbf{B} \quad (4.8)$$

$$I_6 = (\mathbf{C}^2 \mathbf{B}) \cdot \mathbf{B} \quad (4.9)$$

Materiálový model využívá funkci volné energie, a to hodnot hustoty izochorické energie přetvoření Ω_{iso} , ke které byla připočtena magnetická složka Ω_{m} , a hustoty objemové energie přetvoření Ω_{vol} . Vztahy pro tyto veličiny využívají modifikovaných invariant, které jsou popsány rovnicemi 4.10 a 4.11.

$$I_{1\text{m}} = \frac{I_1}{J^3} \quad (4.10)$$

$$I_{2\text{m}} = \frac{I_2}{J^3} \quad (4.11)$$

Veličiny Ω_{iso} a Ω_{vol} vypočítají pomocí následujících rovnic,

$$\Omega_{\text{iso}} = C_{10}(I_{1\text{m}} - 3) + C_{01}(I_{2\text{m}} - 3) \quad (4.12)$$

$$\Omega_{\text{m}} = \frac{\alpha \cdot I_4 + \beta \cdot I_5}{\mu} \quad (4.13)$$

$$\Omega_{\text{vol}} = \frac{1}{2} \kappa (J - 1)^2 \quad (4.14)$$

kde α a β jsou bezrozměrné materiálové parametry popisující magnetické chování materiálu, μ je permeabilita vakua a κ je objemový modul.

Výsledkem je rovnice pro celkovou volnou energii, která popisuje celý matematický model (4.15).

$$\Omega = C_{10}(I_{1\text{m}} - 3) + C_{01}(I_{2\text{m}} - 3) + \frac{\alpha \cdot I_4 + \beta \cdot I_5}{\mu} + \frac{1}{2} \kappa (J - 1)^2 \quad (4.15)$$

5. Tvorba modelu v COMSOL Multiphysics pro statické namáhání

V následující kapitole jsou popsány jednotlivé kroky, které je potřeba provést pro simulování chování MRE v magnetickém poli s přidáním zátěží i bez ní. Pro výpočty je použit program COMSOL Multiphysics, který pracuje s metodou konečných prvků. Tato metoda je použitelná pro všechny fyzikální úlohy, které se řídí fyzikálními zákony, jež se dají vyjádřit parciálními diferenciálními rovnicemi. Výhodou použitého programu je kombinace více oblastí fyziky při jednom výpočtu. To je žádoucí pro řešení problému této práce, jelikož se kombinují mechanické namáhání a magnetismus.

V této práci byl předpokládán MRE s maticí ze silikonové pryže s mikročásticemi karbonylového železa.

5.1 Založení nového modelu

Při vytváření modelu byl zvolen výpočet ve 2D, jelikož geometrie vzorku je jednoduchá a symetrická. Dále je potřeba zvolit oblasti fyziky, které jsou nutné ke zkoumání vlastností materiálu. Pro tuto práci bylo potřeba zahrnout modul *Solid Mechanics*, který zajistí výpočty potřebné pro mechanické namáhání. Jako druhý modul byl vybrán *Magnetic Fields, No Currents*, který umožní přidat do výpočtu magnetické pole. Pro výpočtovou studii, při které bylo potřeba zajistit statický i dynamický výpočet byla použita studie *Frequency Domain, Prestressed*.

Jako první se při vytváření modelu zadaly vstupní parametry do sekce *Global Definitions*. Hodnoty těchto parametrů jsou uvedeny v tabulce **Tab. 1**.

Tab. 1 Vstupní parametry modelu

| | | |
|-----------|------------------------|--------------------------|
| a | 16 mm | délka strany |
| pre_a | 0,1*a | výchylka |
| pre_a_dyn | 0,02*pre_a | dynamická výchylka |
| alpha | 0,281 | magnet. konst. materiálu |
| ro_sil | 1120 kg/m ³ | hustota silikonu |
| ro_fe | 7860 kg/m ³ | hustota železa |
| nu | 0,49 | Poissonovo číslo |

| | | |
|--------|--|---------------------------|
| m_fe | 0,7 | hmotnostní zlomek železa |
| ro_MRE | 2770 kg/m ³ | hustota MRE |
| V_fe | 0,27 | objemový zlomek železa |
| E_sil | 1,1 MPa | modul pružnosti silikonu |
| E_MRE | $E_{sil}*(1+2.5*V_{fe}+14.1*V_{fe}^2)$ | modul pružnosti MRE |
| C10 | 0,2 MPa | konst. hyperel. materiálu |
| C01 | 0,2 MPa | konst. hyperel. materiálu |
| beta | 0,5 | mag. konst. materiálu |
| Mi | $4*pi*10^{-7}$ H/m | magnetická konstanta |

Další krok byl proveden v sekci *Component – Definitions*. Vytvořila se skupina proměnných – *Variables*. V této sekci se zadaly rovnice pro invarianty a modifikované invarianty (rovnice 4.4-4.11).

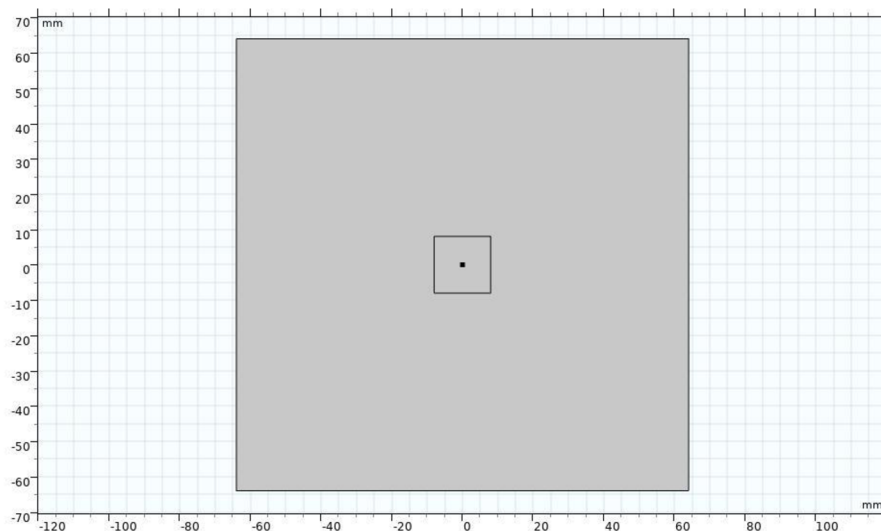
Po definování potřebných proměnných se opět v sekci *Definitions* vytvořily dvě matice. První maticí je inverzní matice deformačního gradientu \mathbf{F}^{-1} .

$$\mathbf{F}^{-1} = \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} & F_{13} \\ F_{21} & F_{22} & F_{23} \\ F_{31} & F_{32} & F_{33} \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

Druhou maticí je Cauchy-Greenův tenzor \mathbf{C} .

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

V následujícím kroku se definovala geometrie. V tomto případě se jedná o dva čtverce. Menší ze čtverců znázorňoval vzorek materiálu a měl délku strany a . Větší ze čtverců sloužil v modelu jako prostor naplněný vzduchem, ve kterém se nacházel vzorek, a jeho délka strany byla osminásobkem strany a . Tento krok je nedílnou součástí k následnému definování magnetického pole. Výsledná podoba geometrie je znázorněna na obrázku **Obr. 5**.



Obr. 5 Geometrie modelu

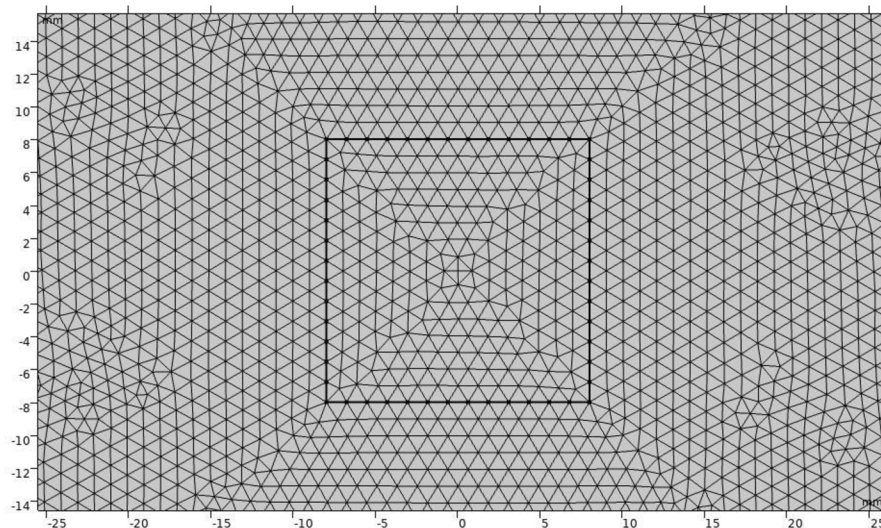
Po vytvoření geometrie se jednotlivým částem přidal typ materiálu, ze kterého byly tvořeny. Větší čtverec znázorňoval vzduch, jehož vlastnosti měl COMSOL Multiphysics uložené v materiálové knihovně, a proto byl z této knihovny importován – *Air*. Menší čtverec představuje MRE, který knihovna neobsahovala, jelikož se jednalo o složitější materiál. Jeho vlastnosti se musely zadat ručně pomocí předem uživatelem připravených parametrů a proměnných. Tyto hodnoty se ale nezapisovaly v sekci *Materials*, ale až později při vytváření hyperelastického materiálu, které je popsáno v následujícím odstavci.

Následovala sekce *Solid Mechanics*, která sloužila k definici vlastností MRE a mechanického zatěžování. Byl přidán hyperelastický materiál (*Hyperelastic Material*). Materiálový model byl zadán uživatelem a pro určení parametrů byl vybrán téměř nestlačitelný materiál (*Nearly incompressible material*). Hustota izochorické energie přetvoření (*Isochoric strain energy density*) byla dána součtem $\Omega_{iso} + \Omega_{mf}$. Hustota objemové energie přetvoření (*Volumetric strain energy density*) byla vyjádřena jako Ω_{vol} . Hustota materiálu byla zavedena na začátku tvorby modelu v parametrech jako ρ_{MRE} .

Ve stále stejné sekci se pokračovalo zavedením vazeb. Spodní strana materiálu byla pevně připevněna k podložce – pro to slouží vazba *Fixed*. Vazba na vrchní straně závisela na typu příkladu. Prováděly se výpočty, při kterých byla tato část volná (vazba *Free*), a výpočty, při kterých byla zamezena příčná deformace. Pro tento případ byl zaveden předepsaný posuv (*Prescribed Displacement*). Jeho složka x závisela na typu kvazistatického zatížení a složka y byla vždy nulová.

Postoupilo se k definici magnetického pole v sekci *Magnetic Fields, No Currents*. Jedinou přidanou veličinou byla hustota magnetického toku (*Magnetic Flux Density*). Pro ni bylo nutné označit strany velkého čtverce, aby byl definován její směr. Pro horizontální směr to byly pravá a levá strana, pro vertikální směr horní a dolní strana. Posledním krokem pro úspěšné zadání magnetismu bylo určení hodnoty veličiny, která byla ve výpočtech od 0 do 2 T s krokem 0,1 T.

Posledním krokem před spuštěním výpočtu byla tvorba sítě. Ta byla vygenerována velmi hustá. Díky jednodušší geometrii úlohy nebylo potřeba síť speciálně upravovat zjemněním okolo materiálu a hrubší sekce blíže k okrajům vzduchového prostoru. Výpočet i bez těchto úprav trval jen několik málo sekund. Znázornění podoby sítě je na **Obr. 6**.



Obr. 6 Detail výpočetní sítě

5.2 Úprava modelu pro dynamické namáhání

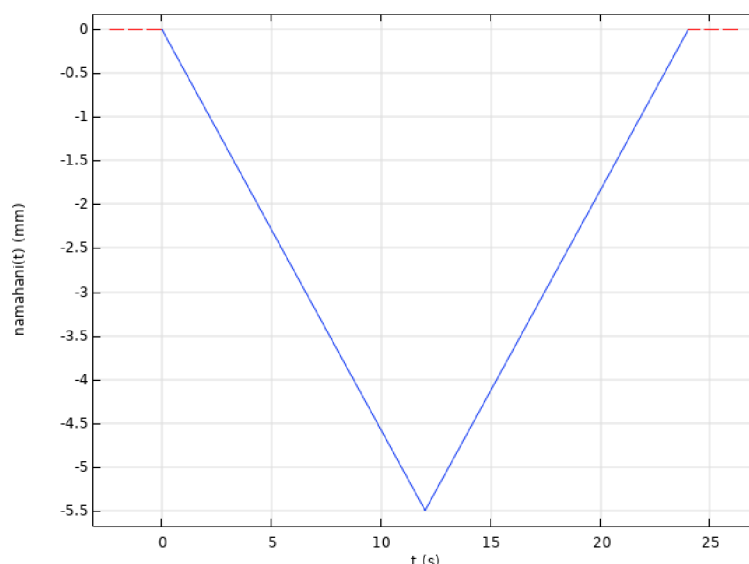
Výpočtový model se pro dynamické vlastnosti namáhání v některých aspektech lišil od namáhání statického. Proto jsou tyto změny popsány v následující kapitole. Výpočet byl inspirovaný postupem popsaným ve článku o účinku magnetického pole a cyklického namáhání na předpověď únavové životnosti MRE (Hosseini, Shojaeefard & Googarchin, 2021). Autoři vytvořili numerický model v konečněprvkovém softwaru COMSOL Multiphysics. Geometrie prvku byla definována válcem o průměru 27 mm a výšce 36,5 mm. Okolo vzorku bylo vytvořeno kulové prostředí reprezentující vakuum. V horní a dolní části vzorku byly umístěny obdélníky, jež generovaly magnetické pole o intenzitě 0,4 T. Horní strana vzorku byla vystavena zátěži definované jako posuv. Ten dosáhl během 12 sekund hodnoty 2,4 mm a následně byl během stejné doby odlehčen. Napětí bylo zjišťováno měřením reakční síly vespod vzorku a deformací na horní části materiálu.

V experimentu byly uvažovány hodnoty hustoty magnetického toku 0 a 0,4 T. Pro tyto hodnoty byly nalezeny konstanty hyperelastického materiálu C_{10} a C_{01} . Ty se použily při výpočtech v této práci. Jejich hodnoty jsou uvedeny v tabulce **Tab. 2**. V modelu se zadaly do parametrů pod záložkou *Global Definitions*.

Tab. 2 Hodnoty konstant hyperelastického materiálu

| | 0 T | 0,4 T |
|----------------|--------|--------|
| C_{10} [kPa] | -26,2 | 116,82 |
| C_{01} [kPa] | 174,78 | 66,38 |

Ve stejné záložce bylo potřeba definovat funkci, podle níž probíhala simulace stlačování. Posuv byl lineární, tudíž se stlačení definovalo dvěma lineárními funkcemi. Nejprve funkce klesala, po dosažení potřebné deformace 5,5 mm opět začala růst. Průběh je znázorněn na **Obr. 7**.



Obr. 7 Průběh namáhání

Geometrie vzorku byla změněna na obdélník se šířkou 27 mm a výškou 36,5 mm. Jelikož se pracovalo s hodnotami pro konkrétní magnetická pole, nebylo potřeba okolo vzorku vytvářet prostor vyplněný vzduchem. Z tohoto důvodu bylo možné v materiálech odstranit vlastnosti vzduchu. Důsledkem toho také bylo, že ze dvou fyzikálních rozhraní zbylo jen jediné – a to *Solid Mechanics*. Materiálový model zůstal zadaný uživatelem, jen stlačitelnost materiálu byla změněna na nestlačitelný materiál (*Incompressible material*). Hustota izochorické energie přetvoření (*Isochoric strain energy density*) byla dána už jen jedním parametrem – *Omega_iso*.

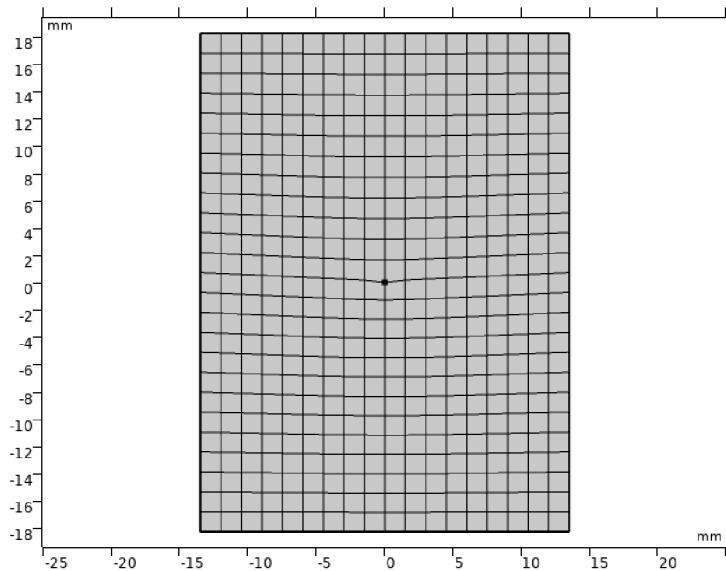
Aby se projevovaly účinky dynamického namáhání vzorku, přidala se k hyperelasticitě navíc viskoelasticita (uzel *Viscoelasticity*). V ní bylo potřeba vytvořit tabulku konstant pro zobecněný Maxwellův model viskoelasticity. Hodnoty byly také převzaty z dat popisovaného experimentu na začátku této kapitoly. Tyto údaje jsou uvedeny v následující tabulce (**Tab. 3**).

Tab. 3 Hodnoty viskoelastických konstant

| 0 T | | 0,4 T | |
|---------|------------|---------|------------|
| g [-] | τ [s] | g [-] | τ [s] |
| 0,001 | 1361 | 0,001 | 0,1518 |
| 0,0766 | 0,6233 | 0,1204 | 0,6231 |
| 0,0682 | 3,8402 | 0,1104 | 3,2354 |
| 0,0613 | 10,3909 | 0,0999 | 8,9193 |
| 0,0403 | 93,1789 | 0,0589 | 84,6729 |
| 0,0159 | 337,394 | 0,0185 | 332,4252 |
| 0,0001 | 691,4191 | 0,0001 | 689,8837 |

V okrajových podmínkách zůstala upevněná dolní hrana. U horní strany byl předepsán posuv, kterým bylo definováno mechanické namáhání. Tento posuv byl ve směru x 0 mm, ve směru y ho definovala předtím vytvořená funkce namáhání závislá na čase.

Výpočtová síť byla uživatelsky upravená. Velikosti elementů byly povoleny v mezích 0,5 až 1,5 mm. Elementy byly uspořádány do čtvercové sítě (*Free Quad*). Tímto nastavením bylo dosaženo rovnoměrně rozložené sítě (**Obr. 8**).

**Obr. 8** Upravená výpočetní síť

Studie byla rozložena do dvou kroků. První krok byl pro stlačování, druhý pro následné odlehčování. Oba kroky byly vytvořeny jako časově závislé (*Time Dependent*). První krok trval od 0 do 12 sekund s časovým krokem 0,1 s. Druhý krok měl stejný krok v časech 12 až 24 s. Tímto byly provedeny všechny potřebné změny v modelu pro zjištění relaxace materiálu při kompresi.

6. Výsledky simulace

V této kapitole jsou prezentovány výsledky výpočtů provedených v COMSOL Multiphysics, které zjišťovaly chování MRE v magnetickém poli při působící zátěži i bez ní. Nejprve byl vyřešen případ kvazistatického zatěžování hyperelastického modelu MRE, poté byla do modelu přidána viskoelastická, která se projevuje při dynamickém namáhání.

6.1 Hyperelastický materiál

Pro hyperelastický model bylo zvoleno několik variant k prozkoumání. Nejprve se předpokládalo, že čtvercový vzorek je připevněn k podložce na jedné jeho straně a zbylé tři strany se mohou libovolně pohybovat. Byly provedeny výpočty pro dvě varianty směru působení hustoty magnetického toku – horizontální (směr osy x) a vertikální (směr osy y). Pro každý směr toku bylo spočítáno chování MRE bez mechanického smykového zatížení a s mechanickým zatížením. Toto zatížení nebylo definováno jako síla nebo napětí působící na vzorek, ale jako předem dané konstantní posunutí. To bylo definováno jako deset procent délky strany vzorku – tedy 1,6 mm. Takto předepsaným posunutím model teoreticky lépe odpovídá případnému praktickému experimentu, při kterém by se zatížení vzorku lépe definovalo právě jako dislokace.

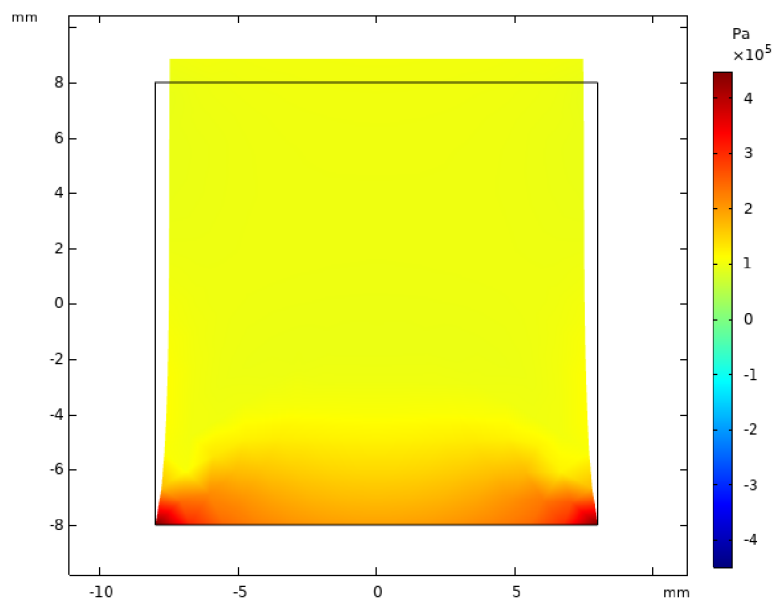
Dále se studovalo chování čtvercového vzorku, který je připevněn dvěma protilehlými stranami k pomyslným styčným plochám měřicího stroje. Tímto se zamezilo deformaci ve směru kolmém na zatížení. Pokud byl vzorek uchycen jen z jedné strany, docházelo v některých případech ke smrštění, což by v reálném experimentu bylo potlačeno, jelikož vzorek musí být přichycen ke dvěma plochám – jedné statické a jedné pohyblivé zajišťující posun.

Hustota magnetického toku byla zadávána postupně s hodnotami od 0 do 2 T s krokem 0,1 T. Pro některé – zejména vyšší – hodnoty program vykazoval chyby, a proto nejsou pro některé hodnoty hustoty magnetického toku výsledky. To se projevilo v ojedinělých mezerách ve grafech.

Dohromady se tak provedlo osm různých variant testování. Všechny hodnoty veličin se vztahují ke středovému bodu vzorku. Ve vrcholových bodech čtverce dochází ke koncentraci napětí a tím se může zvyšovat chybovost výpočtů metody konečných prvků. Proto byl tento bod zvolen za nejvhodnější.

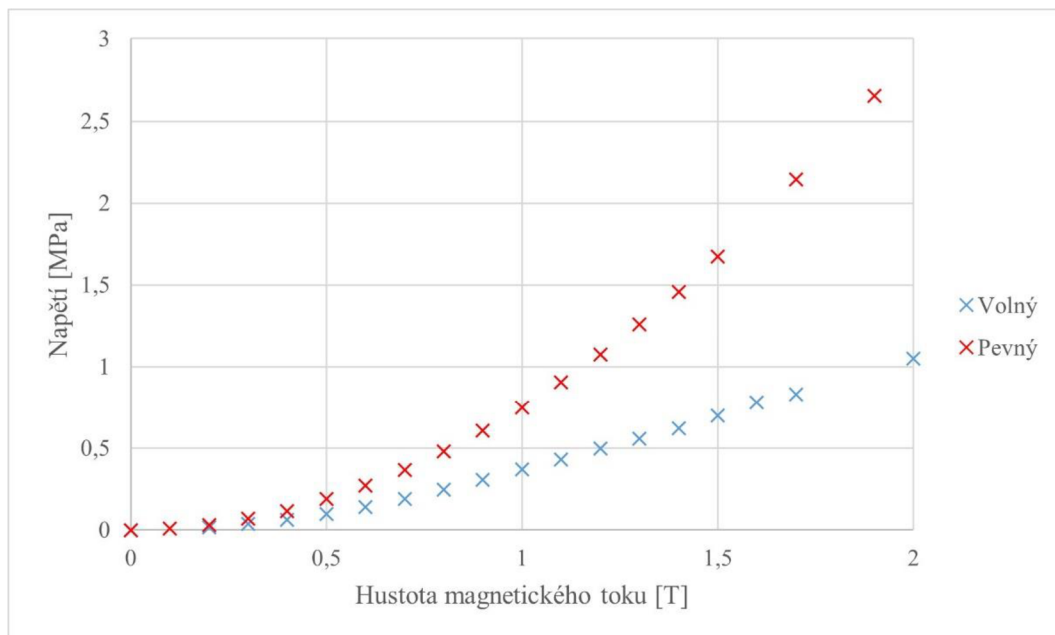
6.1.1 Horizontální magnetické pole bez mechanického zatížení

Pokud má vzorek volnou horní stranu, dochází při nenulové hustotě magnetického toku k deformaci, která se projeví protažením ve směru osy y . Horizontální směr magnetického pole způsobil, že kovové částice se přitáhly k sobě ve směru siločar, a proto se vzorek prodloužil kolmo k jejich šíření. Deformace je znázorněna na **Obr. 9**. Pro napětí platí, že dochází k jeho koncentraci ve spodních rozích vzorku. Ty byly pevně připevněné k podložce, tudíž se neschopnost posuvu projevila právě zvýšeným napětím. Ve zbylé části materiálu se hodnota napětí příliš neměnila. Např. pro 0,5 T byla uprostřed vzorku jeho hodnota 97,3 kPa.



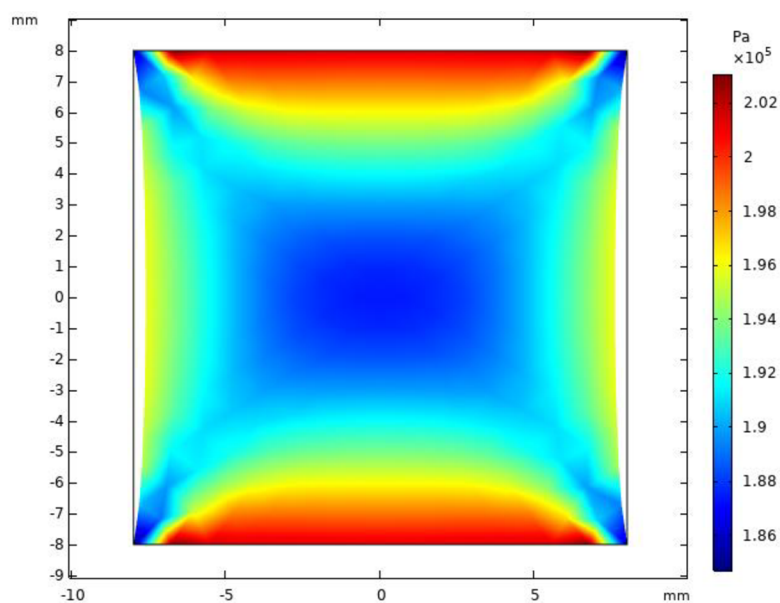
Obr. 9 Deformace vzorku s volnou horní stranou (0,5 T)

V reálném experimentu by byly jak dolní, tak horní strany vzorku pevně upevněné. Proto byly výpočty zaměřeny především na takto vypadající výpočty. Pro porovnání vzorků, které mají volnou, nebo upevněnou horní stranu slouží **Obr. 10**. Z něho je zřejmé, že pokud byl vzorek odepřen vertikální posuv, projevilo se to na vyšším napětí v celém vzorku. Do hodnoty hustoty magnetického pole 0,5 T nebyl rozdíl příliš výrazný. Pro volný vzorek bylo napětí zmiňovaných 97,3 kPa, pro pevný 187,5 kPa. Pro hodnotu pole 1 T se rozdíl mezi napětími zvýšil – volný vzorek 368,4 kPa, pevný 747,1 kPa. A nakonec pro 1,5 T – volný 702 kPa, pevný 1672 kPa. To znamená, že s rostoucí hodnotou hustoty magnetického pole se zvyšoval i rozdíl mezi hodnotami napětí obou typů vzorků.



Obr. 10 Napětí při horizontálním magnetickém poli bez mechanického zatížení

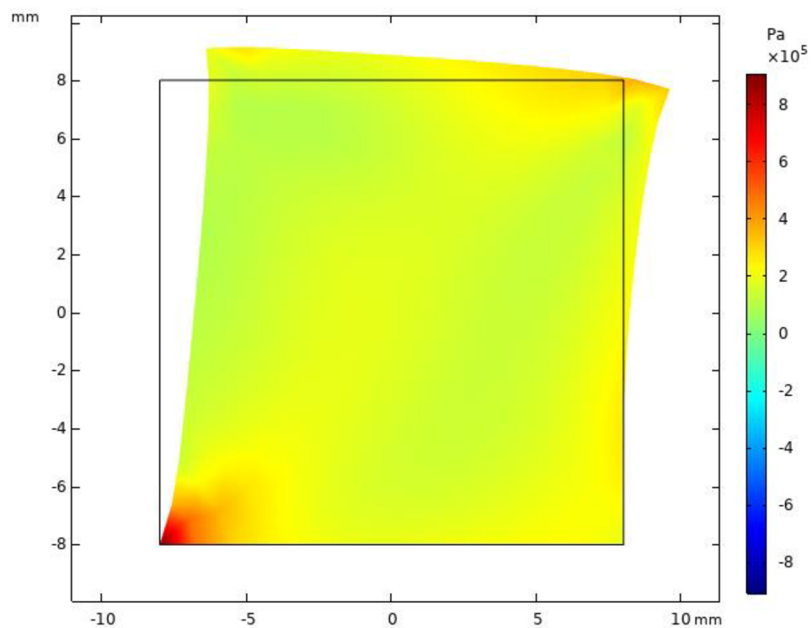
Pro ukázkou rozložení napětí ve vzorku s pevnou horní stranou je **Obr. 11**. Nejmenší hodnoty napětí byly opět ve střední části – 187,5 kPa. Nejvyšší hodnoty dosahující až 200 kPa se nacházely u obou připevněných stranách. Projevila se i závislost materiálu na magnetickém poli, protože ačkoliv materiál nebyl zatěžován žádnou vnější mechanickou silou, došlo k nepatrnému smrštění u vertikálních stran. V tomto případě stran, kterými magnetické pole procházelo kolmo.



Obr. 11 Deformace vzorku s pevnou horní stranou (0,5 T)

6.1.2 Horizontální magnetické pole s mechanickým zatížením

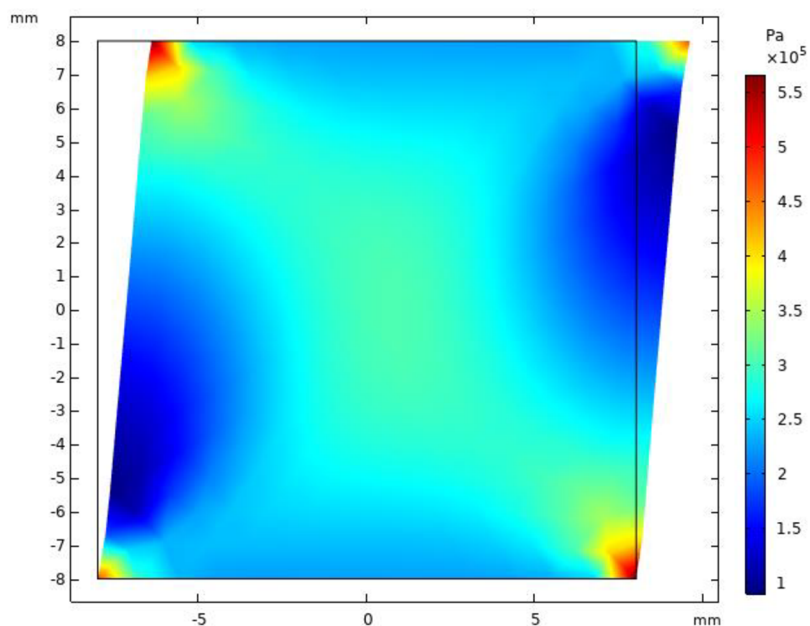
Při těchto výpočtech byly vzorky vystaveny smykovému mechanickému zatížení. Toto zatížení bylo definováno pomocí předepsané výchylky, jejíž hodnota odpovídala 10 procentům délky strany vzorku, tedy 1,6 mm. Smyku byla podrobena horní strana materiálu, dolní byla pevně uchycena. Stejně jako v předchozí kapitole byl prvně vzorek připevněn pouze dole. Vzniklé napětí ve většině plochy bylo téměř stejné – uprostřed 175 kPa. K výraznějšímu zvýšení napětí došlo u připevněného rohu (**Obr. 12**).



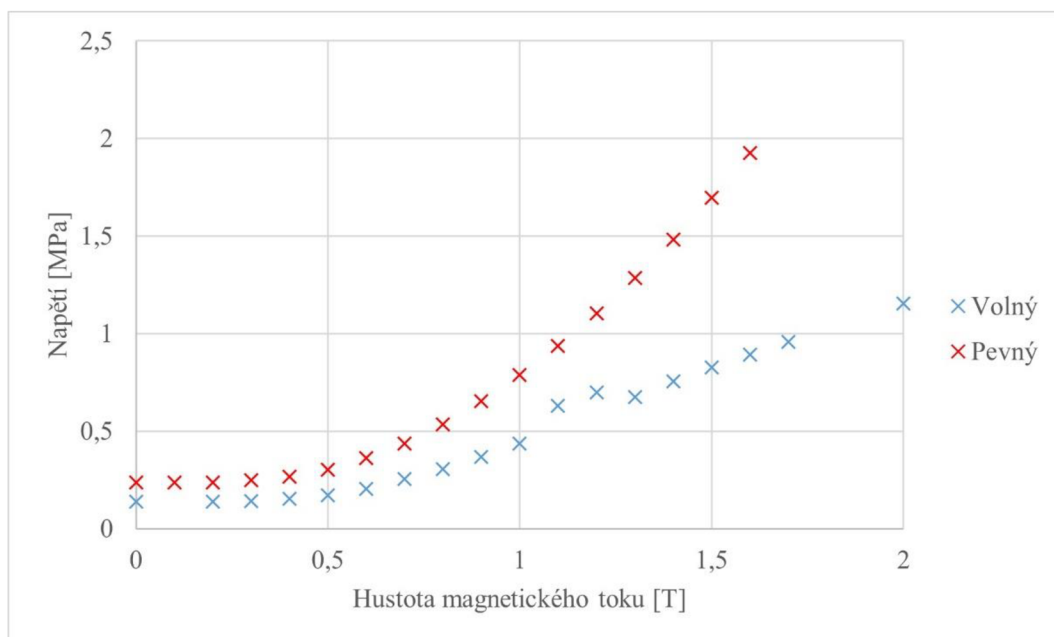
Obr. 12 Deformace vzorku s volnou horní stranou při mech. zatížení (0,5 T)

Byl-li vzorek upevněn i ve vrchní části, došlo ke změně rozložení napětí tak, že nejnižší hodnoty se už nenacházely uprostřed něj. Stále byla zachována koncentrace napětí u rohů, ale nižší napětí měl vzorek podél stran, oproti prostředku (**Obr. 13**). Uprostřed dosáhlo napětí 304 kPa.

Graf na **Obr. 14** ukazuje rozdíly napětí, má-li vzorek volnou, případně upevněnou horní stranu. Potvrdilo se, že nemožnost vertikálního posuvu zvyšuje napětí v materiálu. Rozdíly mezi napětími jsou podobně velké jako u nezatížených vzorků v předešlé kapitole. Rozdílem je, že i při hustotě magnetického pole 0 T není ve vzorku nulové napětí, což je způsobeno přidáním mechanickým namáháním – volná strana 140 kPa, upevněná 238 kPa. Při 1 T bylo napětí u volného vzorku 441 kPa, u upevněného 787 kPa. Naposledy při 1,5 T – volný 829 kPa, pevný 1698 kPa.



Obr. 13 Deformace vzorku s pevnou horní stranou při mech. zatížení (0,5 T)

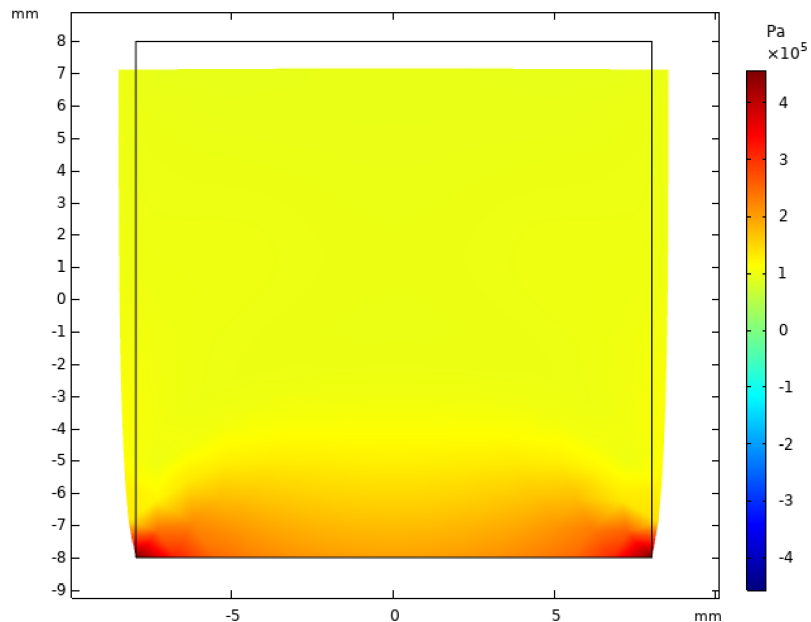


Obr. 14 Napětí při horizontálním magnetickém poli s mechanickým zatížením

6.1.3 Vertikální magnetické pole bez mechanického zatížení

Po výpočtech s horizontálním magnetickým polem se přešlo na pole vertikální, tedy ve směru osy y . Pokud byla horní strana vzorku uvolněná a na materiál nepůsobilo žádné mechanické zatížení, došlo u materiálu ke kompresi v důsledku působení magnetických sil. Ty způsobily, že kovové částice uvnitř materiálu se uspořádaly po směru magnetických siločar, čímž došlo ke zmenšení výšky vzorku. Na **Obr. 15** je zobrazeno

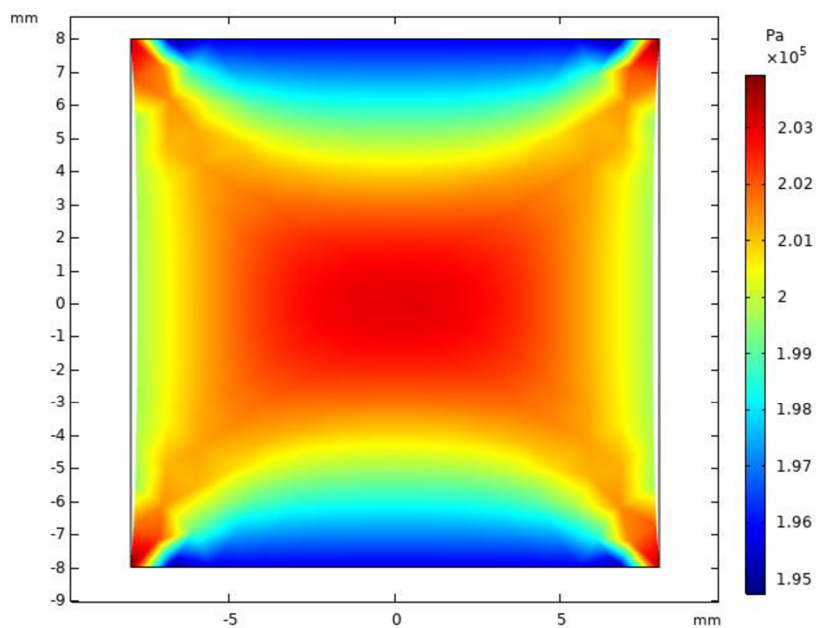
výsledné rozložení napětí a způsobená deformace. V důsledku pevného upevnění docházelo ve spodních rozích ke koncentraci napětí. Hodnota napětí uprostřed vzorku nabyla hodnoty 97 kPa.



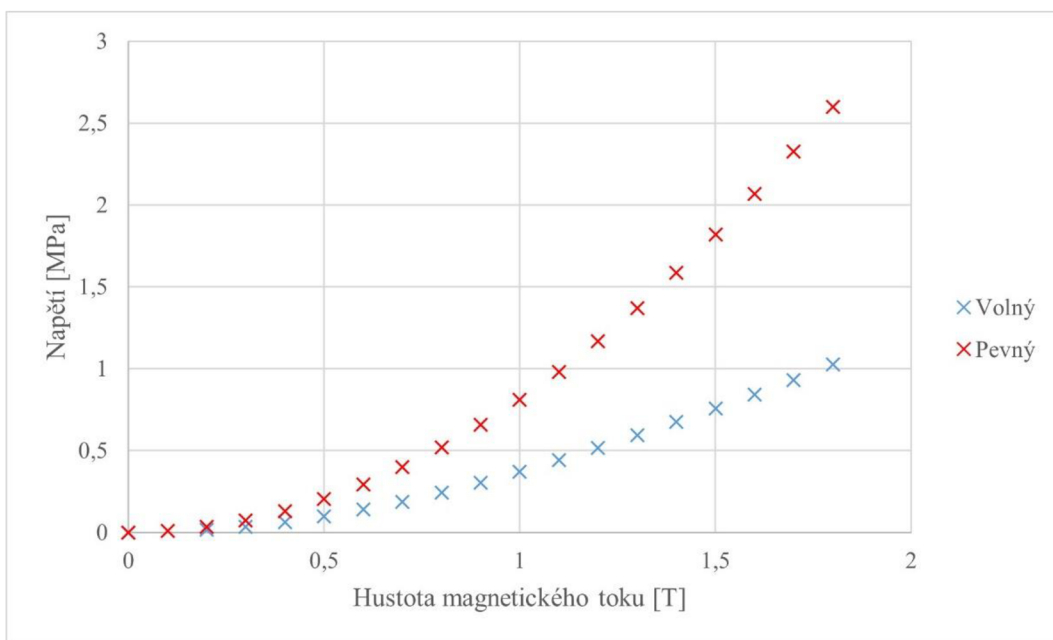
Obr. 15 Deformace vzorku s volnou horní stranou při mech. zatížení (0,5 T)

Následně byla ve výpočtech odebrána vzorku možnost posunu horní hrany ve směru y . Zvýšily se tím hodnoty napětí uvnitř materiálu i přesto, že nedocházelo k tak výrazné deformaci tvaru jako u vzorku s volnou horní stranou. Vyšší hodnoty napětí se projeví uprostřed materiálu a šířily se směrem ke všem čtyřem rohům. Právě uprostřed vzorku bylo napětí 203 kPa. Celkové rozložení napětí je znázorněno na **Obr. 16**.

Z grafu, který porovnává napětí uprostřed vzorku s volnou a upevněnou horní stranou (**Obr. 17**) je zřejmé, že opět platilo, že nižší napětí vznikala u volného vzorku. Při magnetickém poli 0,5 T byl rozdíl mezi nimi přibližně 100 kPa (volný vzorek 97 kPa, pevný 203 kPa). Tento rozdíl se se zvětšující hustotou magnetického pole zvětšoval. Při 1 T bylo ve volném vzorku napětí 371 kPa a v upevněném 811 kPa. Pokud mělo pole hustotu 1,5 T byl rozdíl mezi vzorky ještě výraznější – skoro 1100 kPa. Volný vzorek 756 kPa a pevný 1818 kPa.



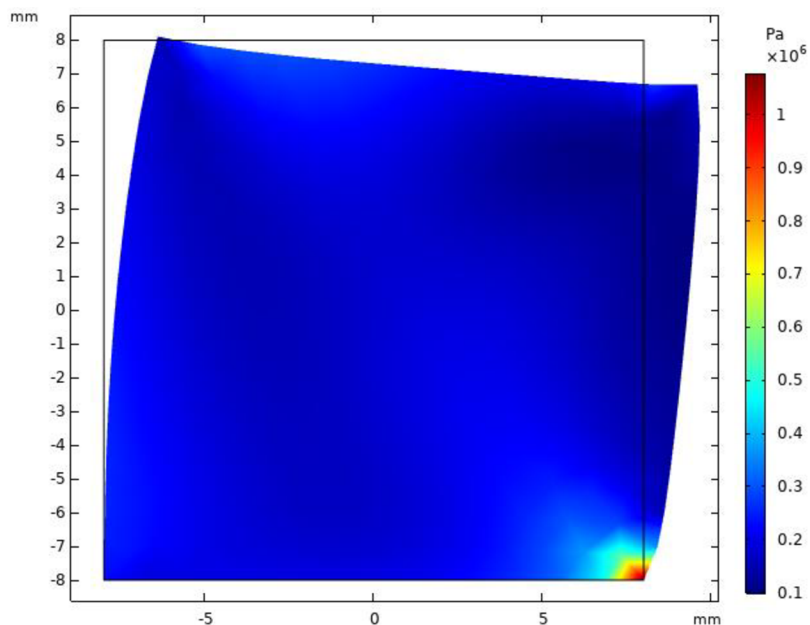
Obr. 16 Deformace vzorku s pevnou horní stranou (0,5 T)



Obr. 17 Napětí při vertikálním magnetickém poli bez mechanického zatížení

6.1.4 Vertikální magnetické pole s mechanickým zatížením

Mechanické zatížení vzorku bylo dáno velikostí posuvu horní hrany ve směru osy x . Velikost posuvu byla 1,6 mm. Ve všech případech byl vzorek pevně uchycen za dolní stranu, horní strana byla nejprve volná, až následně došlo k jejímu zafixování. Na **Obr. 18** je výsledný tvar s barevnou škálou napětí. V důsledku působení mechanických a magnetických sil došlo ke koncentraci napětí v pravém dolním rohu. Jinak se hodnoty pohybovaly ve zbytku vzorku přibližně do 500 kPa. Napětí uprostřed materiálu nabylo hodnoty 180 kPa.

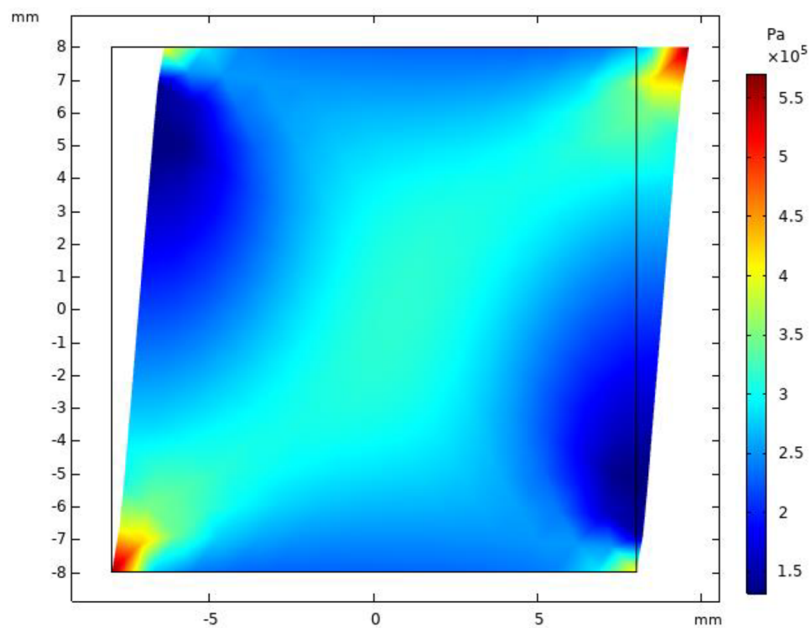


Obr. 18 Deformace vzorku s volnou horní stranou při mech. zatížení (0,5 T)

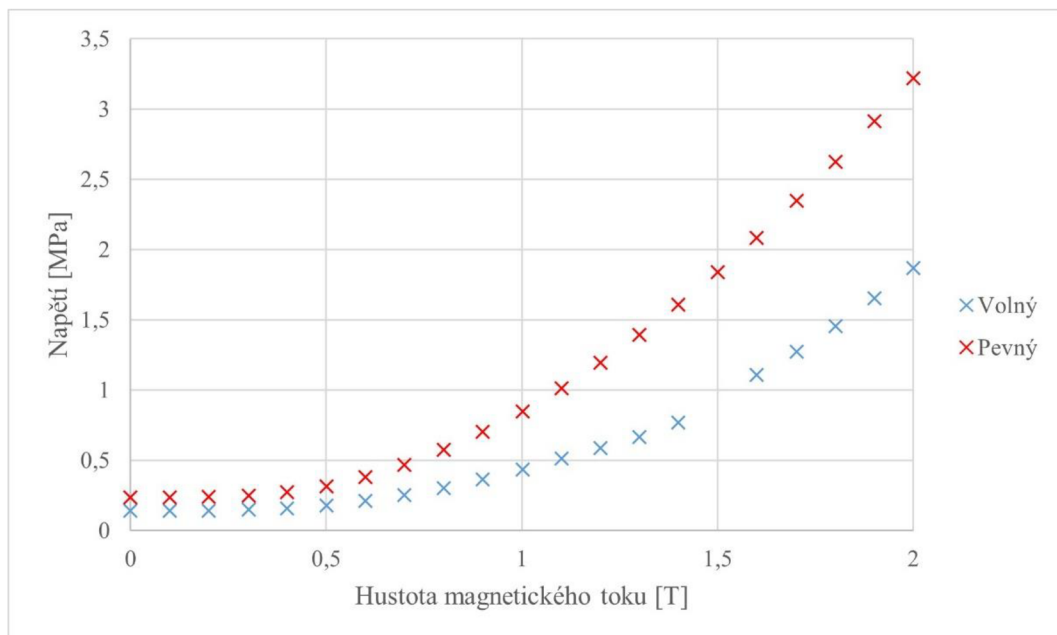
Výsledek výpočtů po přidání podmínky, která zamezila vertikální posun lze vidět na **Obr. 19**. Napětí ve vzorku už nebylo rozloženo po téměř celé ploše rovnoměrně, ale nejvyšší hodnoty se nachází na jedné diagonále. V obou rozích této diagonály se nachází největší napětí. V blízkosti zbylých dvou rohů mimo tuto diagonálu se naopak nacházely oblasti s nejmenšími napětími. Hodnoty uprostřed materiálu byly 315 kPa.

Na závěr jsou opět znázorněny průběhy napětí uprostřed vzorků s volnou a pevnou horní hranou (**Obr. 20**). Pokud na vzorek nepůsobil magnetismus, ale jen smyková síla, bylo napětí ve volném vzorku 140 kPa a ve vzorku s fixovanou stranou 238 kPa. Při nízkých hodnotách hustoty magnetického pole byly rozdíly mezi napětími

přibližně 100 kPa. Při 0,5 T bylo ve vzorku s volnou stranou napětí 180 kPa, s upevněnou stranou 315 kPa. Od této hodnoty se rozdíly začaly zvětšovat. Při 1 T měl volný vzorek napětí 434 kPa, upevněný vzorek 850 kPa. Postupně se rozdíl dostal až k 1 MPa – při 2 T bylo napětí ve volném vzorku 1870 kPa a ve vzorku s pevnou stranou 3220 kPa.



Obr. 19 Deformace vzorku s pevnou horní stranou při mech. zatížení (0,5 T)



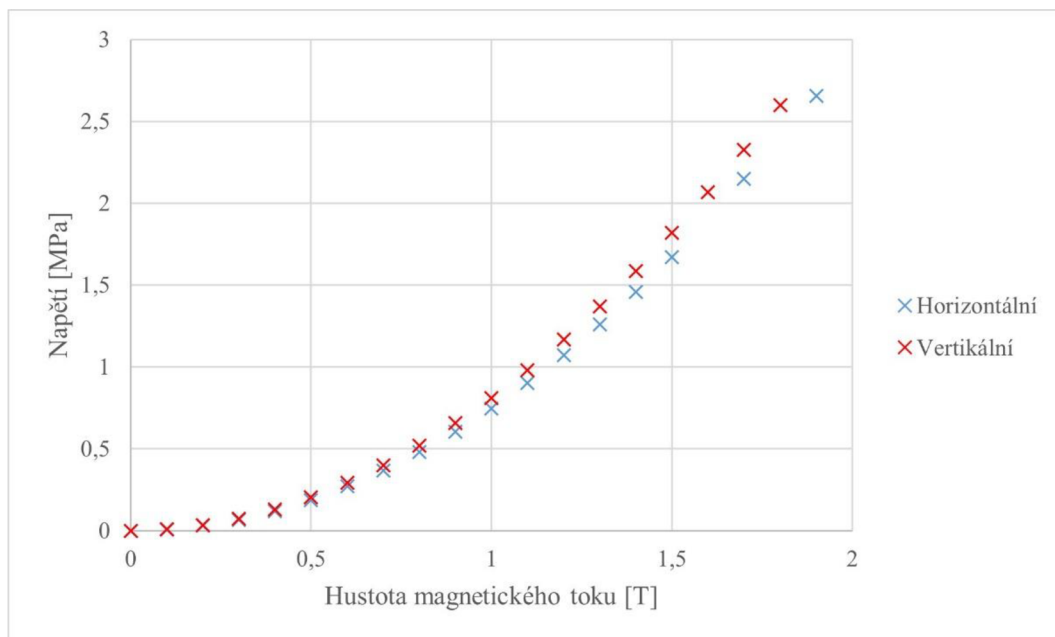
Obr. 20 Napětí při vertikálním magnetickém poli s mechanickým zatížením

6.1.5 Porovnání směrů magnetických polí

Dosud byly hodnoty napětí porovnávány jen při stejném směru hustoty magnetického toku. V této kapitole budou srovnány mezi sebou napětí způsobené jak horizontálním, tak vertikálním magnetickým polem. Srovnání byla provedena jen pro vzorky s upevněnou horní hranou.

Nejprve byly počítány vzorky, jež nebyly zatěžovány žádnou mechanickou silou. Hodnoty napětí se téměř od sebe nelišily (**Obr. 21**). Až při hustotě magnetického toku 0,8 T docházelo k menším rozdílům, které se postupně zvětšovaly. U horizontálního pole bylo napětí 479 kPa a u vertikálního 519 kPa. Rozdíl se ze 40 kPa dostal na hodnotu 150 kPa při 1,5 T – horizontální pole 1670 kPa, vertikální 1820 kPa.

Bylo zjištěno, že horizontální směr hustoty magnetického toku o trochu méně zatěžovalo vzorek. Rozdíly však nebyly zásadně velké, a proto by směr neměl v praxi téměř vůbec ovlivňovat životnost materiálu.

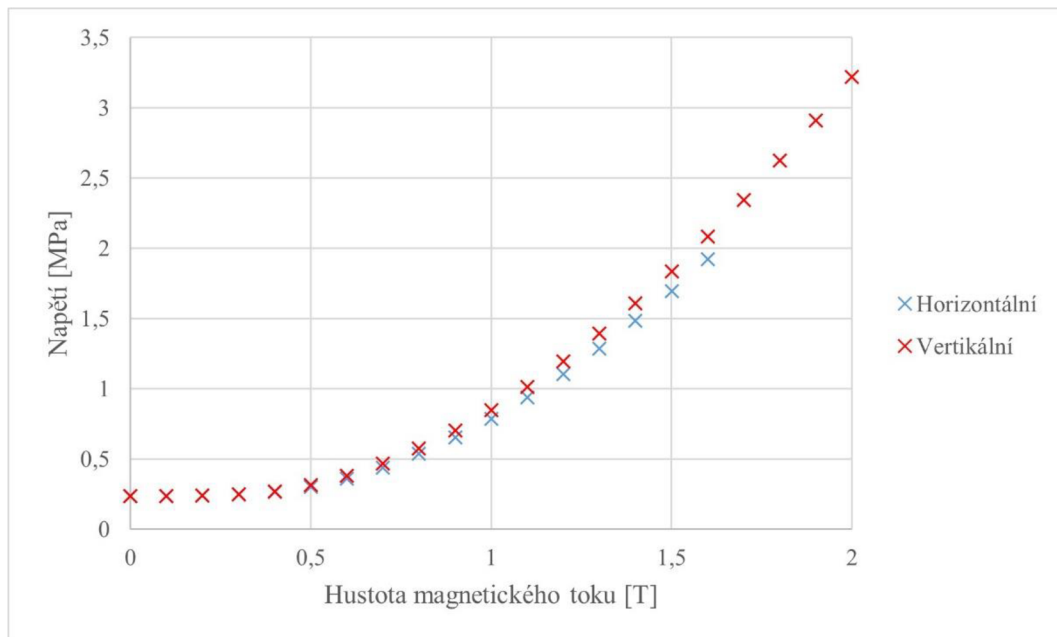


Obr. 21 Porovnání napětí způsobených různými směry mag. pole – volná strana

Druhému porovnání byly podrobeny vzorky, které byly vystaveny i smykovému mechanickému namáhání (**Obr. 22**). Výraznější rozdíly se mezi napětími začaly objevovat o trochu později oproti mechanicky nezatíženým vzorkům. Při hodnotě hustoty magnetického toku 1 T bylo napětí v materiálu s horizontálním polem 787 kPa,

s vertikálním polem 850 kPa – rozdíl 63 kPa. Při 1,6 T se diference zvětšila na 155 kPa – horizontální pole 1925 kPa a vertikální 2080 kPa.

Porovnání ukázalo, že i se smykovým namáháním byly hodnoty napětí o něco menší při působení horizontálního pole. Tyto rozdíly by ovšem neměly mít výrazný vliv na odolnost materiálu v praktickém využití.

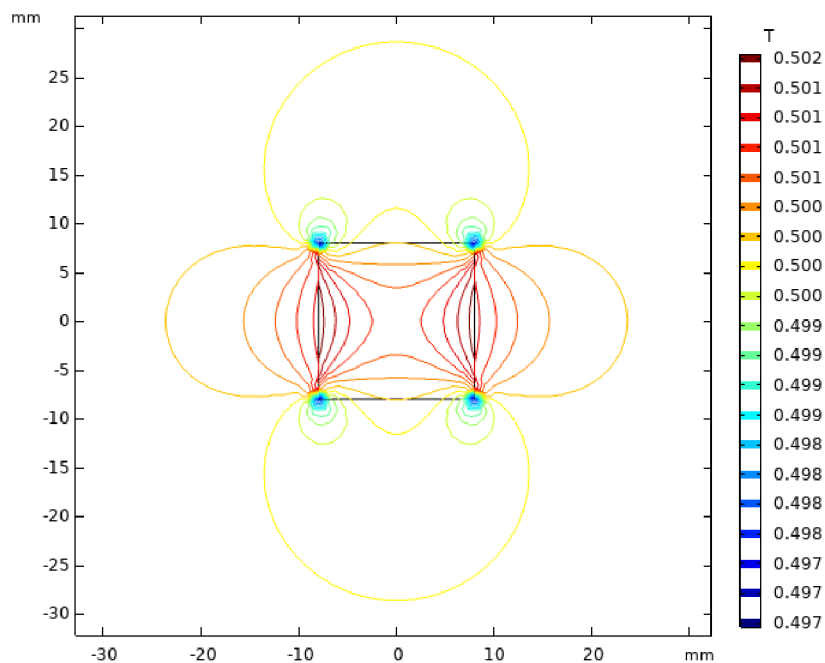


Obr. 22 Porovnání napětí způsobených různými směry mag. pole – pevná strana

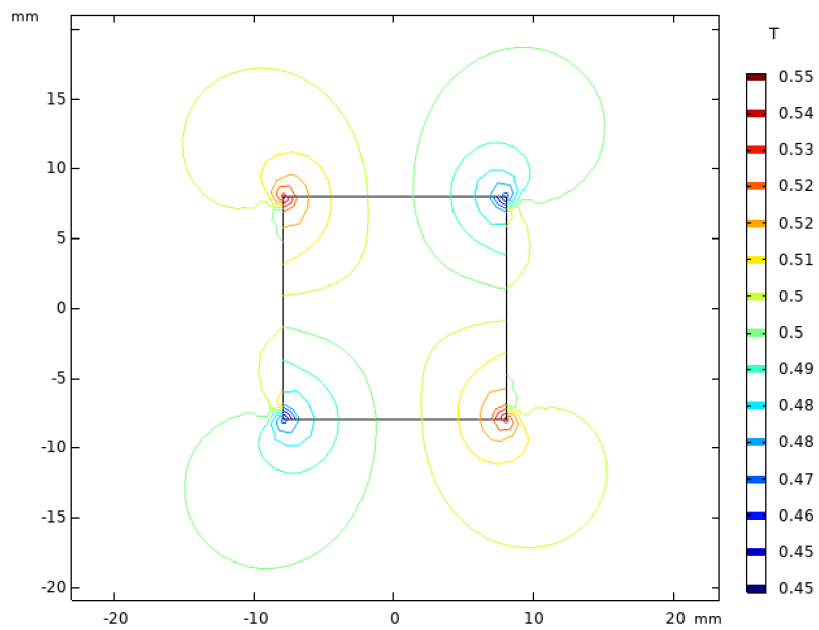
6.1.6 Magnetické siločáry

Byly simulovány dva typy magnetického pole – horizontální a vertikální. Jak bylo jejich proudění ovlivněno magnetoreologickým materiálem je znázorněno na **Obr. 23** až **Obr. 26**. Všechna znázornění jsou pro vzorek, který měl upevněnou horní stranu. I přes různý směr magnetických polí vyšlo u obou případů, že siločáry jsou hustěji rozloženy v podélném směru, což znamená, že v tomto směru dochází k rychlejší změně hodnot hustoty magnetického toku. To bylo pravděpodobně způsobeno tím, že v příčném směru na základě okrajových podmínek nemohlo docházet k deformaci. K té docházelo jen v podélném směru, a proto šlo pozorovat takové chování. Dále byla zjištěna vyšší koncentrace siločar v okolí rohů vzorku. To koresponduje s koncentrací napětí v těchto místech.

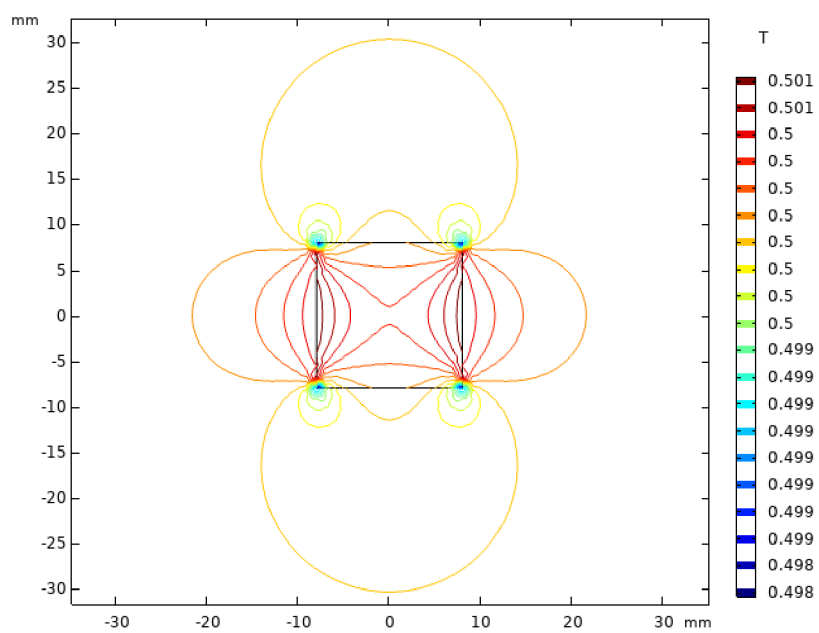
Pro vzorky, které byly mechanicky namáhané smykem, se tvar siločar změnil a to tak, že se více točily kolem jednotlivých rohů vzorku. Oproti nezatíženým variantám se lišily hodnoty hustoty magnetického pole v rozích. Na dvou diagonálně protějších rozích došlo k zeslabení magnetismu a na zbylých dvou k zesílení. To odpovídá rozdílným napětím v rozích u mechanicky namáhaných vzorků.



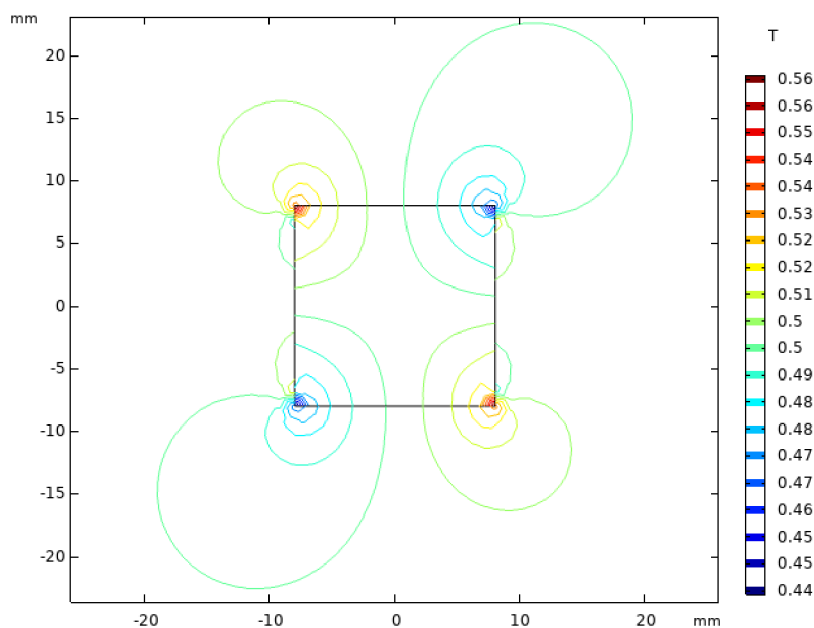
Obr. 23 Magnetické siločáry – horizontální pole bez mechanického zatížení (0,5 T)



Obr. 24 Magnetické siločáry – horizontální pole s mechanickým zatížením (0,5 T)



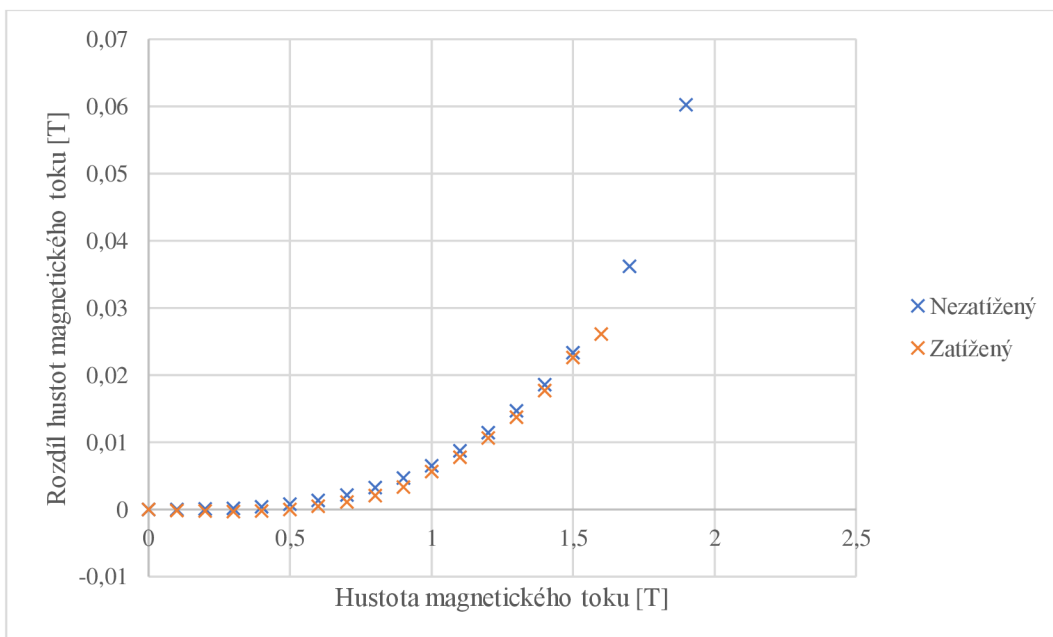
Obr. 25 Magnetické siločáry – vertikální pole bez mechanického zatížení (0,5 T)



Obr. 26 Magnetické siločáry – vertikální pole s mechanickým zatížením (0,5 T)

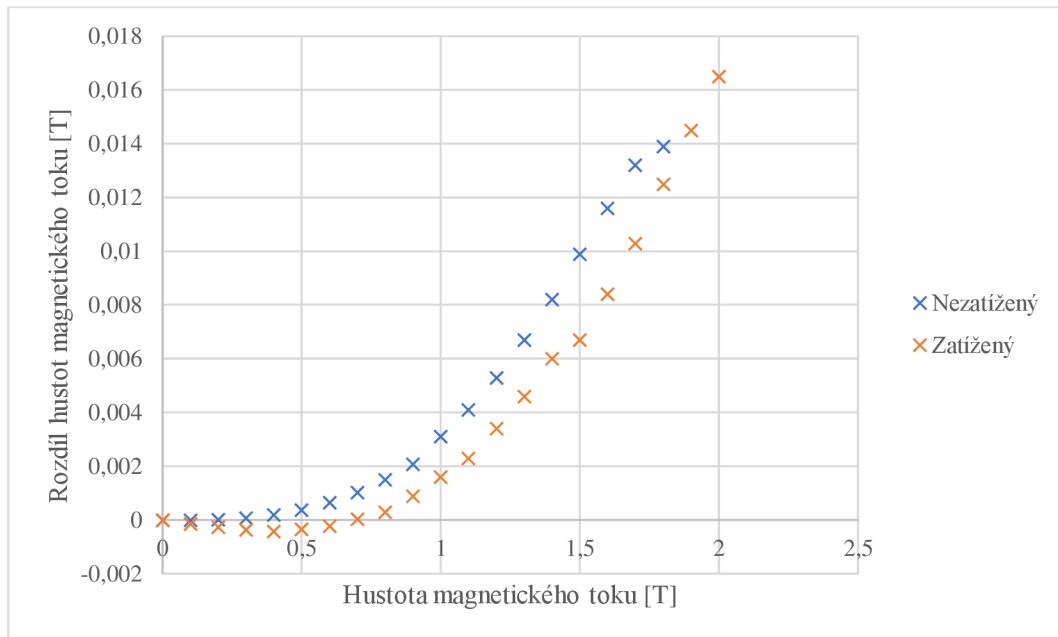
V materiálu docházelo při simulaci ke změně hodnot hustoty magnetického toku. Pro porovnání jsou uvedeny grafy, které ukazují rozdíl skutečné hodnoty uprostřed vzorku a té předem definované v okrajových podmínkách simulace.

Na **Obr. 27** jsou porovnány rozdíly při působení horizontálního pole na materiál bez a s mechanickým zatížením. Do 0,5 T se pole téměř neměnilo, nad touto hranicí začalo docházet k zesilování pole, např. při 1,5 T bylo zesíleno o 23 mT.



Obr. 27 Rozdíl hustot magnetického toku – horizontální pole

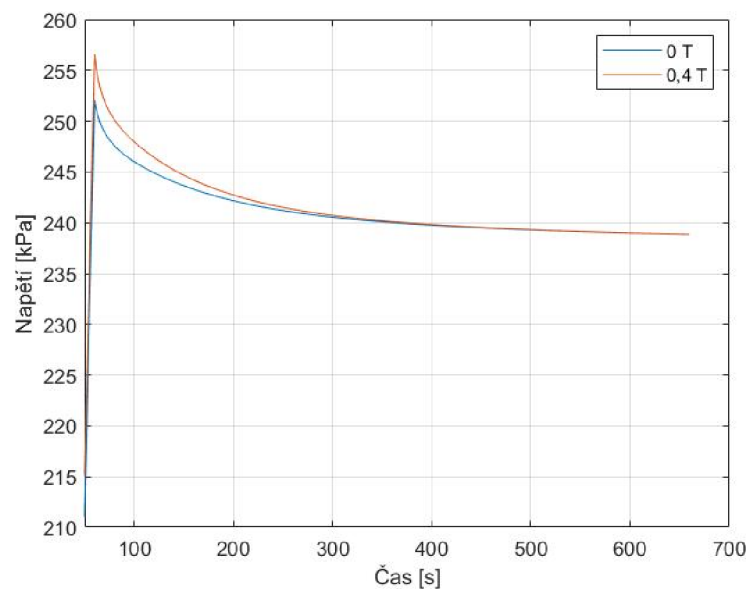
Rozdíly pro vertikální magnetické pole jsou znázorněny na **Obr. 28**. Oproti horizontálnímu poli docházelo při simulaci k nižšímu zvýšení hodnot. Při nižších hustotách magnetického toku (do 0,6 T) bylo pole dokonce nepatrně zeslabováno. Pro příklad při 1,5 T byl rozdíl u materiálu bez mechanického zatížení 10 mT, se zatížením dokonce jen 6,5 mT. To byl přibližně poloviční rozdíl oproti horizontálnímu poli. U zatíženého vzorku se projeví nižší rozdíly oproti nezatíženému v řádu jednotek mT.



Obr. 28 Rozdíl hustot magnetického toku – vertikální pole

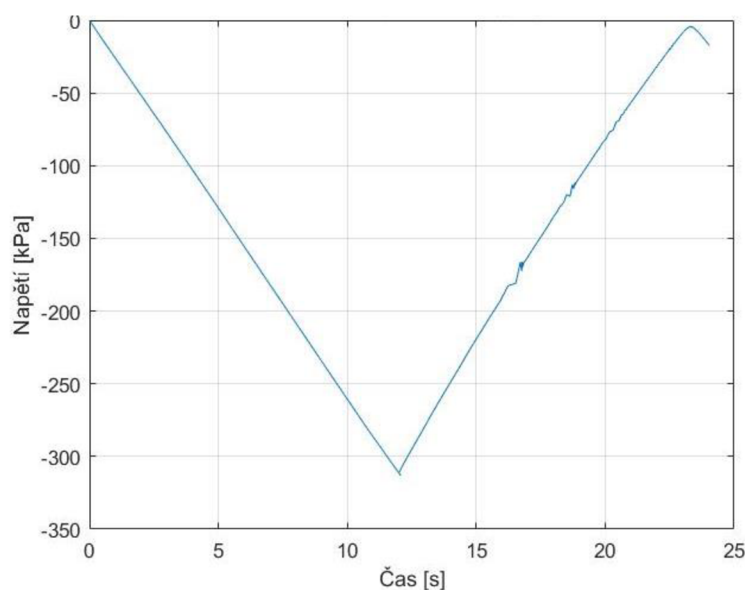
6.2 Relaxace materiálu

V této kapitole jsou popsány výsledky simulace MRE, která byla inspirována experimentem popsaným v příslušném článku (Hosseini, Shojaeefard & Googarchin, 2021). Nejprve je na **Obr. 29** znázorněn průběh napětí při konstantním zatížení na 10 minut. Za tuto dobu napětí kleslo až o 15 kPa.



Obr. 29 Průběh napětí při viskoelasticitě

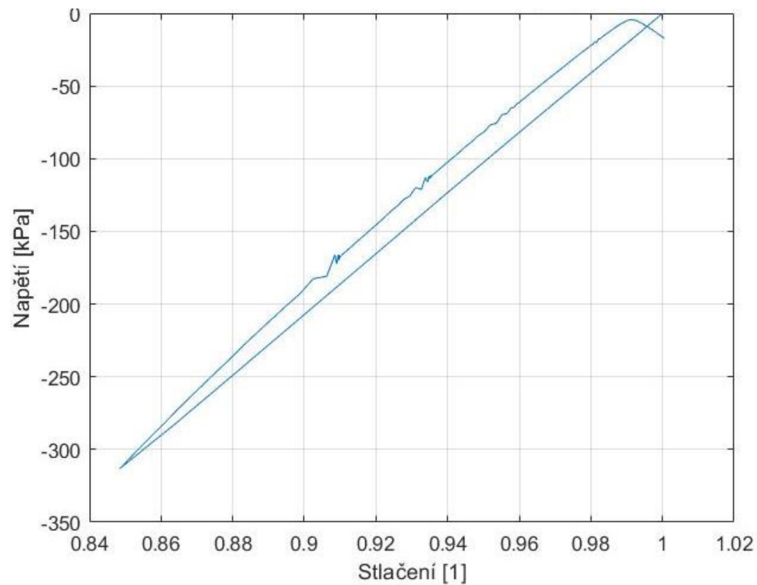
Nejprve byl namáhán vzorek bez působení magnetického pole. Na **Obr. 30** je znázorněn průběh napětí uprostřed vzorku v závislosti na čase. Vzorek podléhal stlačování, a proto napětí nabývalo záporných hodnot. V první fázi napětí rostlo téměř lineárně. Při odlehčování se začínala projevovat relaxace materiálu. Křivka se začala lehce zaoblovat. Ve vzorku bylo dosaženo maximálního napětí 313 kPa.



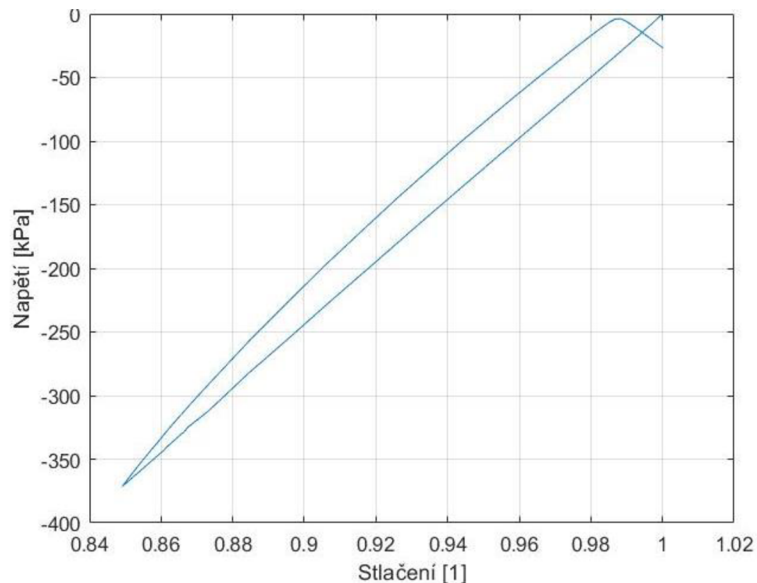
Obr. 30 Relaxace – průběh napětí při 0 T

Relaxace materiálu byla zjevnější, pokud bylo napětí znázorněno ve vztahu k poměrnému prodloužení – v případě komprese stlačení (**Obr. 31**). Na začátku bylo stlačení 1, následně jeho velikost klesala až na 0,85. Výsledky první fáze zatěžování vyjadřuje spodní křivka. Následnou druhou fází – odlehčování – znázorňuje horní křivka. Takovéto chování odpovídá vlastnostem relaxace, při které dochází k poklesu napětí i při konstantní zatěžující síle.

Následoval výpočet s magnetickým polem. Jeho hustota toku byla 0,4 T. Průběh napětí v čase se vlastnostmi nelišil od případu bez magnetismu. Při největším stlačení dosáhlo napětí ve vzorku hodnoty 371 kPa (**Obr. 32**).



Obr. 31 Relaxace – napětí v závislosti na stlačení při 0 T

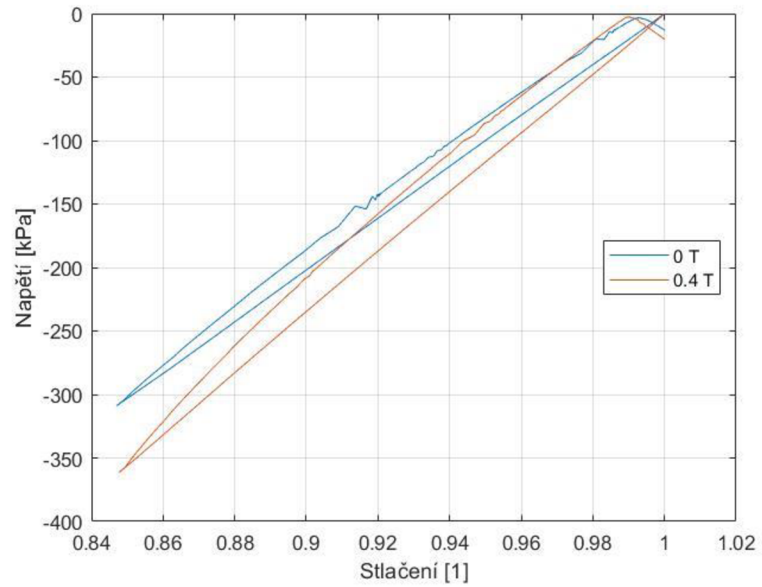


Obr. 32 Relaxace – napětí v závislosti na stlačení při 0,4 T

V porovnání obou případů vyšlo najevo, že bylo-li mechanické zatěžování spojeno s magnetickým působením, docházelo uvnitř materiálu k větší napjatosti. Tento rozdíl byl 58 kPa. V porovnání s měřením, na jehož základě byly tyto výpočty dělány se v simulaci dosáhlo vyšších hodnot napětí. To mohlo být způsobeno zvolením místa na vzorku, kde se napětí získávalo. Nebo se mohlo jednat o rozdíly mezi zvolenými materiálovými modely.

Byla provedena další simulace pro zjištění, zda-li rychlost deformace ovlivňovala napětí vzniklé ve vzorku. Zatěžování na stejnou deformaci bylo dvakrát pomalejší (24 sekund komprese). Závislost napětí v čase byla téměř totožná s předchozí

simulací. Rychlost zatěžování na základě těchto výpočtů neměla vliv na napětí vznikající ve vzorku. Průběh napětí je znázorněn na **Obr. 33**.



Obr. 33 Napětí při poloviční rychlosti zatěžování

7. Závěr

Cílem práce byla simulace chování magnetoreologického elastomeru v závislosti na změnách hodnoty hustoty magnetického toku a smykovém mechanickém zatížení. Pro výpočty byl využit COMSOL Multiphysics.

Nejprve byl vzorek simulován s kvazistatickým zatížením ve dvou typech magnetického pole – horizontálním a vertikálním. V obou polích docházelo ke vzniku vyššího napětí vždy u vzorku s upevněnou horní hranou. To způsobila nemožnost deformace ve vertikálním směru. Nejvíce se napětí koncentrovalo v rozích, a proto se všechny hodnoty zjišťovaly uprostřed vzorku, kde bylo napětí lépe rozloženo. S rostoucí hustotou magnetického toku se zvětšovaly rozdíly v napětí mezi volnými a upevněnými vzorky. Toto chování bylo pozorováno v obou typech polí, lišily se však hodnoty napětí. V horizontálním poli vznikalo nižší napětí než ve vertikálním. Rozdíly však nebyly zásadní, a proto by se v praktickém využití mohly zanedbat. Pokud byl vzorek namáhán smykem, hodnoty napětí byly vyšší v okolí jedné diagonály. V případech bez mechanického zatížení bylo napětí na obou diagonálách stejné.

V další části se výpočet upravil pro zjišťování viskoelastického chování MRE. Materiál byl během 12 sekund stlačen o 2,4 mm a okamžitě uvolněn. I při takto krátké době byla simulací pozorována relaxace, při které se při odlehčení rychleji snižovala hodnota napětí.

Seznam použité literatury

- MARVALOVA, Bohdana. Modelling of magnetosensitive elastomers. In: *Modelling and simulation*. IntechOpen, 2008.
- GONG, X. L., ZHANG, X. Z., & ZHANG, P. Q. (2005). Fabrication and characterization of isotropic magnetorheological elastomers. *Polymer Testing*, Vol. 24, No. 5, pp. 669-676.
- JOLLY, M.R.; CARLSON, J.D.; MUNZO, B.C. & BULLIONS, T.A. (1996). The magnetoviscoelastic response of elastomer composites consisting of ferrous particles embedded in a polymer matrix. *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, 7, 613–622, ISSN 1045-389X
- TUAN, Hoang Sy. Elastic and viscoelastic behaviour of composites with elastomeric matrix. 2010. PhD Thesis. Technická Univerzita v Liberci.
- NAM, Tran Huu; PETŘÍKOVÁ, Iva; MARVALOVÁ, Bohdana. Experimental and numerical research of stress relaxation behavior of magnetorheological elastomer. *Polymer Testing*, 2021, 93: 106886.
- VLACH, Jarmil. Návrh experimentální metody pro stanovení mechanických a magnetických vlastností kompozitů, složených ze silikonových elastomerů, plněných magneticky polarizovatelnými mikročásticemi. 2009. PhD Thesis. Technická Univerzita v Liberci.
- BASTOLA, Anil K.; LI, Lin. A new type of vibration isolator based on magnetorheological elastomer. *Materials & Design*, 2018, 157: 431-436.
- HOSSEINI, Seyyed Mohammad; SHOJAEEFARD, Mohammad Hassan; GOOGARCHIN, Hamed Saeidi. The effect of repetitive magnetic and cyclic loading on the fatigue life prediction of a magnetorheological elastomer. *Journal of Elastomers & Plastics*, 2021, 00952443211038671.
- ZHANG, Bingbing. Material Characterization, Modelling and Simulation of Epoxy Moulding Compounds under High Temperature Storage and Temperature Cycling Thermal Ageing. 2021. PhD Thesis. Universitätsbibliothek der Universität der Bundeswehr München.