



Kmitání kompozitního sendvičového nosníku

Bakalářská práce

Studijní program:

Autor práce:

Vedoucí práce:

B0715A270008 Strojírenství

Matěj Fiedler

prof. Ing. Bohdana Marvalová, CSc.

Katedra mechaniky, pružnosti a pevnosti





Zadání bakalářské práce

Kmitání kompozitního sendvičového nosníku

Jméno a příjmení: **Matěj Fiedler**
Osobní číslo: S19000027
Studijní program: B0715A270008 Strojírenství
Zadávací katedra: Katedra mechaniky, pružnosti a pevnosti
Akademický rok: **2020/2021**

Zásady pro vypracování:

Experimentální zkoumání kmitání kompozitního sendvičového nosníku.

Provedte:

1. Výroba kompozitního nosníku a stanovení materiálových vlastností jednotlivých vrstev.
2. Stanovení tlumících vlastností při volném kmitání nosníku.
3. Stanovení odezvy na vynucené kmitání nosníku.

Rozsah grafických prací:
Rozsah pracovní zprávy:
Forma zpracování práce:
Jazyk práce:

dle potřeby
20-40
tištěná/elektronická
Čeština



Seznam odborné literatury:

1. MILÁČEK, Stanislav. Modální analýza mechanických kmitů. Praha: ČVUT, 1992.
2. JULIŠ, Karel a Rudolf BREPTA. Mechanika. Sv. 2., Dynamika. Praha: SNTL, 1987.

Vedoucí práce:

prof. Ing. Bohdana Marvalová, CSc.
Katedra mechaniky, pružnosti a pevnosti

Datum zadání práce:

31. října 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 bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou bakalářskou 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 bakalářské práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li bakalářskou 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 bakalářská 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.

20. května 2022

Matěj Fiedler

Poděkování

Rád bych poděkoval rodině a přátelům, ale i všem ostatním, kteří mi v průběhu vypracování této bakalářské práce pomáhali a poskytovali cenné rady.

Zejména pak prof. Ing. Bohdaně Marvalové, CSc. za laskavost a trpělivost při konzultacích a za cenné rady při řešení problémů, které tato práce skrývá. Dále také Bc. Lubomíru Sivčákovi za jeho velikou ochotu při měření v laboratoři.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá vibracemi vybraných sendvičových nosníků s magneticky citlivými vrstvami z materiálu SteelFill. Tento materiál je určený pro 3D tisk a skládá se z plastové matrice plněné ocelovým práškem. Nejprve byly zkoumány dynamické a kvazistatické vlastnosti tohoto materiálu. K tomu byla využita zkouška tahem a dynamická mechanická analýza. Poté, co byly základní vlastnosti jako dynamický modul nebo Youngův modul známe, byly vyrobeny čtyři sendvičové nosníky. Každý se skládal ze dvou vnějších vrstev a jádra. To bylo buď ze silikonové pryže, MRE nebo jejich kombinace. Nosníky byly poté vystaveny vynucenému kmitání pomocí shakeru. Tato zkouška navíc probíhala při různých intenzitách magnetického pole, které bylo vyvoláno permanentními magnety. U nosníků byly také zkoumány jejich tlumící vlastnosti. Volný konec nosníku byl vychýlen a laserový snímač sledoval časový průběh této výchylky. Po zpracování dat byly nosníkům určeny logaritmické dekrementy, které se pohybovaly v rozmezí 0,359 pro MRE2 a 0,368 pro SLC2. Hodnoty vlastních frekvencí byly určeny mezi 10 a 26,2 Hz.

Abstract

This bachelor's thesis deals with the vibration of particular sandwich beams. All of the beams had a common feature, their outer layers were made of magneto – sensitive material SteelFill. This material is determined for 3D printing and consists of plastic matrix filled with steel powder. Firstly, the analysis of the Steelfill was conducted. In order to determine fundamental quasi-static and dynamic characteristics of this material, tensile test and Dynamic Mechanical Analysis were applied. When characteristics such as dynamic modulus or Young's modulus were known, two 3D printed thin slices were used to glue each beam together. Four specimens of beams were fabricated and each of them had a different core. All cores consisted of silicone rubber or MRE or their combination with various lengths. In the second part, beams were subjected to forced vibration test enabled by shaker while different magnetic fields generated by permanent magnets were applied on the beam. Consequently, a damped vibration test took place where an initial amplitude was managed simply by an external force applied to the free end of the beam. After the force was released, time course of amplitude was observed. When the last data was processed, logarithmic decrements of the beams could be determined as 0,359 for MRE2 and 0,368 for SLC2. Natural frequencies of the beams were between 10 and 26,2 Hz.

Obsah

Úvod	9
1 Zkouška tahem	10
1.1 Vzorky	10
1.1.1 Typy vzorků	11
1.1.2 Vyznačení bodů	12
1.2 Průběh zkoušky.....	13
1.2.1 Upnutí	13
1.3 Zpracování a interpretace dat	14
1.3.1 Určení modulu pružnosti.....	15
1.4 Vyhodnocení výsledků	17
1.4.1 Rychlost posuvu a orientace struktury	17
1.4.2 Okraj	17
1.4.3 Lom	17
1.5 Závěr - zkouška tahem.....	17
2 Dynamická mechanická analýza	18
2.1 Základy DMA	18
2.1.1 Dynamický modul a jeho složky.....	18
2.1.2 Q800.....	19
2.2 Experiment - DMA	19
2.2.1 Vzorky.....	19
2.2.2 Zvolené namáhání	20
2.2.3 Kalibrace přístroje.....	20
2.2.4 Frekvence	20
2.2.5 Zadání rozměrů a ostatních parametrů.....	21
2.2.6 Průběh měření	21
2.3 Interpretace dat - DMA.....	22
3 Vynucené kmitání	24
3.1 Základy kmitání.....	24
3.2 Konstrukce nosníků	28
3.3 Buzení.....	28
3.4 Magnetická pole	28
3.5 Série 1	30

3.5.1 Nosníky - MRE1 a SLC1	30
3.5.2 Experiment - sestavení	31
3.5.3 Kmitání SLC1	32
3.5.4 Kmitání MRE1	33
3.6 Série 2	33
3.6.1 Nosníky – MRE2 a SLC2	33
3.6.2 Experiment sestavení	34
3.7 Zpracování a interpretace dat	35
4 Tlumicí vlastnosti při volném kmitání	39
4.1 Použité nosníky.....	39
4.2 Experiment.....	39
4.3 Zpracování a interpretace dat	40
4.3.1 Logaritmický dekrement.....	43
5 Závěr.....	45
6 Literatura	46
7 Seznam obrázků	47
8 Seznam tabulek	48

Úvod

Magnetoreologické elastomery, nebo-li MRE jsou magneticky citlivé kompozitní materiály, které se řadí do skupiny chytrých materiálů. Skládají se z poddajné polymerní matrice, která je naplněna měkkými feromagnetickými částicemi o velikosti v řádech mikrometrů až nanometrů. Vlastnosti MRE mohou být ovlivněny i regulovány přítomností magnetického pole. Díky tomu nacházejí uplatnění v celé řadě aplikací od drobných robotů, které je možné díky magnetickému poli ovládat, až po aplikace tlumení [1]. V oblasti tlumení se MRE používá především pro aktivní tlumení vibrací. Oproti pasivním způsobům, které jsou limitované zejména neměnnou tuhostí tlumivého materiálu, nabízí MRE možnost efektivního tlumení širokého spektra vibrací [2].

Tisk z filamentu (struny) se řadí mezi aditivní technologie výroby. Filament je ve formě struny o normalizovaném průměru (nejčastěji 1,75 mm) vtahován rýhovanými kolečky do hlavice, kde se natavuje a následně je vytlačen tryskou, která svým průměrem značně ovlivňuje vlastnosti vytištěné struktury. Vrstvy vyextrudovaného materiálu jsou kladeny na sebe a tím se vytváří požadovaný tvar. Tisk zpravidla probíhá v otevřené atmosféře, a tak jsou vytištěné vrstvy namáhány vlastní tíhou, která není vždy zanedbatelná. Proto se často využívá podpor, které mají zpravidla nižší hustotu a po dokončení tisku se z vlastního výtisku odstraní.

Filamenty s kovovými částicemi mohou po povrchové úpravě vzhledem věrohodně kopírovat skutečné kovové výrobky. Toho se dosahuje nejčastěji broušením či leštěním. Kovové částice mají zpravidla velikost v řádech mikrometrů a objem takových částic v polymerní matrici (nejčastěji PLA) může být až 80 %. Mezi nejčastější materiály kovových částic patří ocel, měď nebo bronz [3].

Záměrem této bakalářské práce bylo použít výtisky z filamentu s feromagnetickými částicemi jako krajní vrstvy kompozitního sendvičového nosníku. Proto bylo nejprve zapotřebí zjistit kvazistatické a dynamické vlastnosti těchto vrstev a až poté se přistoupilo k výrobě a zkoušení samotných nosníků.

1 Zkouška tahem

Předmětem této části bakalářské práce je určení kvazistatických vlastností vzorků z materiálu SteelFill od firmy ColorFabb, zejména pak vlivu tištěné struktury na modul pružnosti E [MPa]. Ten byl zjišťován zkouškou tahem na stroji Instron. Modul pružnosti SteelFillu je uvedený výrobcem jako 3000 MPa bez bližší specifikace. Materiál je k dostání ve formě struny o průměrech 1,75 mm a 2,85 mm, je určen pro 3D tisk a tvoří ho polymerní matrice naplněná ocelovým práškem. Výrobce materiál řadí mezi kompozitní materiály a jeho vlastnosti popisuje jako „slightly magnetic“ – slabě magnetický. Velikost ani objem částic výrobce neuvádí [4], [5].

TYPICAL MATERIAL PROPERTIES			
Physical properties	Unit	Value	Method
Density	g/cm ³	3,13	ISO 1183
Humidity absorption (23°C,50%RH)	%	0,3	
Tensile Strength	MPa	23	ISO 527
Flexural Strength	MPa	30	ISO 178
Flexural Modulus	MPa	3000	ISO 178
Tensile Elongation@break	%	1-3	ISO 527
Impact Strength (Izod-Un 23°C)	kJ/m ²	10	ISO 180

Obr. 1 Údaje uvedené výrobcem [5]



Obr. 2 Trhací stroj Instron 30 kN

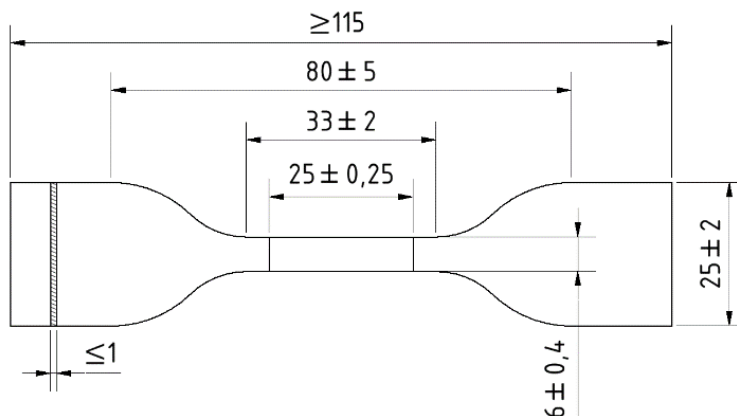
1.1 Vzorky

Vzorky byly vytištěny na 3D tiskárně Průša i3 MK3S. Tvar vzorků byl zvolen dle ISO 527. Na tisk všech vzorků byla použita ocelová vytlačovací tryska o průměru 0,4 mm a struna o průměru 1,75 mm. Tisk probíhal dle navrženého modelu ve formátu stl. Všechny vzorky byly natištěny pěti vrstvami s navolenou tloušťkou vrstvy 0,2 mm. Tloušťka každého výtisku po vytisknutí a vychladnutí byla 1,2 mm a průměrná šířka zúžené části vzorku byla 6 mm, měřeno posuvným

měřítkem. Při tisku byla tiskací hlava přehřáta na 215 °C a podložka tiskárny na 60 °C. Průtočná rychlost filamentu byla nastavena na 15 mm³/s.

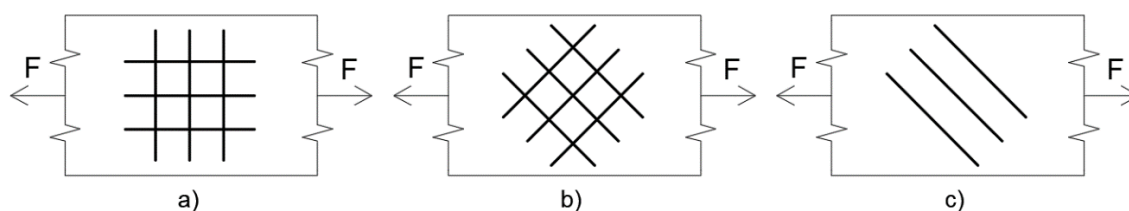
1.1.1 Typy vzorků

Zvoleno bylo několik způsobů, jak metodou vytlačování filamentu dosáhnout tvaru, který norma ukládá. Celkem bylo zhotoveno 12 vzorků, které byly vytištěny se stoprocentní výplní, a to buď s tištěným okrajem nebo bez něj.



Obr. 3 Výkres tvaru vzorku pro zkoušku tahem dle ISO 527

Vzorky bez tištěného okraje měly znatelné jednotlivé linie vrstev a to vytvořilo vroubkovaný obrys vzorku. Okraj spočíval v natištění jednoduté kontury v každé vrstvě kolem vnitřní struktury. To zakrylo nerovnosti a obrys vzorků se navenek jevil jako hladký. Smysl označení směrů struktury (= výplně) je znázorněn na Obr. 4, kde a) $\pm 90^\circ$, b) $\pm 45^\circ$ a c) 45° . Celkem byly podrobeny zkoušce 4 vzorky z každé skupiny, přičemž vždy jeden byl bez okraje. Čísla vzorků v jednotlivých skupinách jsou zaneseny do tabulky 1. Všechny vzorky po zkoušce tahem jsou na Obr. 5 a Obr. 6.

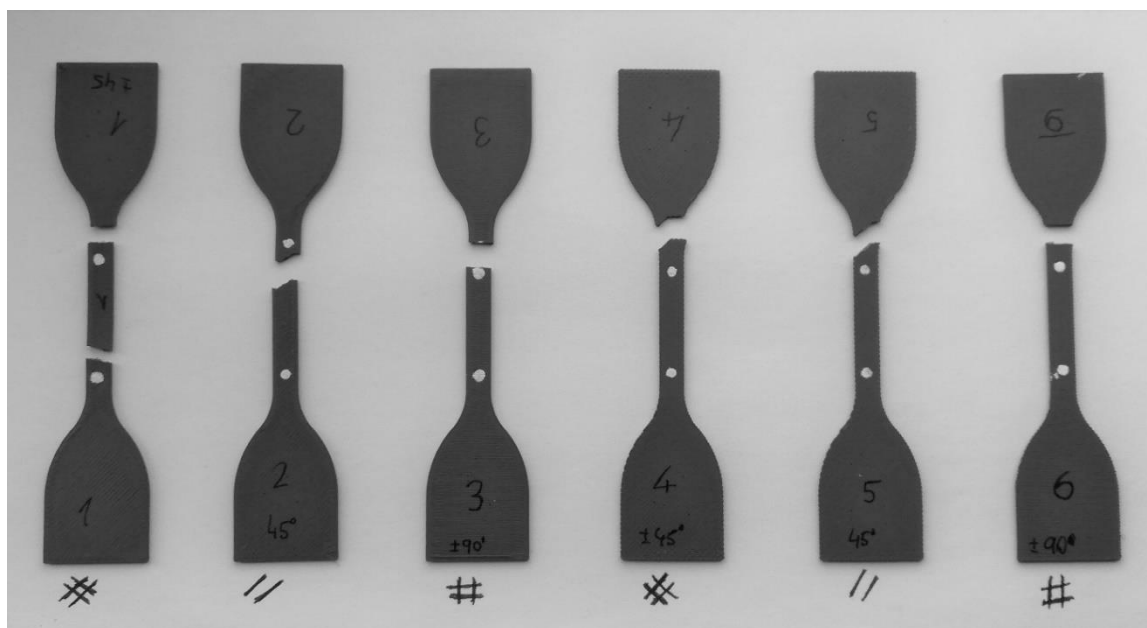


Obr. 4 Znázornění směrů vrstev

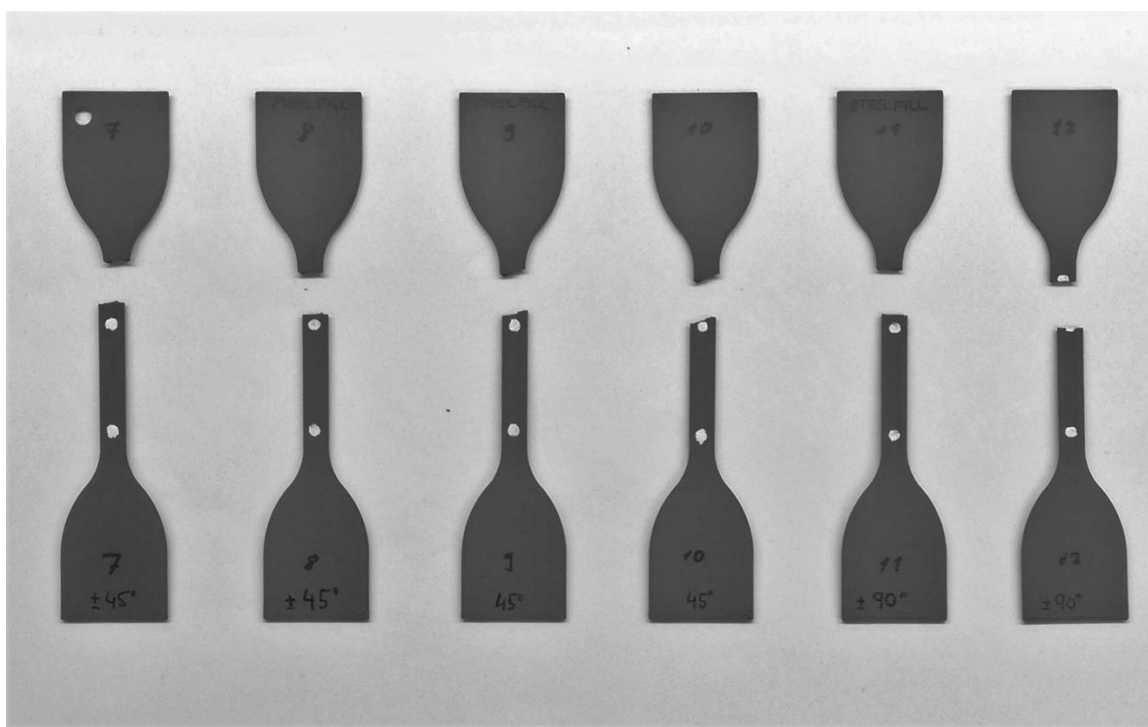
Struktura	Čísla vzorků
$\pm 90^\circ$	3, 11, 12
$\pm 45^\circ$	1, 7, 8
45°	2, 9, 10
$\pm 90^\circ, \pm 45^\circ, 45^\circ$	*6, *4, *5

*vzorky bez tištěného okraje

Tabulka 1 Čísla vzorků a jejich struktury



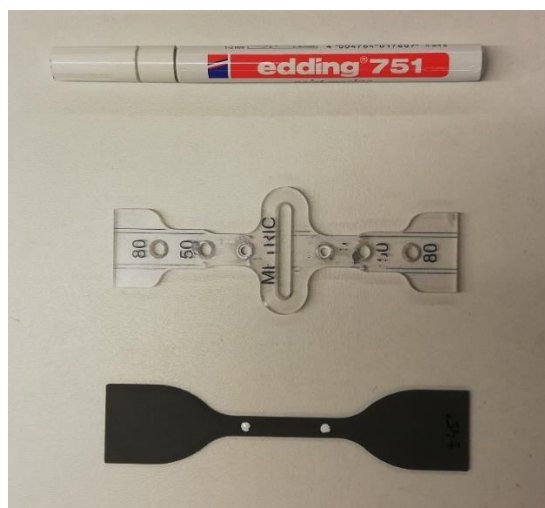
Obr. 5 Přetržené vzorky 1-6, první série



Obr. 6 Přetržené vzorky 7-12, druhá série

1.1.2 Vyznačení bodů

Na všech vzorcích byly dle šablony na Obr. 7 vyznačeny bílým fixem dva body ve vzdálenosti 25 mm od sebe, které byly při zkoušce snímány video-extenzometrem. Přímou ze zkoušky tak byla k dispozici i data poměrného prodloužení.



Obr. 7 Vyznačené body pro video-extenzometr

1.2 Průběh zkoušky

Vzorky byly v několika sériích. Od čísla 1 do čísla 6 byly zatěžovány konstantní rychlostí 2 mm/min. Od čísla 7 do čísla 12 byly zatěžovány konstantní rychlostí 1 mm/min. Menší rychlost byla zvolena z důvodu prodloužení trvání zkoušky na minimální doporučenou hodnotu dle normy ISO 527 – 1 minuta.

1.2.1 Upnutí

K upnutí vzorků bylo použito klínových čelistí, které byly dotaženy manuálně.

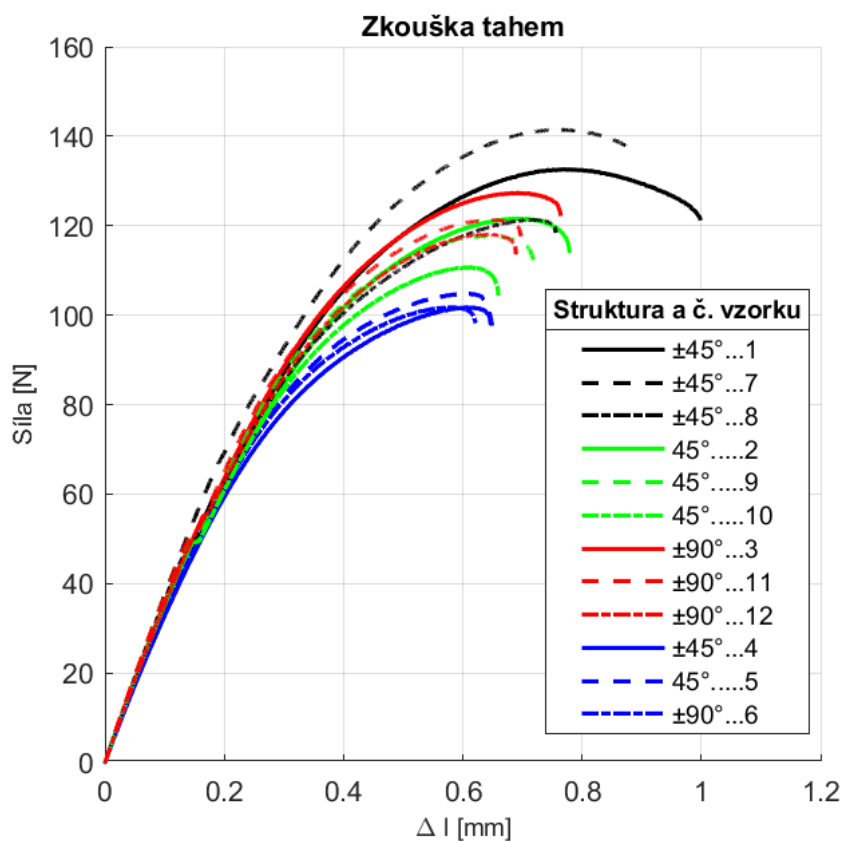


Obr. 8 Upnutí vzorku do klínových čelistí Instronu

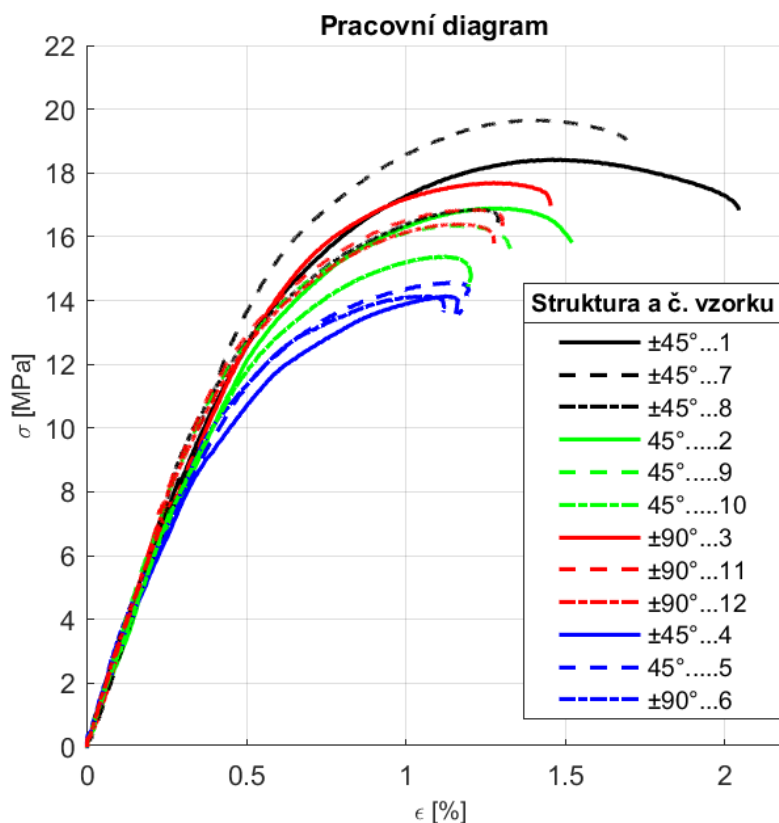
1.3 Zpracování a interpretace dat

Po zkoušce byla data o průběhu síly, prodloužení a poměrného prodloužení exportována ve formátu csv a zpracována v programu MATLAB, verze R2019b.

Dva grafy obsahující naměřená data všech dvanácti vzorků jsou na Obr. 9 $F - \Delta l$ a na Obr. 10 $\sigma - \varepsilon$. Jednotlivé barvy oddělují skupiny vzorků s rozdílnou strukturou. Skupina vyznačená modře byla natištěna bez okraje.



Obr. 9 Skutečné hodnoty naměřené při zkouškách tahem

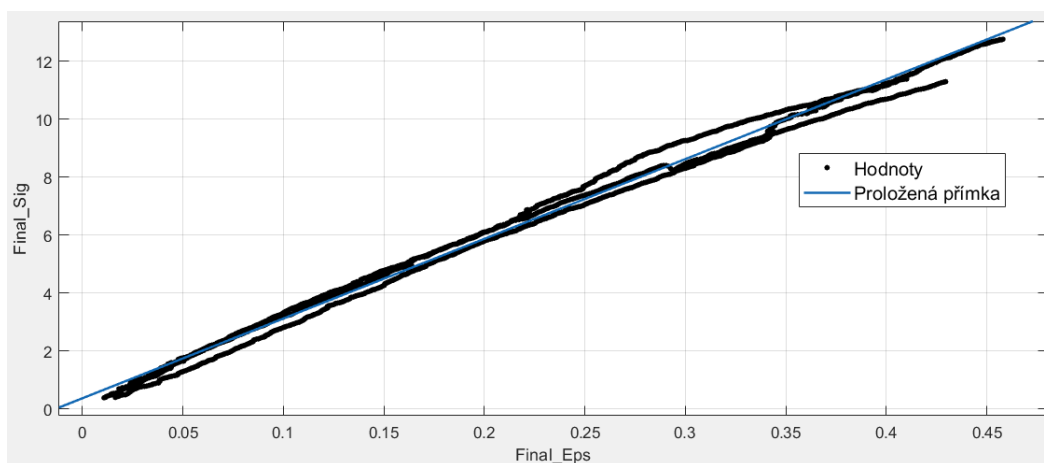


Obr. 10 Pracovní diagram pro všechny vzorky

1.3.1 Určení modulu pružnosti

Pro zjištění modulu pružnosti E byla vybrána přibližně lineární část grafu $\sigma - \epsilon$ a metodou nejmenších čtverců jí byla proložena přímka. Vypočtená směrnice (hodnota p_1 na Obr. 12 a Obr. 14) udává modul pružnosti E [MPa]. Takto byl získán modul pružnosti pro každou skupinu vzorků.

Na Obr. 11 je vidět proložení pro skupinu b) $\pm 45^\circ$ (vzorky 1, 7, 8), na Obr. 12 pak jeho parametry. Za hodnotou 0,2 je zřejmé, že se průběh rapidně mění. Za to může porušení tištěného okraje. Vzorky bez okraje takové prudké změny nevykazovaly. Při uvažování lineární části jen do přetržení okraje se modul pružnosti mírně zvýší. Proložení přímkou pro skupinu b) $\pm 45^\circ$ do přetržení okraje ukazuje Obr. 13 a parametry proložení jsou na Obr. 14.



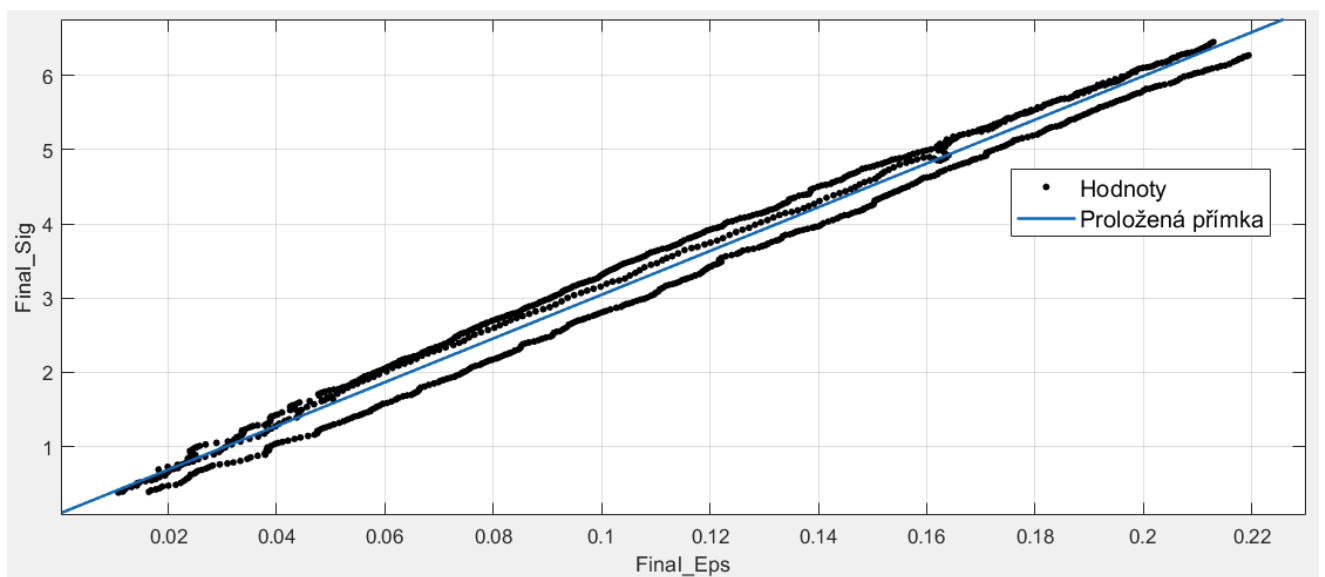
Obr. 11 Určení modulu pružnosti pro skupinu $\pm 45^\circ$ ze zdánlivě lineární části

Results

Linear model Poly1:
 $f(x) = p1*x + p2$
Coefficients (with 95% confidence bounds):
 $p1 = 2751 (2740, 2762)$
 $p2 = 0.3644 (0.3356, 0.3932)$

Goodness of fit:
SSE: 199.1
R-square: 0.9915
Adjusted R-square: 0.9915
RMSE: 0.3092

Obr. 12 Parametry proložení pro skupinu $\pm 45^\circ$ ze zdánlivě lineární části



Obr. 13 Určení modulu pružnosti pro skupinu $\pm 45^\circ$ do přetržení okraje

Results

Linear model Poly1:
 $f(x) = p1*x + p2$
Coefficients (with 95% confidence bounds):
 $p1 = 2944 (2921, 2968)$
 $p2 = 0.1022 (0.07241, 0.132)$

Goodness of fit:
SSE: 36.93
R-square: 0.9857
Adjusted R-square: 0.9857
RMSE: 0.203

Obr. 14 Parametry proložení přímkou pro skupinu $\pm 45^\circ$ do přetržení okraje

Takto bylo určeno celkem 6 hodnot modulů pružnosti. Pro skupiny s okrajem byl vždy jeden z modulů pružnosti určen ze zdánlivě lineární části a poté z části jen do přetržení okraje, přičemž ten byl vždy vyšší. Skupině bez tištěného okraje byl určen jen jeden modul pružnosti. Všechny moduly pružnosti jsou vyneseny v tabulce 2.

Struktura/čísla vzorků	E [MPa] do lomu	E [MPa] za lom
$\pm 90^\circ/3$, 11, 12	3023	2975
$\pm 45^\circ/1$, 7, 8	2944	2751
$45^\circ/2$, 9, 10	2861	2622
* $\pm 90^\circ/4$, * $\pm 45^\circ/5$, * $45^\circ/6$	2967	-

*vzorky bez okraje

Tabulka 2 Moduly pružnosti všech skupin

1.4 Vyhodnocení výsledků

1.4.1 Rychlost posuvu a orientace struktury

Orientace tištěné struktury ztrácela vliv na tvar lomu s klesající rychlostí posuvu. U první série vzorků se strukturou 45° s rychlostí posuvu 2 mm/min byl směr lomu téměř totožný se směrem tištěné struktury. S poloviční rychlostí, 1 mm/min, tento jev zanikl a lom byl téměř kolmý ke směru síly.

1.4.2 Okraj

Na tahových diagramech pro všechny skupiny s okrajem byla zřetelná náhlá změna, která byla způsobena přetržením tištěného okraje. Tahové diagramy vzorků bez okraje takové změny nevykazují. Jeho absence umožnila vznik velikostně významným vrubům na okrajích daných vzorků. To výrazně zvýšilo koncentraci napětí na obvodu a všechny vzorky bez tištěného okraje vykázaly nejnižší pevnost.

1.4.3 Lom

Všechny vzorky se porušily křehkým lomem a v téměř stejném místě – nad značkou u horní pohyblivé čelisti. Na straně, která nebyla přilehlá k podložce, byl lom více jednodušší, zatímco na straně opačné se promítala do lomu struktura vytištěného vzorku.

1.5 Závěr - zkouška tahem

Všechny výtisky se podařilo natisknout bez problémů. To značí, že teploty a rychlosti tisku i teploty byly nastaveny vhodně. Na výsledky zkoušek mělo výrazný vliv několik faktorů. Určené moduly pružnosti výtisků (do přetržení okraje) se lišily v průměru o méně než 2 % od modulu pružnosti materiálu uvedeného výrobcem. To značí, že vnitřní struktura modul pružnosti téměř neovlivňuje, zatímco přerušení okraje směrnicí přímky, a tím i modul pružnosti, snižuje. Vzorky s absencí okraje dosáhly velmi podobných hodnot. Nejvyšší pevnost vykázaly vzorky se strukturou $\pm 45^\circ$, patrně v důsledku rovnoměrného rozdělení síly mezi oba směry. Vzorky se strukturou 45° s okrajem vykázaly nejnižší pevnost oproti ostatním skupinám s okrajem. Namáhání materiálu bylo značně nesymetrické a ve skutečnosti se přetrhl jen vlastní tištěný okraj, zbytek lomu proběhl po směru tištěné struktury.

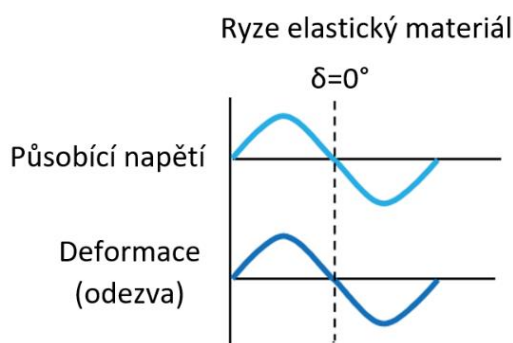
2 Dynamická mechanická analýza

Cílem provádění dynamické mechanické analýzy – DMA - bylo zjistit dynamické charakteristiky materiálu Steelfill jako ztrátový modul – E'' (Loss modulus), paměťový modul – E' (Storage modulus) a jejich poměr - tangens Delta.

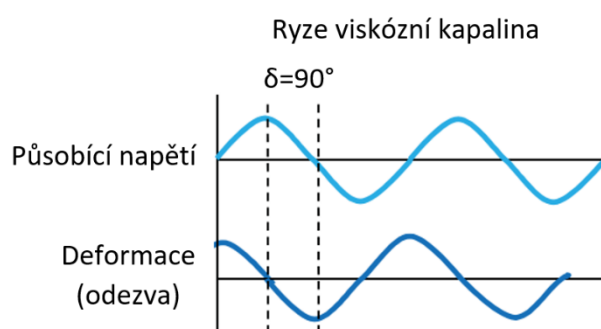
2.1 Základy DMA

2.1.1 Dynamický modul a jeho složky

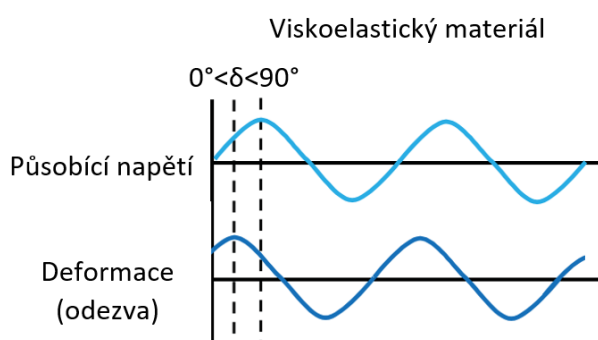
Při dynamických zkouškách se modul označuje nejčastěji jako E^* – dynamický modul a k němu příslušící napětí σ^* – komplexní napětí. Během zkoušky je ve vzorku vyvoláváno napětí o harmonickém (sinusovém) průběhu a zároveň se sleduje průběh deformace. Ideálně pružné (ideálně elastické) materiály mají odezvu na napětí okamžitou, výsledná deformace je tedy společně s napětím dokonale ve fázi. Ryze viskózní kapaliny fázově zpožďují průběh deformace o 90° vůči napětí. Viskoelastické materiály jsou kombinací výše uvedených materiálů. Určitou část mechanické energie přeměňují na tepelnou energii a průběh deformace se za napětím opozdí o určitý fázový posun δ . Všechny tři varianty jsou znázorněny na Obr. 15, 16 a 17 [7].



Obr. 16 Odezva ryze elastického materiálu [6]



Obr. 15 Odezva ryze viskózní kapaliny [6]

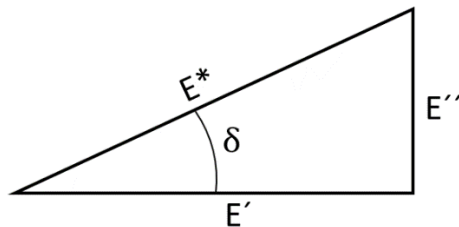


Obr. 17 Odezva viskoelastického materiálu [6]

Dynamický modul můžeme rozdělit také na reálnou a imaginární složku dle následujícího vztahu [7].

$$E^* = E' + iE'' \quad (1)$$

E' představuje schopnost materiálu uchovávat energii, zatímco E'' nám říká, nakolik je materiál schopen energii disipovat. Všechny tři členy můžeme také vyznačit vektorově a vytvoříme tak pravoúhlý trojúhelník, kde dynamický modul E je přepona a E' společně s E'' jsou odvěsny. Fázový posun δ je právě úhel, který svírá dynamický modul s E' . [6]



Obr. 18 Složky dynamického modulu

Z tohoto uspořádání vyplývají následující vztahy [6].

$$E' = E^* \cdot \cos \delta \quad (2)$$

$$E'' = E^* \cdot \sin \delta \quad (3)$$

$$\tan \delta = \left(\frac{E''}{E'} \right) \quad (4)$$

2.1.2 Q800

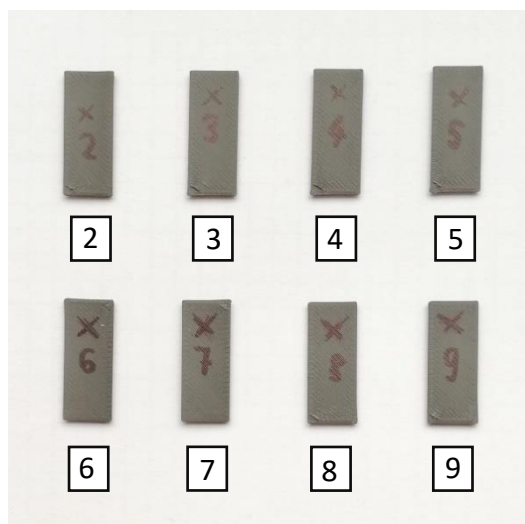
Přístroj Q800 je produkt společnosti TA Instruments pro dynamickou mechanickou analýzu.

Umožňuje zatěžovat vzorky různými typy namáhání (ohyb, tah, stříh), a to při různých teplotách i frekvencích. Silový rozsah je 0,0001 N ÷ 18 N a rozsah frekvencí 0,01 Hz ÷ 200 Hz. V případě tříbodového ohybu přístroj dovoluje dvě velikosti vzorku pro vzdálenost podpor 20 mm a 50 mm. [6]

2.2 Experiment - DMA

2.2.1 Vzorky

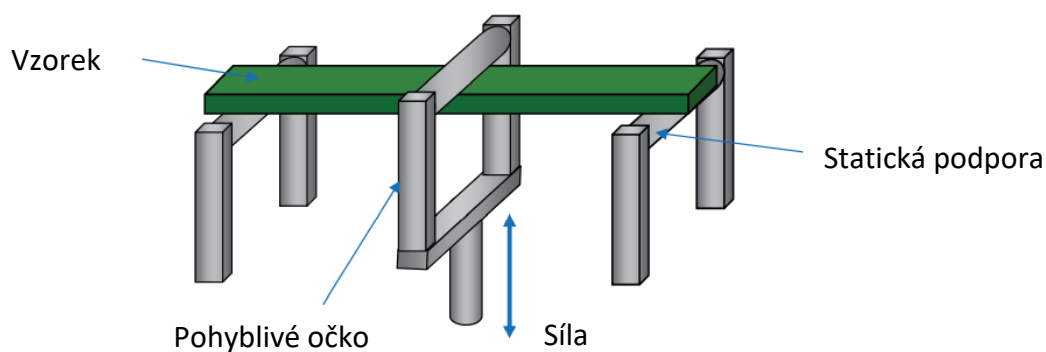
Měření proběhlo na osmi vzorcích, které byly vytištěny na 3D tiskárně Průša i3 MK3S ocelovou tryskou o průměru 0,4 mm. Rozměry výtisků byly 25x10x1,2 mm. Nastavení tisku bylo stejné jako pro vzorky na zkoušku tahem. Všechny vzorky měly strukturu $\pm 45^\circ$ a byly natištěny s okrajem. Tato struktura byla zvolena, protože ve zkušence tahem vykazovala nejvyšší pevnost a kvalitu lomu. Všechny vzorky jsou na Obr. 19.



Obr. 19 Vzorky pro DMA

2.2.2 Zvolené namáhání

Typ zkoušky byl zvolen tříbodový ohyb v konfiguraci, kdy se oba konce nosníku mohou volně posouvat.



Obr. 20 Schéma tříbodového ohybu [6]

[1]

2.2.3 Kalibrace přístroje

Před samotnou zkouškou proběhla kalibrace na velikost menšího vzorku (rozteč podpěr 20 mm) pomocí ocelového kalibračního kusu.

2.2.4 Frekvence

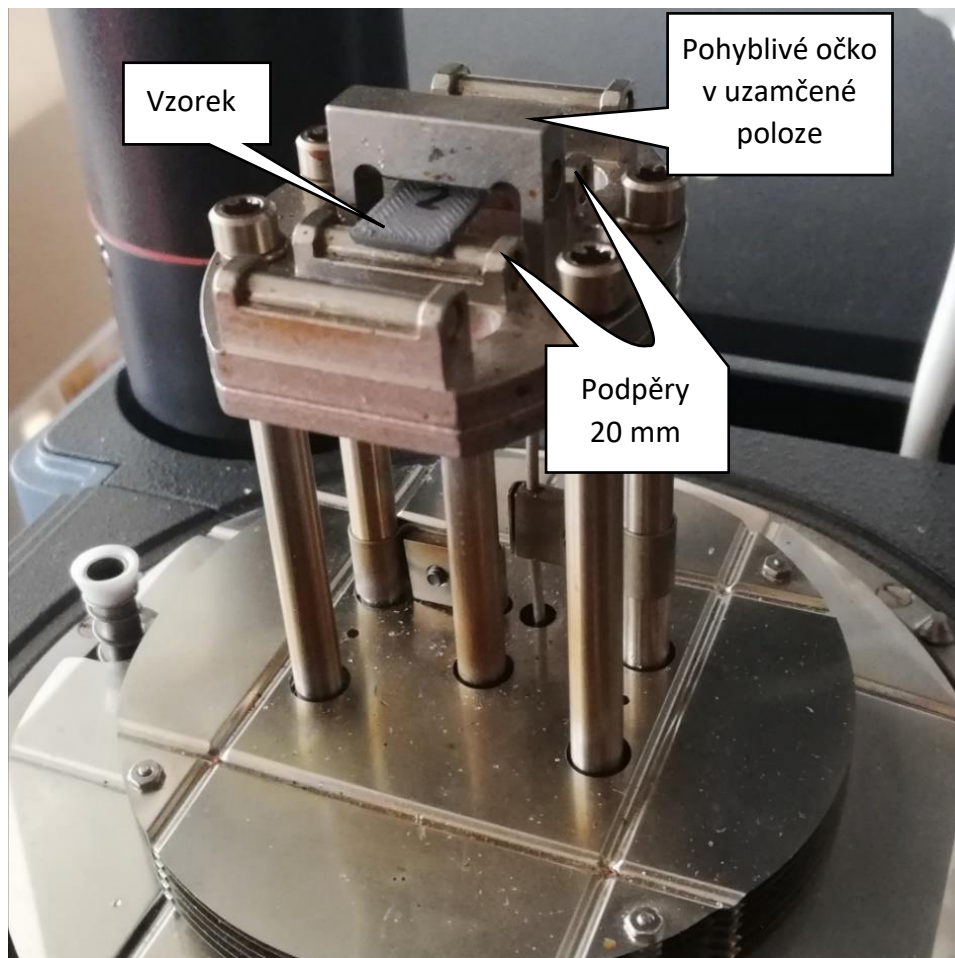
Zkoušení probíhalo v rozmezí 1-30 Hz. Průběh jednotlivých frekvencí byl zvolen jako „logaritmický sweep“. Celkem bylo v rozsahu 1-30 Hz 14 frekvencí, kterými byl vzorek zatěžován.

2.2.5 Zadání rozměrů a ostatních parametrů

Na závěr byly do programu zadány rozměry vzorku. Materiál, který byl za podpěrami se již na výsledcích nijak nepodílel, ale zabezpečoval setrvání vzorku na daném místě. To je podstatné hlavně pro materiály, které by se zvýšením teploty mohly prohnut a z podpor vypadnout. Velikost amplitudy byla zvolena 15 μm a velikost síly pro ohyb 0,3 N. Byla snaha provést zkoušku při pokojové teplotě 20 °C. Jen ale samotným chodem stroje v komoře značně roste teplota, která byla při zkoušce prvního vzorku 26,5°C a při zkoušce posledního vzorku o dva stupně vyšší. Temperační doba (vzorek setrvává nehybně v uzavřené komoře před započítáním zkoušky) byla nastavena na 5 minut.

2.2.6 Průběh měření

Po kalibraci se vzorek opatrně provlékl očkem a uložil se na podpěry tak, aby k nim byla jeho podélná osa kolmo. Dále se plovoucí očko uzamklo v pozici, kdy se dotýká vzorku. Poté byla komora uzavřena zaklopením horního víka a po uplynutí temperační doby se zkouška automaticky spustila.

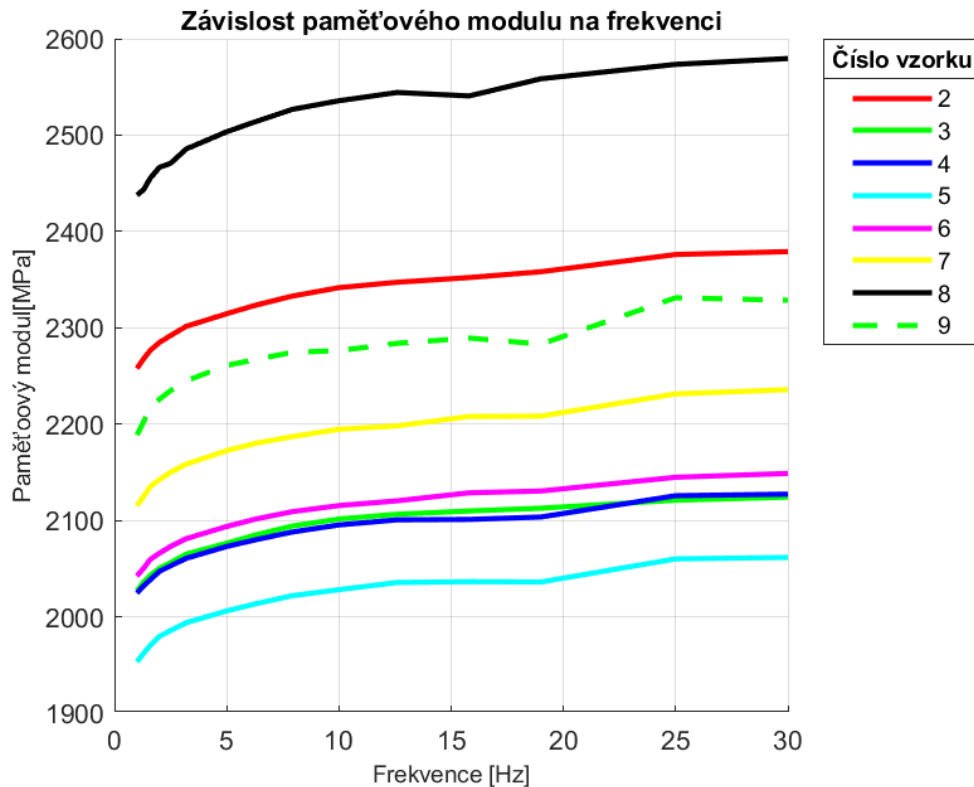


Obr. 21 Vzorek připravený ke zkoušce

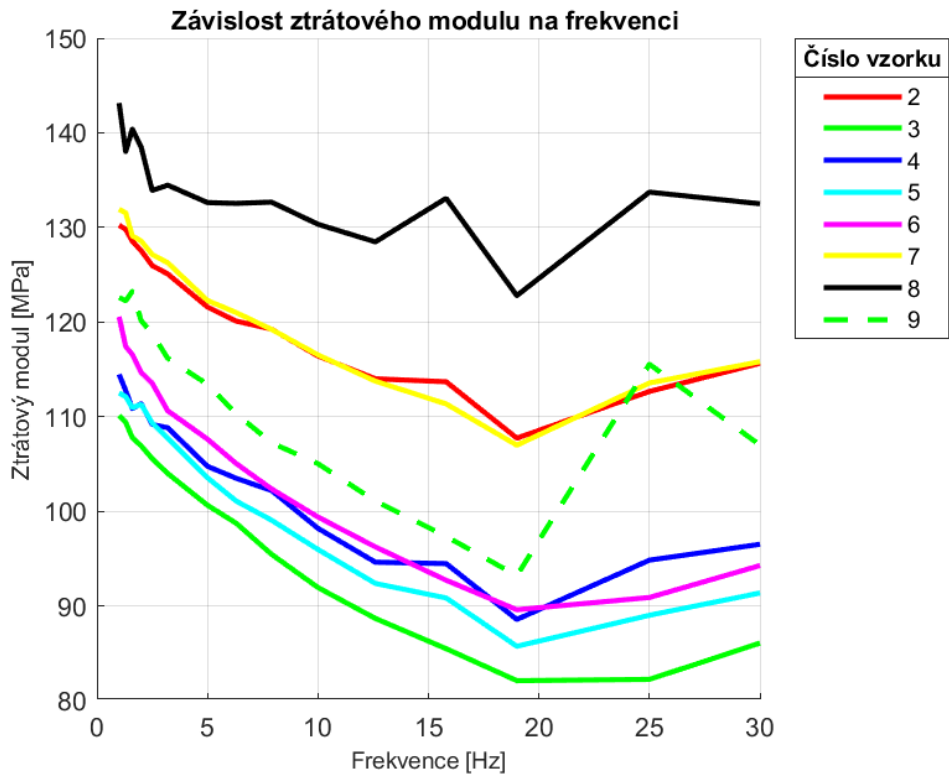
2.3 Interpretace dat - DMA

Data byla z programu TA Universal Analysis 2000 vyexportována ve formátu csv a zpracována v programu MATLAB, verze 2019b.

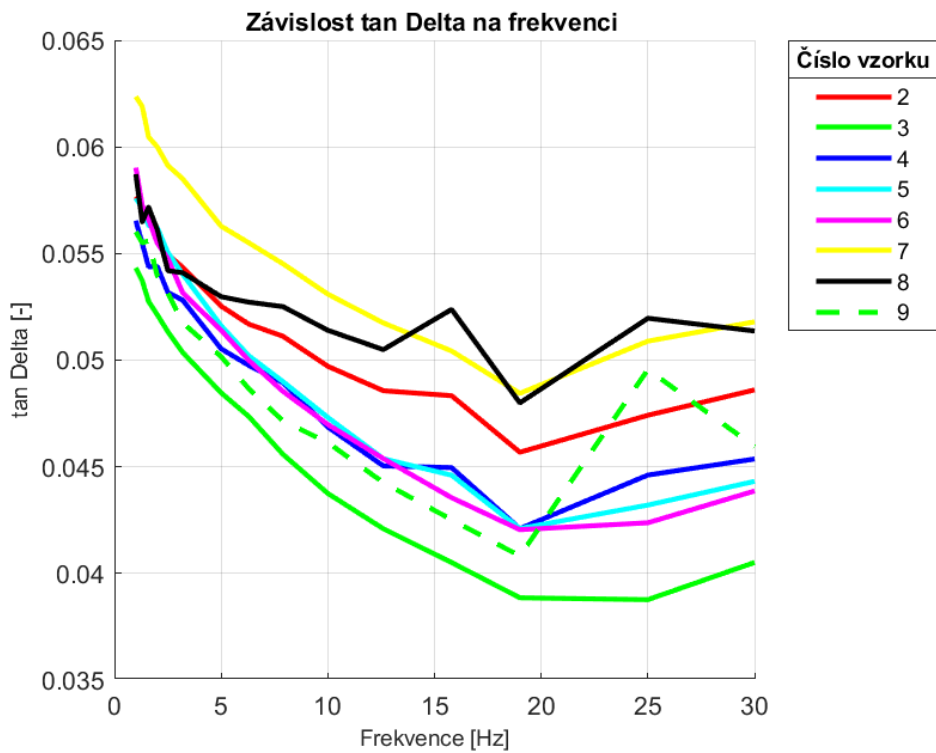
Bylo vykresleno několik grafů popisujících dynamické vlastnosti materiálu Steelfill. Závislost paměťového i ztrátového modulu na frekvenci do 30 Hz je znázorněná na Obr. 22 a Obr. 23. Závislost jejich poměru – tangens Delta na frekvenci je pak vykreslena na Obr. 24. Dle vykreslených grafů lze říci, že materiál je viskoelastický.



Obr. 22 Graf závislosti paměťového modulu na frekvenci



Obr. 23 Graf závislosti ztrátového modulu na frekvenci



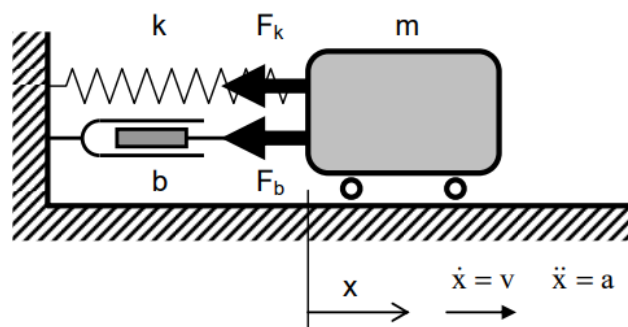
Obr. 24 Graf závislosti tan Delta na frekvenci

3 Vynucené kmitání

Experiment vynuceného kmitání spočíval v uchycení jednoho konce nosníku na shaker, který nosník rozkmital. U druhého, volného konce byly umístěny magnety a sledoval se vliv intenzity magnetického pole na vlastní frekvenci nosníků. Poloha nosníků byla na obou koncích sledována pomocí laserových snímačů.

3.1 Základy kmitání

Přítomnost pasivních odporů a odporů prostředí prakticky nelze odstranit, a tak jsou všechny reálné kmitavé děje tlumené. To znamená, že se amplituda kmitání postupně snižuje až na nulovou hodnotu. V mechanických modelech je tento jev postihnut odporem závislým na rychlosti. Takové tlumení nazýváme viskózním tlumením a k jeho realizaci ve schématech slouží hydraulický tlumič, který je do sestavy zapojen paralelně k pružině. Mechanické schéma takové soustavy s 1° volnosti je na Obr. 25. [7]



Obr. 25 Mechanické schéma tlumeného kmitání soustavy s 1° volnosti [8]

Posunem tělesa vznikne v pružině směrná síla F_k . Ta je lineárně závislá na deformaci pružiny a tedy i na souřadnici posuvu tělesa [8]

$$F_k = k \cdot x . \quad (5)$$

Tlumení, které tlumič poskytuje, je lineárně závislé na rychlosti a vyvozuje sílu F_b [8]

$$F_b = b \cdot v = b \cdot \dot{x} . \quad (6)$$

Pohybová rovnice tlumené soustavy má tedy tvar [8]

$$m \cdot \ddot{x} + b \cdot \dot{x} + k \cdot x = 0 . \quad (7)$$

Po vydělení hmotností dostaneme alternativní tvar

$$\ddot{x} + 2 \cdot \delta \cdot \dot{x} + \Omega_0^2 \cdot x = 0, \quad (8)$$

ze kterého plyne vlastní úhlová frekvence Ω_0 [rad/s]

$$\Omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (9)$$

a konstanta doznívání [8]

$$\delta = \frac{b}{2 \cdot m}. \quad (10)$$

Vlastní úhlová frekvence společně s konstantou doznívání popisují vlastní úhlovou frekvenci tlumeného kmitání Ω [rad/s] [8]

$$\Omega = \sqrt{\Omega_0^2 - \delta^2}. \quad (11)$$

Dalšími úpravami dostaneme vztahy pro vlastní frekvenci f [s^{-1}] a periodu T [s] [8]

$$f = \frac{\Omega_0}{2 \cdot \pi} \quad (12)$$

$$T = \frac{2 \cdot \pi}{\Omega_0}. \quad (13)$$

Budeme-li uvažovat tvar řešení pohybové rovnice (7) nebo (8) ve tvaru

$$x_{(t)} = C \cdot e^{\lambda \cdot t}, \quad (14)$$

pak bude charakteristická rovnice ve tvaru

$$\lambda^2 + 2 \cdot \delta + \Omega_0^2 = 0 \quad (15)$$

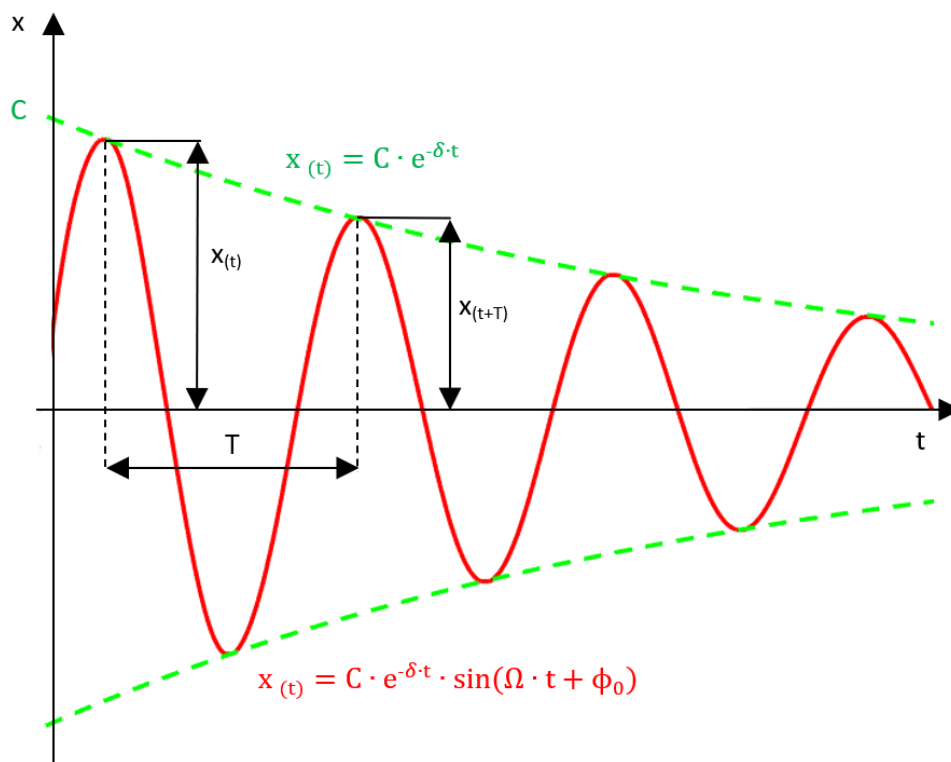
s kořeny [8]

$$\lambda_{1,2}^2 = -\delta \pm \sqrt{\delta^2 - \Omega_0^2} = -\delta \pm i \cdot \sqrt{\Omega_0^2 - \delta^2}. \quad (16)$$

Reálná složka kořenů zde postihuje tlumení a imaginární část frekvenci kmitání. Aby měl kmitavý děj znaky exponenciálního poklesu amplitudy a přitom kmital, nesmí být tlumení nadkritické. V případě, že bude nadkritické, což lze zapsat také jako $\delta > \Omega_0$, kmitání vůbec nenastane a děj se exponenciálně utlumí [8].

Pro podkritické tlumení je řešení rovnice (7) nebo (8) ve tvaru (17) a časový průběh takového podkriticky tlumeného kmitání je na Obr. 26 [8]

$$x(t) = C \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin(\Omega_0 \cdot t + \phi_0). \quad (17)$$



Obr. 26 Časový průběh výchylky při podkritickém tlumení

Integrační konstanty C a ϕ_0 se opět určí z okrajových podmínek [8]

$$C = \sqrt{x_0^2 + \frac{(v_0 + x_0 \cdot \delta)^2}{\Omega_0^2}} \quad (18)$$

$$\phi_0 = \arctan \frac{\Omega \cdot x_0}{v_0 + x_0 \cdot \delta}. \quad (19)$$

Chceme-li vyjádřit logaritmický dekrement ϑ , musíme dát do poměru velikost dvou po sobě jdoucích amplitud a tento poměr zlogaritmovat. Ty jsou v Obr. 26 jsou uvedeny jako $x(t)$ a $x(t+T)$ [8]

$$\frac{x(t)}{x(t+T)} = \frac{C \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin [\Omega \cdot t + \phi_0]}{C \cdot e^{-\delta \cdot (t+T)} \cdot \sin [\Omega \cdot (t+T) + \phi_0]} = \frac{e^{-\delta \cdot t}}{e^{-\delta \cdot (t+T)}} = e^{-\delta \cdot t} \cdot e^{\delta \cdot (t+T)} = e^{\delta \cdot T} \quad (20)$$

$$\vartheta = \ln \frac{x(t)}{x(t+T)} = \delta \cdot T = \frac{2 \cdot \pi \cdot \delta}{\sqrt{\Omega_0^2 - \delta^2}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \xi}{\sqrt{1 - \xi^2}}. \quad (21)$$

Poměr vlastní úhlové frekvence netlumených kmitů a konstanty doznívání se nazývá koeficient útlumu [8]

$$\xi = \frac{\delta}{\Omega_0}. \quad (22)$$

V případě potřeby přesnějšího určení logaritmického dekrementu je zde možnost vybrat nesousedící amplitudy. Potom ve jmenovateli přibude počet period, přes které se výpočet provádí a výraz se vynásobí převrácenou hodnotou počtu period [9]

$$\vartheta = \frac{1}{n} \cdot \ln \frac{x(t)}{x(t+n \cdot T)}. \quad (23)$$

3.2 Konstrukce nosníků

Pro experiment vynuceného kmitání byly vyrobeny 4 kusy nosníků sendvičové konstrukce. Vnější vrstvy byly vytištěny z materiálu SteelFill s rozměry 145x20x1,2 mm. Struktura byla zvolena $\pm 45^\circ$ s okrajem, protože při zkoušce tahem vyšla jako ta s nejvyšší pevností a kvalitou lomu. Další nastavení tisku bylo stejné jako pro vzorky na zkoušku tahem. Jádru mělo u různých nosníků různé rozměry a bylo zhotoveno buď ze silikonové pryže, z kombinace silikonové pryže a MRE nebo z MRE samotného. Kromě toho měl každý nosník na jednom konci hliníkový plátek místo jádra. V tomto místě byl nosník provrtán a následně uchycen.

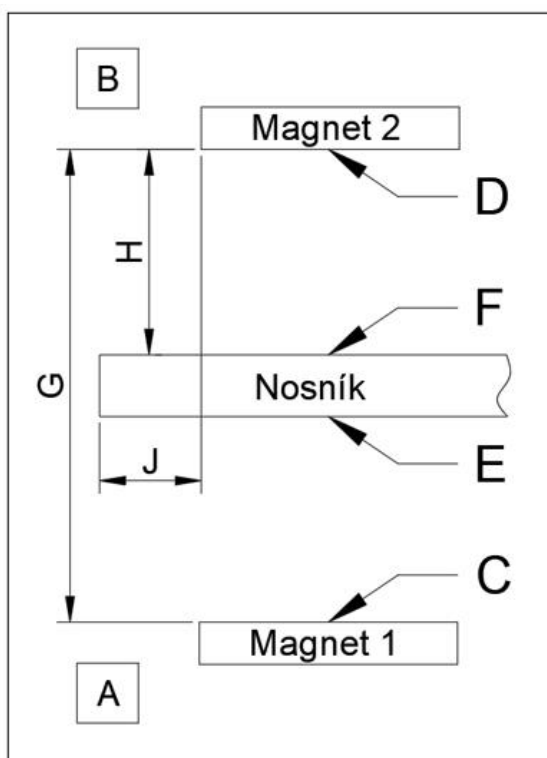
Povrch plátek neměl stejnou strukturu na obou stranách. Ta strana, která přiléhá k podložce tiskárny měla mnohem znatelnější strukturu tisku, a proto byla k lepení využita ta opačná. Nosníky byly vyrobeny slepením dvou vytištěných plátek k jádru dvousložkovým lepidlem Loctite Super Attack (aktivátor ve formě fixu + lepidlo). Oba typy jader byly řezány ručně, přičemž samotný silikon kladl při dělení značný odpor.

3.3 Buzení

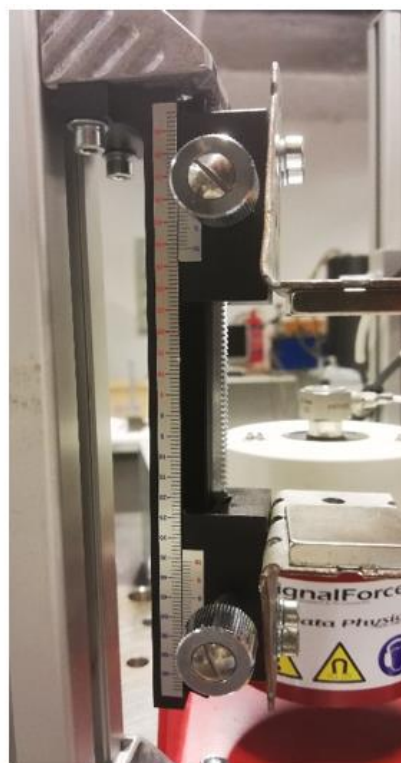
K rozkmitání nosníků byl využit shaker Data Physic, typ V4/T4, připevněný šrouby k tuhé desce společně s pojezdovým mechanismem pro uchycení magnetů viz Obr. 27. Všechny nosníky byly vystaveny kmitání o frekvenci 0-100 Hz, a to po dobu 200 s. Budicí signál měl sinusový průběh a frekvence byla lineárně rostoucí v čase. Před měřením byla síla shakeru manuálně nastavena tak, aby při 50 Hz byla 1 N.

3.4 Magnetická pole

K vyvolání magnetických polí byly použity čtvercové neodymové magnety značky Wamag s rozměry 25x25x5 mm. Všechna měření intenzity magnetického pole byla prováděna ručním Teslametrem značky Tectra, model Bell 5180 a Halovou příčnou sondou, model Bell. Magnetu 1 (dolní) byla naměřena intenzita 170 mT a magnetu 2 (horní) 175 mT. Měřeno na středu magnetu, když byl položený na dřevěném stole. Ke zvyšování intenzity magnetického pole mezi magnety, respektive mezi magnety a nosníkem docházelo posouváním pojezdového mechanismu. Ten se skládal ze stojny s drážkou, ozubeného hřebenu a dvou posuvných částí. Pojezd byl opatřen milimetrovou stupnicí k odečítání aktuální polohy. Obě pohyblivé části bylo možno v libovolné poloze zajistit, čehož bylo při všech nastaveních využíváno. Intenzity polí a nastavení pojezdu pro všechny nosníky dle schématu na Obr. 28 je vyneseno v tabulkách 3, 4, 5 a 6. Na všech nosnících proběhlo vždy jako první měření to s nulovým magnetickým polem.



Obr. 28 Schéma pojezdu a magnetických polí při vloženém nosníku



Obr. 27 Pojezdový mechanismus

A – Počáteční nastavení dolního posuvu

B – Počáteční nastavení horního posuvu

C, D, E, F – Intenzita pole

G – Počáteční vzdálenost magnetů od sebe

H – Počáteční vzdálenost horního magnetu od nosníku

J – Vzdálenost hrany magnetu od volného konce nosníku

MRE1						
Číslo měření	Poloha posuvu [mm]		Intenzita na magnetu [mT]		Intenzita na nosníku [mT]	
	A	B	C	D	E	F
1	52,1	54	247	235	46	52
2	49,5	52	255	242	57	60
3	47,2	50	262	252	65	70
4	45	48	265	259	82	85

G: 57,7 mm
H: 29,1 mm

Tabulka 3 Konfigurace intenzit magnetických polí - MRE1

SLC1						
Číslo měření	Poloha posuvu [mm]		Intenzita na magnetu [mT]		Intenzita na nosníku [mT]	
	A	B	C	D	E	F
1	44	50	243	240	72	70
2	41,6	47	245	242	90	89
3	39	44	251	245	115	121
4	37,5	42	260	255	146	160

G: 45,3 mm
H: 24,5 mm

Tabulka 4 Konfigurace intenzit magnetických polí - SLC1

MRE2						
Číslo měření	Poloha posuvu [mm]		Intenzita na magnetu [mT]		Intenzita na nosníku [mT]	
	A	B	C	D	E	F
1	48,9	54	241	236	41	51
2	47,2	52	251	240	55	62
3	45,5	50	262	252	65	74,5
4	43,5	48	270	258	84	89

G: 55,4 mm
H: 29,2 mm

Tabulka 5 Konfigurace intenzit magnetických polí - MRE2

SLC2						
Číslo měření	Poloha posuvu [mm]		Intenzita na magnetu [mT]		Intenzita na nosníku [mT]	
	A	B	C	D	E	F
1	45,5	50	245	242	64	68
2	42	47	255	253	91	92
3	39	44	259	255	119	122
4	35,1	41	269	260	162	168

G: 45,9 mm
H: 24,5 mm

Tabulka 6 Konfigurace intenzit magnetických polí - SLC2

3.5 Série 1

3.5.1 Nosníky - MRE1 a SLC1

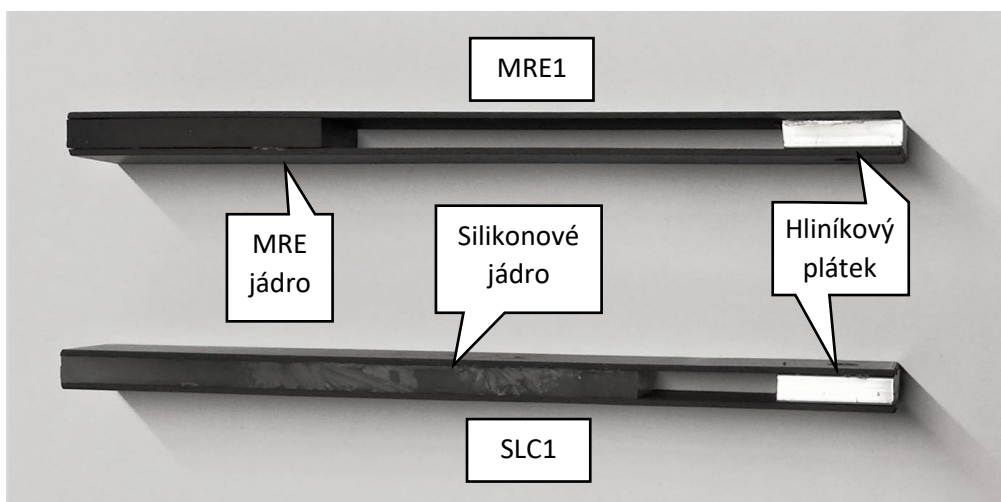
Společným znakem obou nosníků, vyrobených v první sérii – SLC1 a MRE1, bylo výrazně kratší jádro, než byla délka vnějších tištěných vrstev, proto byla mezi hliníkovým plátkem a pružným jádrem vzduchová mezera.

Rozměry jádra z MRE byly 45x20x5 mm a rozměry jádra ze silikonu 72x20x5 mm. Celková hmotnost nosníků a jejich složek je vynesena do tabulky 7.

Série 1		
Hmotnost [g]	MRE1	SLC1
Plátek A	9,79	9,78
Plátek B	9,81	9,79
MRE jádro	13,37	-
Silikonové jádro	-	10,28
Hliníkový plátek	5,28	5,41
Celková hmotnost	38,53	35,64

*Celková hmotnost a hmotnost plátku jsou uvedeny před vyvrtáním otvoru na uchycení.

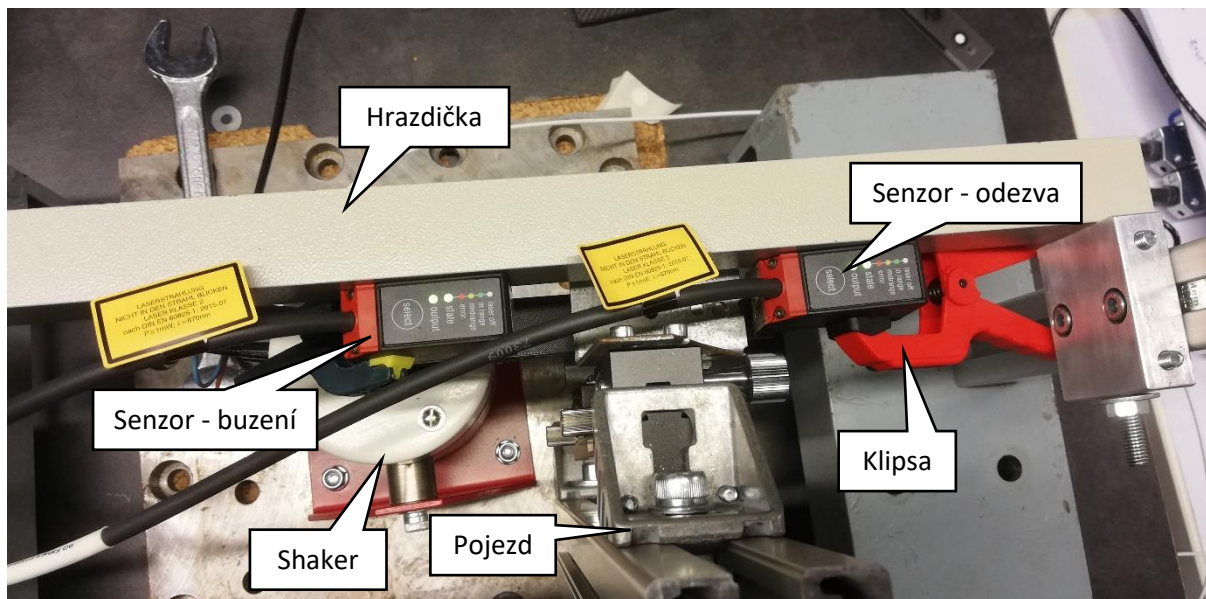
Tabulka 7 Hmotnosti nosníků – první série



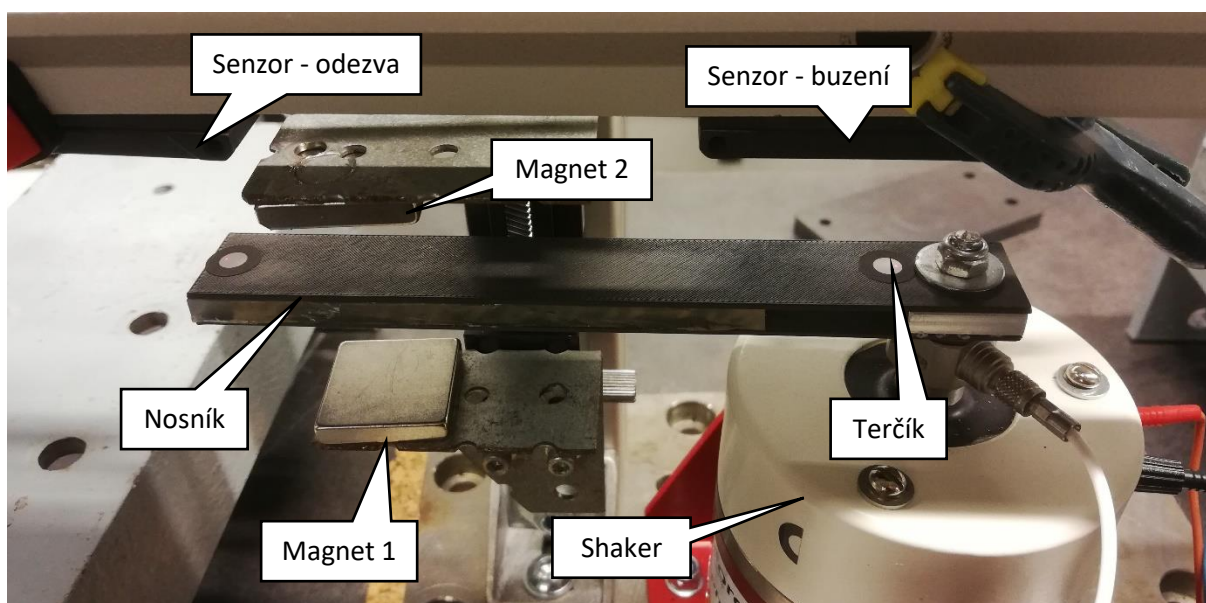
Obr. 29 Sendvičové nosníky - první série

3.5.2 Experiment - sestavení

K upevnění nosníku na shaker posloužil vyvrtaný otvor, šroub a samozjistící matice s plastovým kroužkem. Na obě strany spoje byly použity ploché podložky. Nad toto sestavení byla umístěna hrazdička z L profilu se dvěma laserovými senzory vzdálenosti od firmy Micro-Epsilon, typ IDL1420-10/001 s rozsahem 10 mm. Oba byly pevně připevněny klipsou a ustaveny tak, aby byly uprostřed svého měřicího rozsahu. Měření bylo prováděno na dvou místech. První bylo nejbližší buzení – tj. těsně u šroubu upevňujícího nosník k shakeru. Druhé měřené místo bylo na opačném, volném konci nosníku. Pro lepší přesnost měření byly na nosníky umístěny samolepicí terčíky. Magnety byly na pojezdu umístěny tak, aby jejich hrana byla 15 mm od volného konce nosníku (hodnota J na Obr.28).



Obr. 30 Vynucené kmitání - sestavení, první série - shora



Obr. 31 Vynucené kmitání - sestavení, první série - z boku

3.5.3 Kmitání SLC1

Se silikonovým nosníkem z první série bylo provedeno celkem pět měření. První bylo s nulovým magnetickým polem (bez magnetů). Poté byly přidány magnety a před každým novým měřením se pojezdy s magnety přiblížily k nosníku. Dosáhlo se tak intenzit 71, 89, 118, 153 mT. Ty byly naměřeny vždy na povrchu nosníku, který byl vyvážen magnetickým polem, aby se neohýbal. Pole bylo měřeno dole i nahore a z těchto hodnot byl spočten aritmetický průměr, který je uveden v legendách grafů. Nosník byl upevněn a připraven na rozkmitání mezi magnety s tím, že póly magnetů byly orientovány tak, aby se magnety přitahovaly.

Počáteční nastavení pojezdu byla zvolena 50 mm nahoře a 44 mm dole. Vždy se nejprve nastavila horní poloha na celé číslo a spodní magnet se ustavil v takové vzdálenosti, aby volný konec nosníku nezměnil svoji polohu, čili magnetické pole udržovalo nosník v rovině. Pojezdy byly

posouvány celkem třikrát a to o 3, 3 a 2 mm. Panovaly obavy o přichycení nosníku k magnetu, kdyby i poslední posunutí bylo 3 mm.

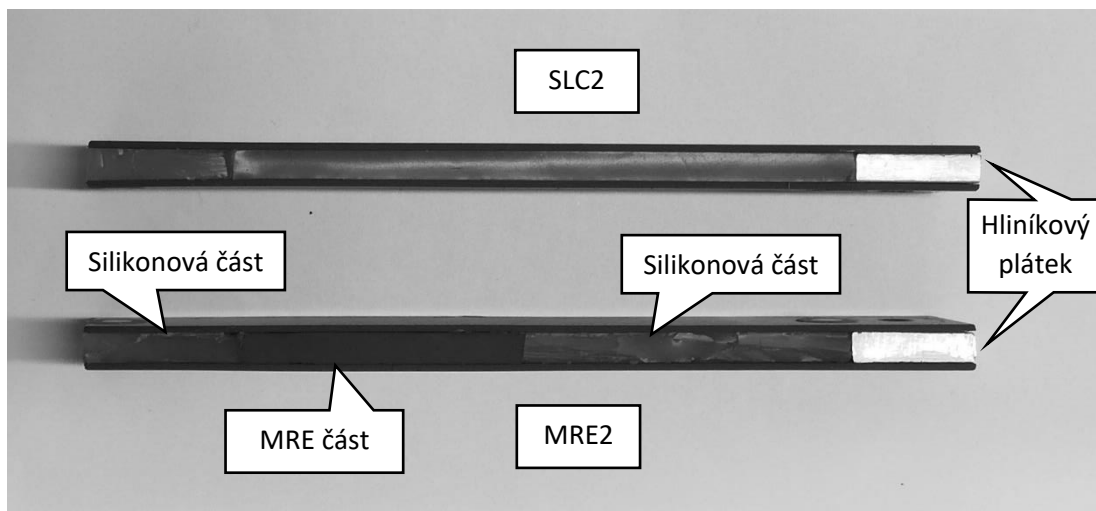
3.5.4 Kmitání MRE1

Parametry budicího signálu u nosníku MRE1 byly totožné jako u nosníku SLC1. Jediný rozdíl byl v intenzitě magnetických polí, respektive vzdáleností magnetů od nosníku. Jako prvotní nastavení horního posuvu bylo zvoleno maximální možné, jaké celková konfigurace zařízení dovolovala, tj. 54 mm. Dolní posuv s magnetem byl opět nastaven do takové polohy, aby byl nosník vyrovnaný. V případě MRE1 nosníku se ovšem vzdálenosti a tím pádem i intenzity polí pod a nad nosníkem rozcházely více než u SLC1 nosníku. Hlavním důvodem byla více než dvakrát delší vzduchová mezera v nosníku, ale také mnohem vyšší hmotnost jádra z MRE. Velká vzduchová mezera také zapříčinila poměrně nízkou tuhost nosníku. Posouvací krok byl zvolen 2 mm, ten postupně na povrchu nosníku vytvořil průměrné hodnoty intenzit 49, 58,5, 67,5 a 83,5 mT.

3.6 Série 2

3.6.1 Nosníky – MRE2 a SLC2

Společným znakem nosníků z druhé série – SLC2 a MRE2 bylo, že nemají žádnou vzduchovou mezeru. Provrtnané hliníkové plátky z první série byly použity znovu stejně jako MRE jádro z nosníku MRE1. Nosník SLC2 měl jádro po celé délce tvořeno silikonem. Jádro u MRE2 bylo tvořeno také z větší části silikonem, ale 25 mm od volného konce byl umístěn pásek z MRE dlouhý 45 mm. Oba nosníky jsou na Obr. 32. Jejich celkové a dílčí hmotnosti jsou vyneseny do tabulky 8.



Obr. 32 Nosníky – druhá série

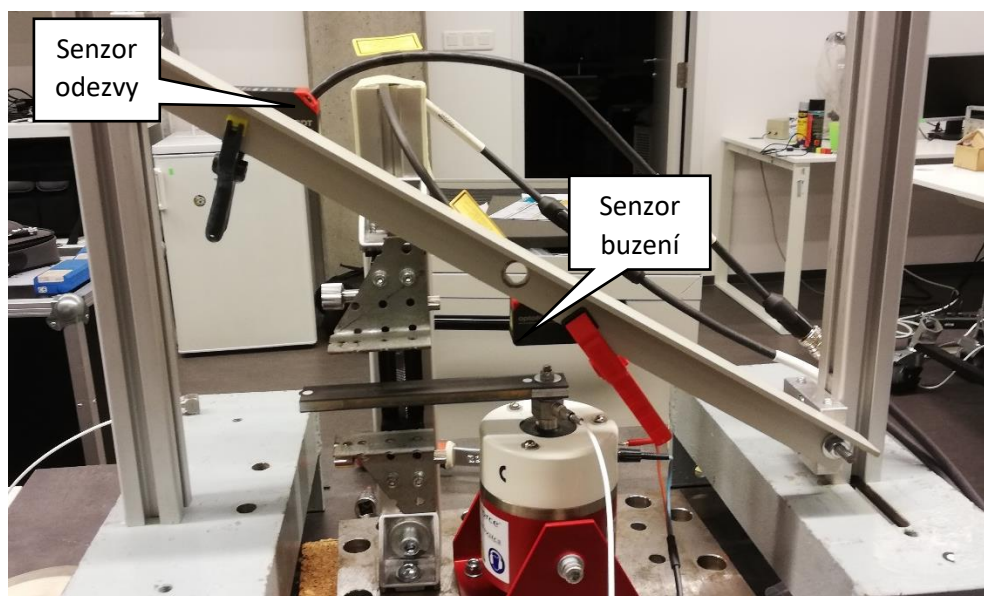
Série 1		
Hmotnost [g]	MRE2	SLC2
Plátek A	9,79	9,80
Plátek B	9,80	9,78
MRE jádro	13,11	-
Silikonové jádro	5,369+2,417	10,136+2,479
Hliníkový plátek	*4,98	*5,06
Celková hmotnost	46,34	37,44

*Hmotnost hliníkových plátků se liší od první série, protože plátky mají už vyvrtaný otvor

Tabulka 8 Hmotnosti nosníků - druhá série

3.6.2 Experiment sestavení

V druhé sérii byl na volném konci nosníku použit laserový snímač od výrobce Micro-Epsilon, typ IDL1420-200/001 s rozsahem 200 mm, aby nemohlo dojít k překročení rozsahu. Senzor ovšem měřil v rozmezí 60 – 260 mm, a tak musela být hrazdička nakloněna. Oba senzory se pak opět připevnily tak, aby byly v polovině svého měřicího rozsahu. Sestavení je na Obr. 33. Magnety byly na pojezdu umístěny tak, aby jejich hrana byla 30 mm od volného konce nosníku (hodnota J na Obr.28).

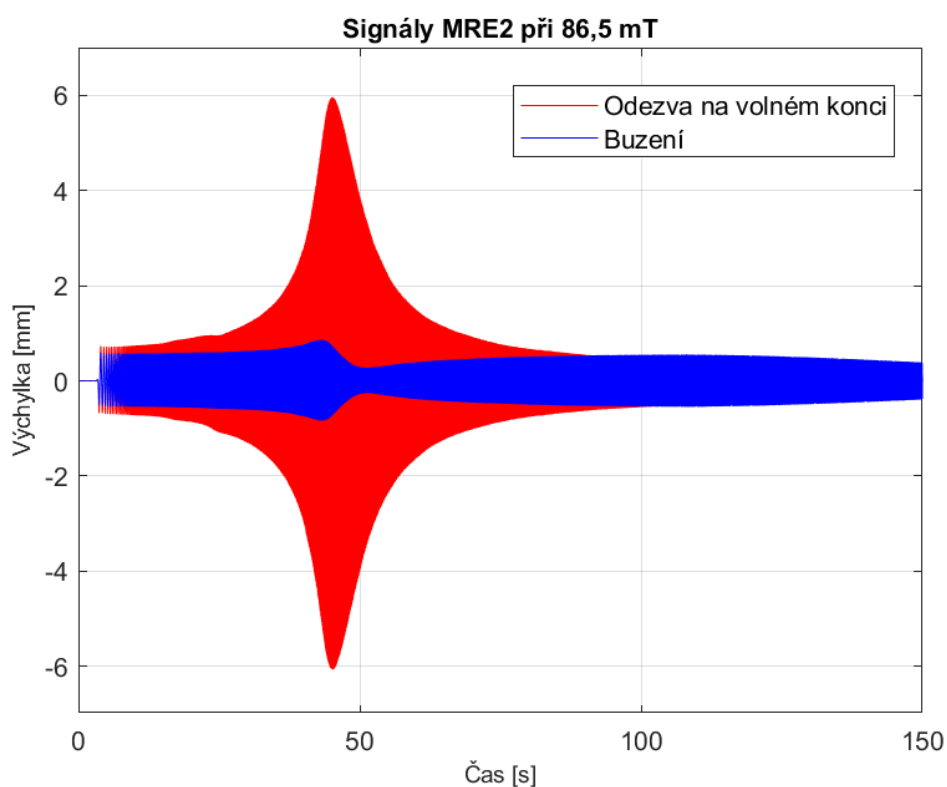


Obr. 33 Sestavení experimentu vynuceného kmitání - druhá série

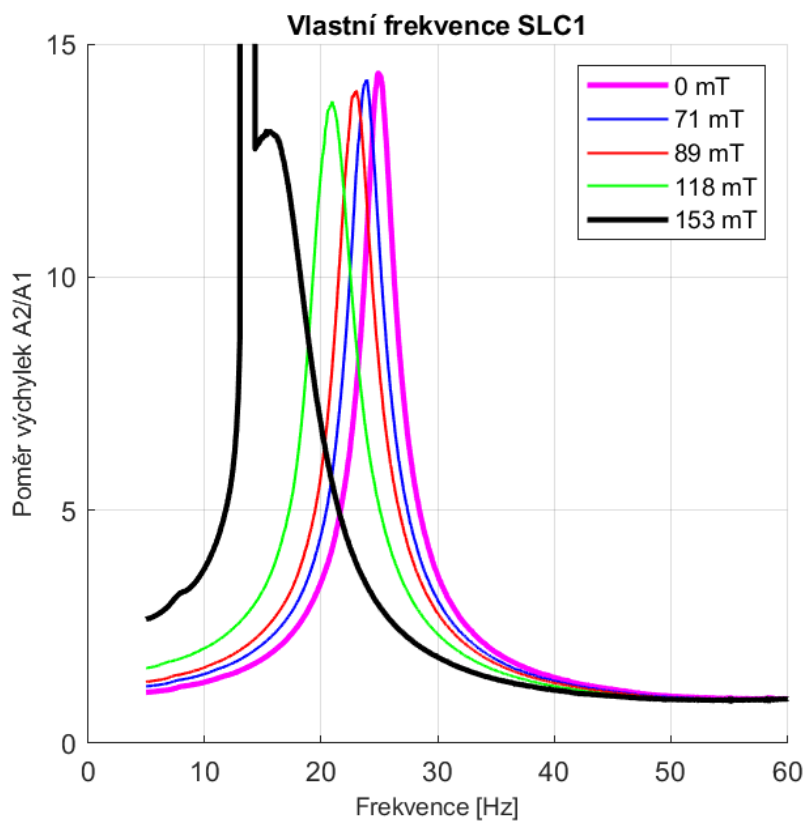
3.7 Zpracování a interpretace dat

Data byla z programu IDL1420_Multi DAQ Tool, verze 4.1.3. vyexportována ve formátu csv a zpracována v MATLABu, verze 2019b. Na Obr. 34 je vidět prostý záznam výchylek buzení a odezvy pro nosník MRE2 při posledním nastavení. Zpracování všech signálů proběhlo na základě určení maxima a minima amplitud výchylek měřených oběma laserovými snímači při dané frekvenci. Vynesením podílu těchto amplitud (A_2/A_1) v závislosti na frekvenci do grafu vznikla přenosová funkce nosníku z daného měření.

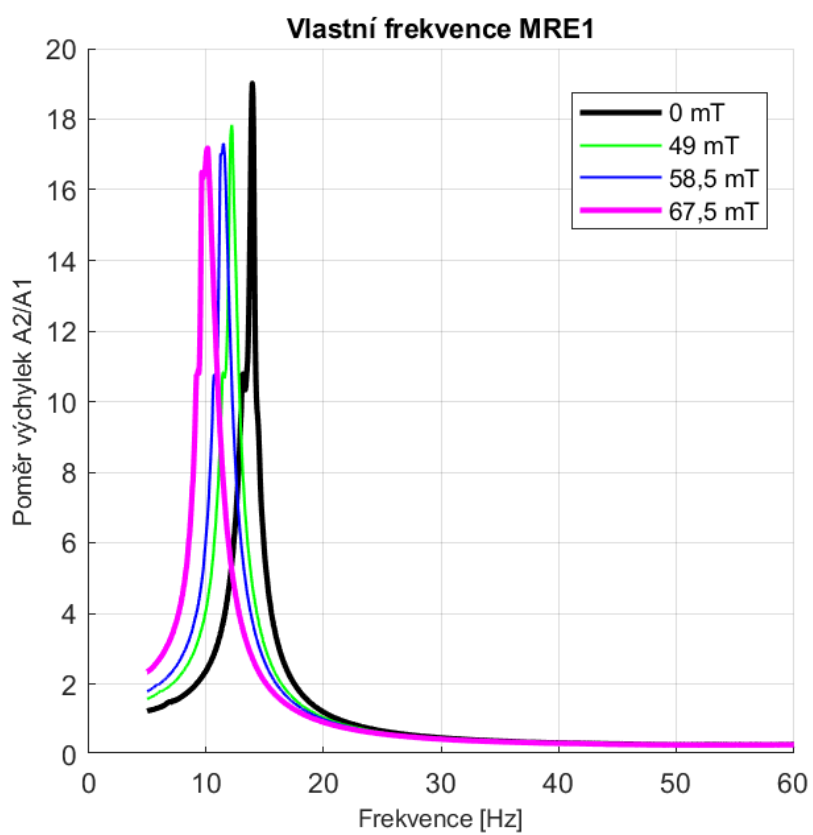
Všechna měření na každém nosníku byla vynesena do jednoho grafu. Na všech čtyřech grafech, které jsou na Obr. 35, 36, 37 a 38 je jasně vidět, že s rostoucí intenzitou magnetického pole se vlastní frekvence snižuje. Obr. 39 je detailní zobrazení oblasti rezonance pro nosník MRE2.



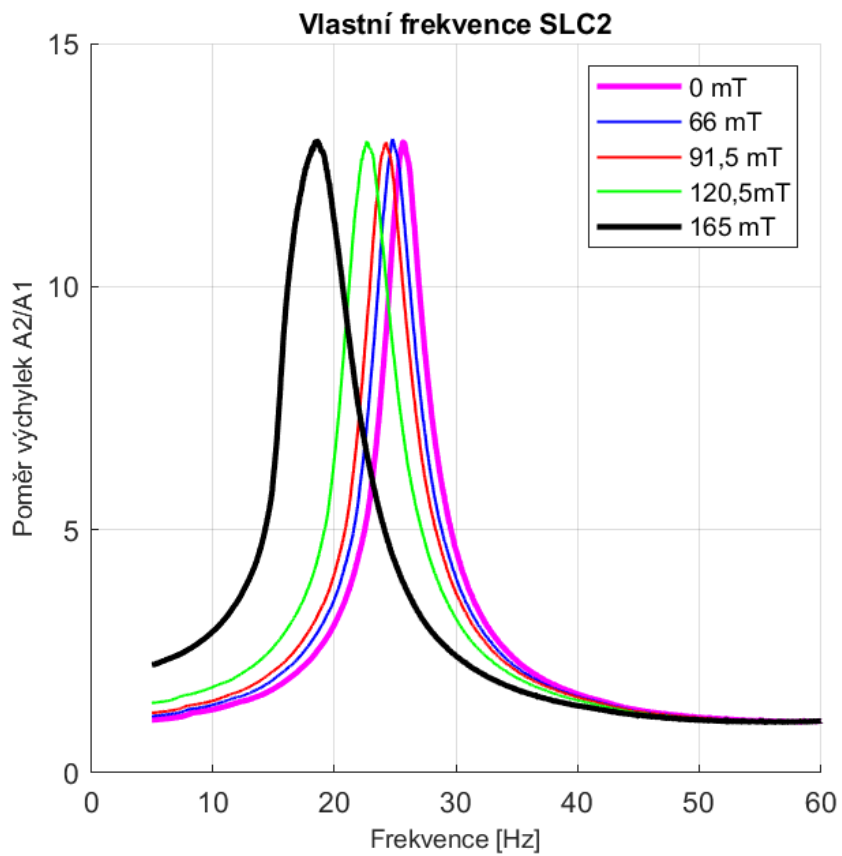
Obr. 34 Buzení a odezva v čase - MRE2 při 86,5 mT



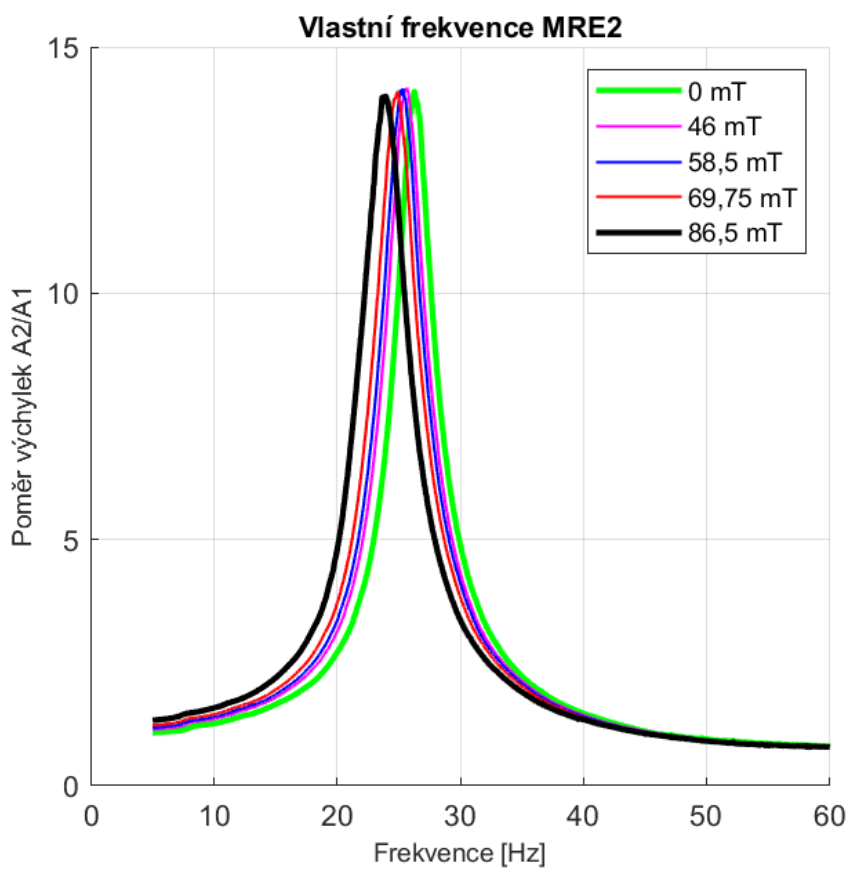
Obr. 35 Vlastní frekvence SLC1 do 60 Hz



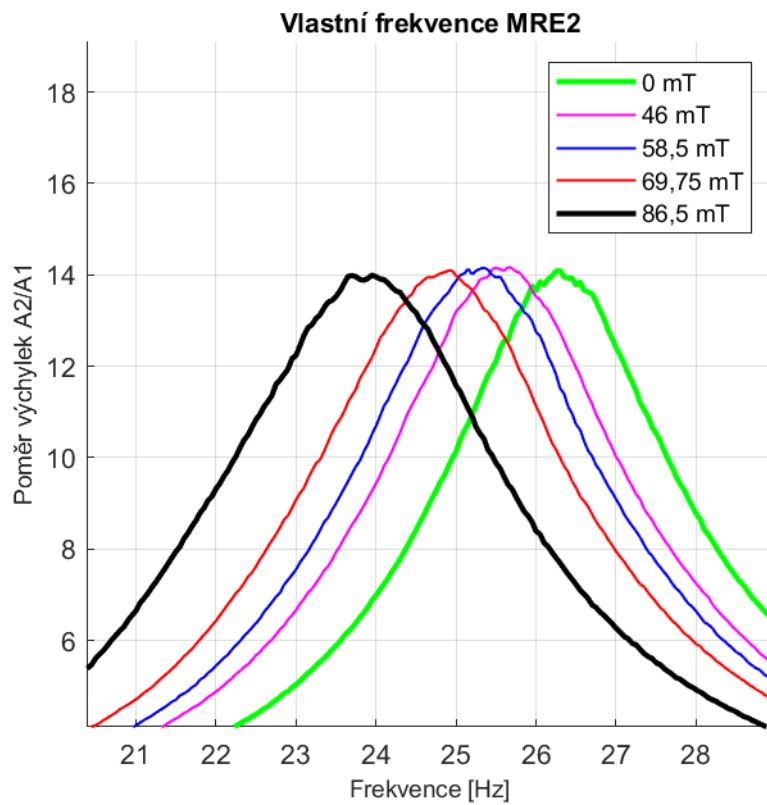
Obr. 36 Vlastní frekvence MRE1 do 60 Hz



Obr. 37 Vlastní frekvence SLC2 do 60 Hz



Obr. 38 Vlastní frekvence MRE2 do 60 Hz



Obr. 39 Vlastní frekvence MRE2 do 60 Hz – detailní zobrazení

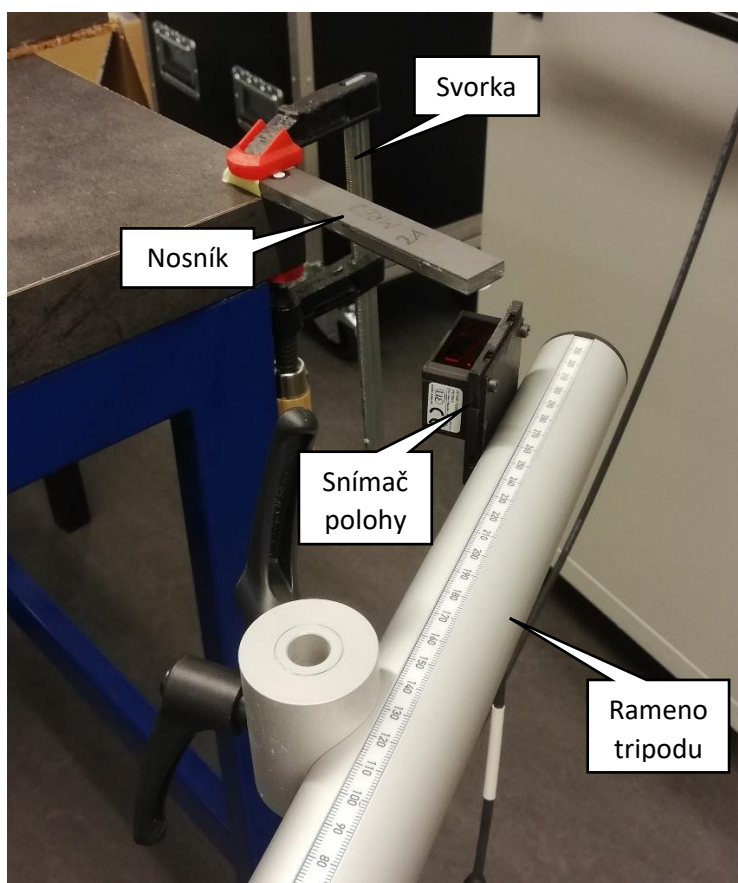
4 Tlumící vlastnosti při volném kmitání

4.1 Použité nosníky

Pro zkoumání tlumících vlastností při volném kmitání byly vybrány nosníky z druhé série – MRE2 a SLC2.

4.2 Experiment

Pro pevné uchycení (vetknutí) nosníků ke stolu byla použita šroubovací svorka. Uchycení proběhlo na straně s hliníkovým plátkem a nosníky byly v tomto místě navíc omotány papírovou páskou. Snímač společnosti Micro-Epsilon IDL1420-10/001 s rozsahem 10 mm byl umístěn pod nosníkem, aby nebránil prvotnímu vychýlení. To probíhalo na volném konci nosníku směrem dolů. Snímač sledoval časový průběh výchylky a pro spolehlivější detekci vzdálenosti byl na spodní stranu nosníku nalepen kontrastní terčik. Každý nosník byl podroben celkem pěti samostatným měřením s frekvencí záznamu 4 kHz.



Obr. 40 Sestavení experimentu - Tlumené kmitání

4.3 Zpracování a interpretace dat

Data byla vyexportována ve formátu csv a zpracována v programu MATLAB 2019b. Naměřené tlumící křivky pro oba nosníky jsou v chronologickém sledu poskládány za sebe a vyneseny na Obr. 41 a Obr. 42. Na každé tlumící křivce bylo nejdříve vybráno deset největších amplitud (bod na „peaku“), jak ukazuje Obr. 43. Poté v aplikaci cftool v programu MATLAB byla proložena těmito body exponenciální křivka. Poté bylo možné provést druhé proložení vlastní navolenou funkcí (v Matlabu – custom function). To je znázorněno na Obr. 44. Prokládalo se křivkou ve tvaru:

$$f(x) = a \cdot e^{(-b \cdot x)} \cdot \sin(c \cdot x + d) \quad (24)$$

Legenda pro konstanty uvedené v 3.1 Teorie tlumeného kmitání:

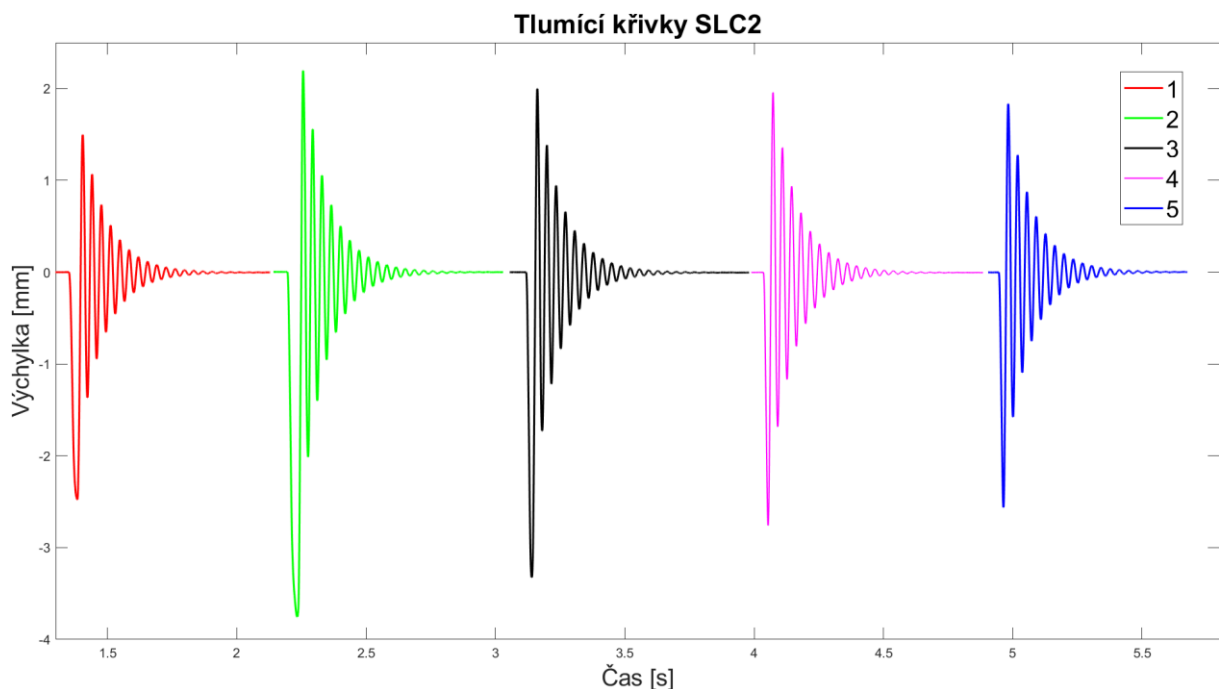
a – Integrační konstanta C

b – konstanta doznívání δ

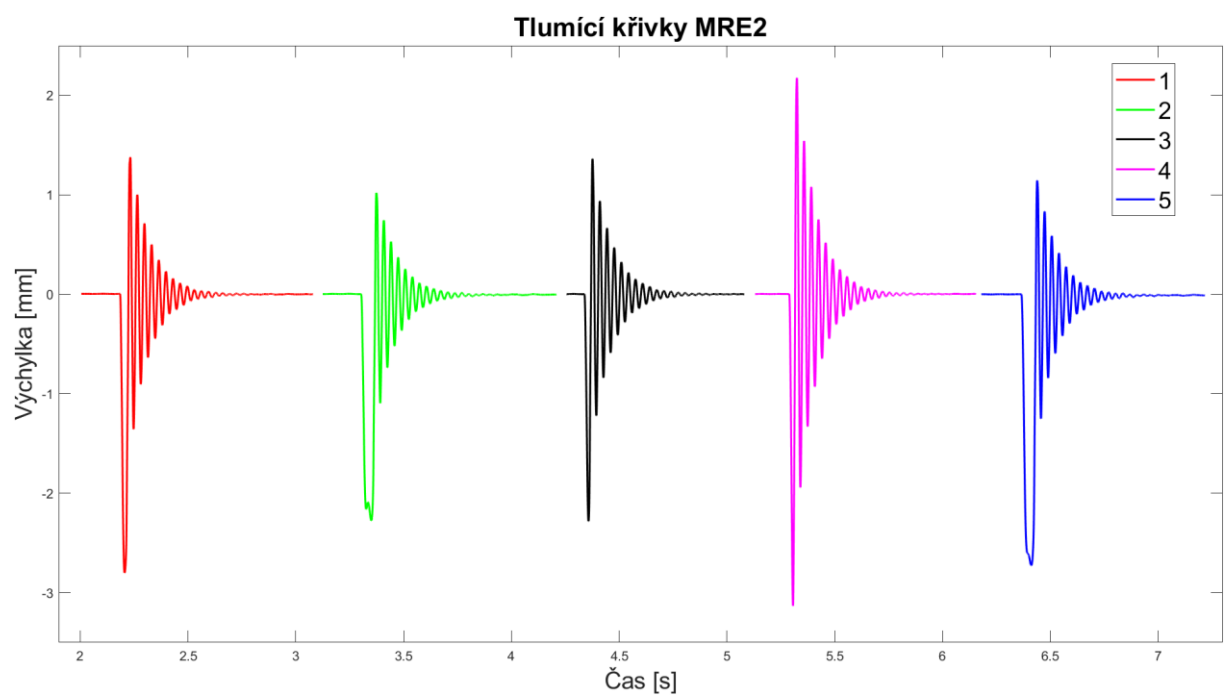
c – úhlová frekvence netlumených kmitů Ω_0

d – fáze ϕ_0

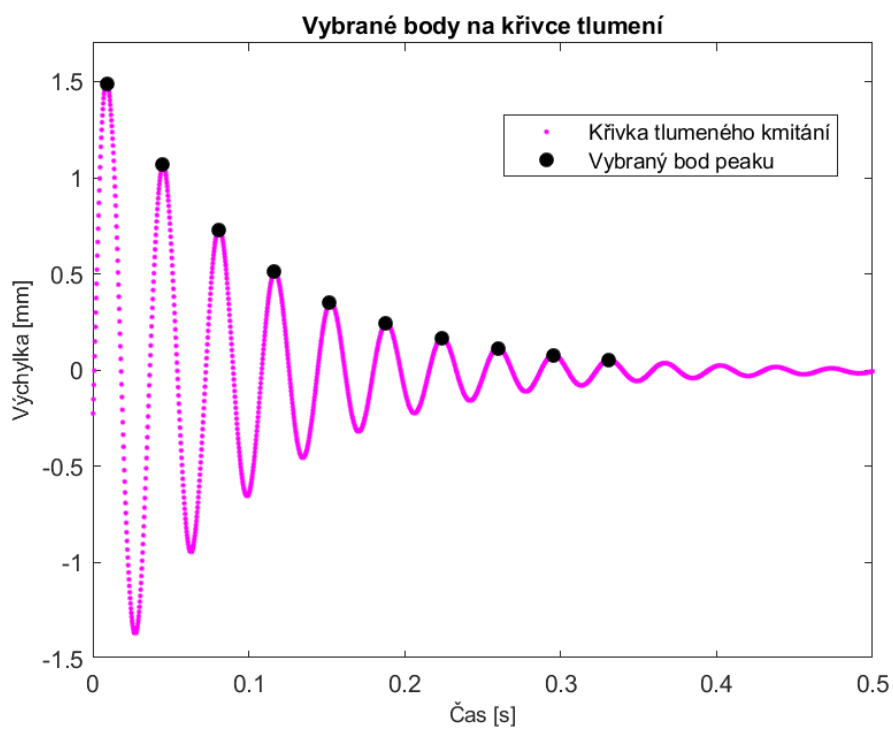
Právě konstanty a, b, c byly získány z proložení exponenciálou. Koefficient d symbolizuje fázi ϕ_0 a vždy byl zadáván nulový. Konstanta b znázorňuje konstantu doznívání δ . Přesnost tohoto finálního proložení je znázorněna na Obr. 45. Tato dvě proložení byla provedena pro všechny měření, tedy celkem desetkrát. Hodnoty koeficientů všech deseti rovnic ve tvaru (24) jsou vyneseny do tabulek 9 a 10 včetně jejich mezí.



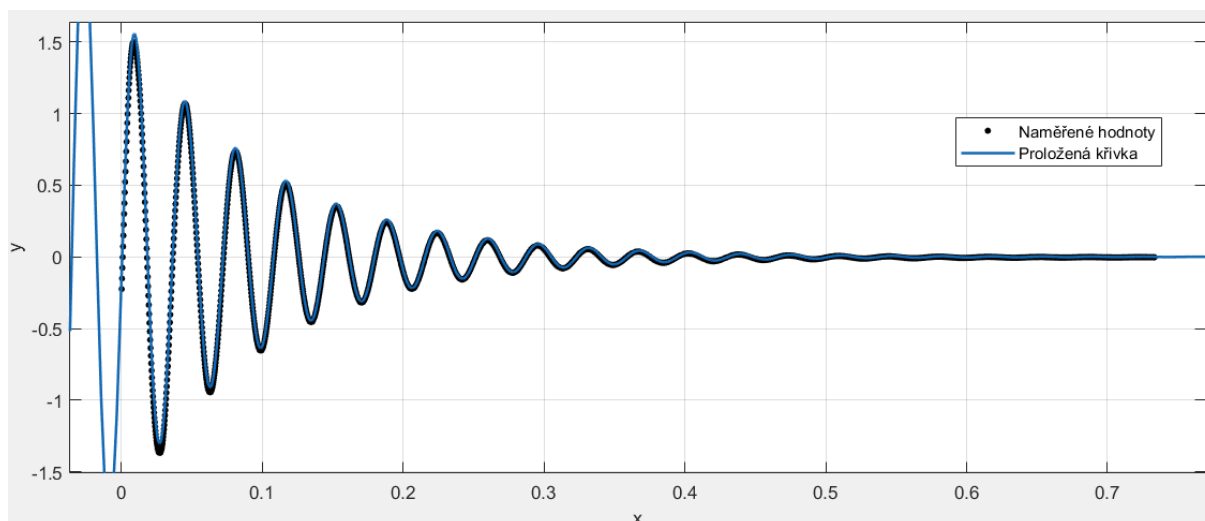
Obr. 41 Všechny křivky tlumeného kmitání SLC2



Obr. 42 Všechny křivky tlumeného kmitání MRE2



Obr. 43 Výběr bodů na křivce tlumeného kmitání SLC2 – první měření



Obr. 44 Proložení bodů křivkou pro tlumené kmitání SLC2 – první měření

Results

General model:
 $f(x) = a \cdot \exp(-b \cdot x) \cdot \sin(c \cdot x + d)$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

a = 1.709 (1.703, 1.714)
b = 9.975 (9.928, 10.02)
c = 175.3 (175.3, 175.4)
d = -0.09917 (-0.1024, -0.09591)

Goodness of fit:
SSE: 1.205
R-square: 0.9958
Adjusted R-square: 0.9958
RMSE: 0.02028

Obr. 45 Parametry proložení bodů křivkou pro tlumené kmitání SLC2 - první měření

MRE2								
Číslo měření	Koeficienty a jejich meze							
	a	meze	b	meze	c	meze	d	meze
1	1,626	1,617 1,629	10,76	10,71 10,82	188,8	188,7 188,8	0,1706	0,167 0,1741
2	1,223	1,215 1,23	10,42	10,33 10,51	189,3	189,2 189,4	0,2641	0,2576 0,2706
3	1,522	1,517 1,526	10,78	10,73 10,82	189,2	189,2 189,3	0,03719	0,03429 0,04009
4	2,501	2,495 2,506	10,9	10,87 10,94	188,2	188,1 188,2	-0,121	-0,1232 -0,1189
5	1,391	1,38 1,402	10,41	10,29 10,52	189,1	189 189,3	0,0879	0,08022 0,09558

Tabulka 9 Koeficienty rovnice pro tlumené kmitání MRE2

SLC2								
Číslo měření	Koeficienty a jejich meze							
	a	meze	b	meze	c	meze	d	meze
1	1,709	1,703	9,975	9,928	175,3	175,3	-0,09917	-0,1024
		1,714		10,02		175,4		-0,0959
2	2,468	2,459	10,11	10,06	174,7	174,6	0,2566	0,2526
		2,478		10,17		174,8		0,2607
3	2,208	2,201	10,8	10,04	174,8	174,9	0,04235	0,0394
		2,214		10,12		174,8		0,04529
4	2,164	2,16	10,13	10,1	175	174,9	0,03657	0,03476
		2,168		10,15		177		0,03839
5	2,047	2,043	10,24	10,21	175,1	175	-0,04377	-0,0455
		2,05		10,26		175,1		-0,04205

Tabulka 10 Koeficienty rovnice pro tlumené kmitání SLC2

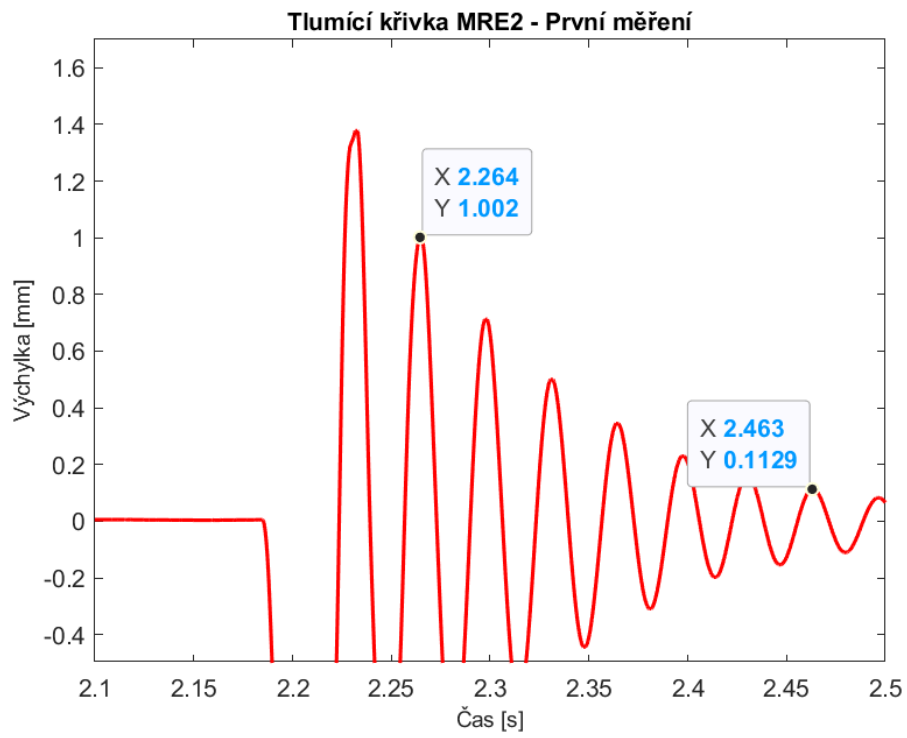
4.3.1 Logaritmický dekrement

Pro všechna měření nosníků MRE2 a SLC2 byly dle vztahů (21) a (23) spočteny logaritmické dekrementy. Ukázkové vybrání amplitud je na Obr. 46. Výpočet proběhl nejprve podle periody a konstanty útlumu, poté přes poměr amplitud, kde byl výpočet vždy proveden se šesti periodami ($n=6$). Konstanta dozívání je koeficient b z tabulek 9 a 10. Vypočtené hodnoty dekrementů jsou vyneseny do tabulky 11.

U nosníku MRE2 se hodnoty logaritmických dekrementů pohybovaly mezi 0,345 a 0,377. Aritmetický průměr všech hodnot je 0,359. U nosníku SLC2 byly krajní hodnoty 0,354 a 0,374 a aritmetický průměr 0,368.

Zp. výpočtu ϑ č. měření	MRE2			SLC2		
	$\delta \cdot T$	$\frac{1}{n} \cdot \ln \frac{x(t)}{x_{(t+n \cdot T)}}$	T	$\delta \cdot T$	$\frac{1}{n} \cdot \ln \frac{x(t)}{x_{(t+n \cdot T)}}$	T
1	0,365	0,364	0,0331	0,357	0,37	0,0358
2	0,345	0,367	0,0331	0,354	0,374	0,035
3	0,356	0,356	0,033	0,389	0,371	0,036
4	0,362	0,359	0,0332	0,363	0,371	0,0358
5	0,345	0,377	0,0331	0,368	0,365	0,0359
Průměr všech měření	0,359			0,368		

Tabulka 11 Hodnoty logaritmických dekrementů.



Obr. 46 Výběr amplitud MRE2 – první měření

5 Závěr

Prvním krokem bylo zjistit kvazistatické vlastnosti vzorků z materiálu SteelFill. K tomu byla využita zkouška tahem, ze které byl zjištěn metodou nejmenších čtverců modul pružnosti v tahu E . Tak byly vypočteny moduly pružnosti pro vzorky s různou vnitřní strukturou. Ukázalo se, že na tuto materiálovou konstantu nemá vnitřní struktura výrazný vliv a všechny hodnoty se pohybovaly okolo 3000 MPa.

V dalším experimentu byly pomocí dynamické mechanické analýzy zkoumány dynamické vlastnosti materiálu SteelFill. Pro tento typ zkoušky bylo natištěno 12 vzorků, všechny se strukturou $\pm 45^\circ$ a s okrajem. Vzorky byly zatěžovány tříbodovým ohybem při čtrnácti frekvencích v rozmezí od 1 do 30 Hz. Na základě těchto měření bylo možné konstatovat, že materiál SteelFill je viskoelastický.

Po určení základních vlastností materiálu SteelFill jako dynamický modul a Youngův modul se přistoupilo k výrobě čtyř sendvičových nosníků. Každý nich se skládal ze dvou vnějších vrstev ze SteelFillu, mezi které bylo vlepeno jádro. To bylo buď ze silikonové pryže, z MRE nebo z jejich kombinace, samotná délka jader se také lišila. První experiment s nosníky bylo vynucené kmitání, které mělo za úkol zjistit hodnoty jejich hlavních frekvencí. Experiment spočíval v připevnění nosníku na shaker, který nosník během 200 s rozkmital z 1 Hz na 200 Hz, frekvence rostla lineárně s časem. Výchyly nosníku byly sledovány laserovými snímači vzdálenosti, a to v místě buzení a na volném konci nosníku. Pro zjištění přenosové funkce bylo v signálech hledáno maximum a minimum v daném časovém úseku. Tyto hodnoty pak po vydělení označujeme jako A_2/A_1 a společně s frekvencí buzení byly vyneseny do jednoho grafu, který popisuje přenosovou funkci a je z něj možné odečíst vlastní frekvenci nosníku. Tento experiment byl také opakován při různých intenzitách magnetického pole. Všechny čtyři nosníky vykazovaly posun vlastní frekvence k nižším hodnotám s rostoucí intenzitou magnetického pole. Rozmezí vlastních frekvencí všech nosníků ovlivněné intenzitou pole je vyneseno do tabulky 12. Je zřejmé, že přítomnost MRE oblast vlastních frekvencí výrazně zužuje.

Označení nosníku	Vlastní frekvence [Hz]
MRE1	10 - 14
SLC1	15 - 25
MRE2	24 - 26,2
SLC2	18 - 25,5

Tabulka 12 Rozmezí vlastních frekvencí všech nosníků

V posledním experimentu byly zkoumány tlumící vlastnosti nosníků. Nosník se na jednom konci pevně přichytil a volný konec byl vychýlen silou. Po odstranění síly snímač vzdálenosti nasměrovaný zespodu sledoval výchylku konce nosníku. Z tohoto experimentu byly zjištěny například logaritmické dekrementy, které byly v průměru 0,359 pro nosník MRE2 a 0,368 pro nosník SLC2.

6 Literatura

- [1] ARSLAN HAFEEZ, Muhammad, Muhammad USMAN, Malik Adeel UMER a Asad HANIF. Recent Progress in Isotropic Magnetorheological Elastomers and Their Properties: A Review. *Polymers* [online]. 2020, 12(12) [cit. 2022-05-16]. ISSN 2073-4360. Dostupné z: [doi:10.3390/polym12123023](https://doi.org/10.3390/polym12123023)
- [2] PRIYANDOKO, Gigih, Purbo SUWANDONO a UBAIDILLAH. Development of vibration isolator using magnetorheological elastomer. *Journal of Applied Engineering Science* [online]. 2021, 19(4), 1108-1113 [cit. 2022-05-16]. ISSN 1451-4117. Dostupné z: [doi:10.5937/jaes0-28945](https://doi.org/10.5937/jaes0-28945)
- [3] METAL: filament s příměsí kovu [online]. MATERIALPRO 3D [cit. 2022-03-20]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/metal--filament-s-primesi-kovu/>
- [4] STEELFILL [online]. ColorFabb [cit. 2022-03-22]. Dostupné z: <https://colorfabb.com/steelfill>
- [5] Technical datasheet colorFabb SteelFill v1.0 [online]. ColorFabb, 2017 [cit. 2022-03-25]. Dostupné z: https://colorfabb.com/media/datasheets/tds/colorfabb/TDS_E_ColorFabb_SteelFill.pdf
- [6] Dynamic Mechanical Analysis: Basic Theory & Applications Training [online]. TA Instruments, 2017 [cit. 2022-04-10]. Dostupné z: https://people.clarkson.edu/~skrishna/DMA_Basic_Theory_Applications.pdf
- [7] HORNÍK, Petr. Experimentální metodika stanovení mechanických vlastností houževnatých plastů. Technická Univerzita v Liberci, 2014. [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/handle/15240/142813>
- [8] ONDROUCH, Jan a Jiří PODEŠVA. Aplikovaný mechanik jako součást týmů konstruktérů a vývojářů: teorie a příklady k předmětu "Technické kmitání". Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2012. ISBN 978-80-248-2762-9. [cit. 2022-05-10]. Dostupné také z: <https://projekty.fs.vsb.cz/147/ucebniopory/978-80-248-2762-9.pdf>
- [9] ZEMAN, Vladimír a Zdeněk HLAVÁČ. Kmitání mechanických soustav. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2004. ISBN 80-7082-563-4. [cit. 2022-05-15].

7 Seznam obrázků

Obr. 1 Údaje uvedené výrobcem [5]	10
Obr. 2 Trhací stroj Instron 30 kN	10
Obr. 3 Výkres tvaru vzorku pro zkoušku tahem dle ISO 527	11
Obr. 4 Znázornění směrů vrstev	11
Obr. 5 Přetržené vzorky 1-6, první série	12
Obr. 6 Přetržené vzorky 7-12, druhá série.....	12
Obr. 7 Vyznačené body pro video-extenzometr	13
Obr. 8 Upnutí vzorku do klínových čelistí Instronu.....	13
Obr. 9 Skutečné hodnoty naměřené při zkouškách tahem.....	14
Obr. 10 Pracovní diagram pro všechny vzorky	15
Obr. 11 Určení modulu pružnosti pro skupinu $\pm 45^\circ$ ze zdánlivě lineární části.....	15
Obr. 12 Parametry proložení pro skupinu $\pm 45^\circ$ ze zdánlivě lineární části	16
Obr. 13 Určení modulu pružnosti pro skupinu $\pm 45^\circ$ do přetržení okraje	16
Obr. 14 Parametry proložení přímkou pro skupinu $\pm 45^\circ$ do přetržení okraje	16
Obr. 15 Odezva ryze viskózní kapaliny [6].....	18
Obr. 16 Odezva ryze elastického materiálu [6]	18
Obr. 17 Odezva viskoelastického materiálu [6]	18
Obr. 18 Složky dynamického modulu	19
Obr. 19 Vzorky pro DMA	20
Obr. 20 Schéma tříbodového ohybu [6]	20
Obr. 21 Vzorek připravený ke zkoušce	21
Obr. 22 Graf závislosti paměťového modulu na frekvenci	22
Obr. 23 Graf závislosti ztrátového modulu na frekvenci.....	23
Obr. 24 Graf závislosti tan Delta na frekvenci	23
Obr. 25 Mechanické schéma tlumeného kmitání soustavy s 1° volnosti [8].....	24
Obr. 26 Časový průběh výchylky při podkritickém tlumení	26
Obr. 27 Pojezdový mechanismus	29
Obr. 28 Schéma pojezdu a magnetických polí při vloženém nosníku.....	29
Obr. 29 Sendvičové nosníky - první série	31
Obr. 30 Vynucené kmitání - sestavení, první série - shora.....	32
Obr. 31 Vynucené kmitání - sestavení, první série - z boku.....	32
Obr. 32 Nosníky – druhá série.....	33
Obr. 33 Sestavení experimentu vynuceného kmitání - druhá série	34
Obr. 34 Buzení a odezva v čase - MRE2 při 86,5 mT.....	35
Obr. 35 Vlastní frekvence SLC1 do 60 Hz.....	36
Obr. 36 Vlastní frekvence MRE1 do 60 Hz	36
Obr. 37 Vlastní frekvence SLC2 do 60 Hz.....	37
Obr. 38 Vlastní frekvence MRE2 do 60 Hz	37
Obr. 39 Vlastní frekvence MRE2 do 60 Hz – detailní zobrazení	38
Obr. 40 Sestavení experimentu - Tlumené kmitání	39
Obr. 41 Všechny křivky tlumeného kmitání SLC2	40
Obr. 42 Všechny křivky tlumeného kmitání MRE2.....	41
Obr. 43 Výběr bodů na křivce tlumeného kmitání SLC2 – první měření	41
Obr. 44 Proložení bodů křivkou pro tlumené kmitání SLC2 – první měření.....	42
Obr. 45 Parametry proložení bodů křivkou pro tlumené kmitání SLC2 - první měření.....	42
Obr. 46 Výběr amplitud MRE2 – první měření.....	44

8 Seznam tabulek

Tabulka 1 Čísla vzorků a jejich struktury	11
Tabulka 2 Moduly pružnosti všech skupin	17
Tabulka 3 Konfigurace intenzit magnetických polí - MRE1	29
Tabulka 4 Konfigurace intenzit magnetických polí - SLC1	30
Tabulka 5 Konfigurace intenzit magnetických polí - MRE2	30
Tabulka 6 Konfigurace intenzit magnetických polí - SLC2	30
Tabulka 7 Hmotnosti nosníků – první série	31
Tabulka 8 Hmotnosti nosníků - druhá série	34
Tabulka 9 Koeficienty rovnice pro tlumené kmitání MRE2	42
Tabulka 10 Koeficienty rovnice pro tlumené kmitání SLC2	43
Tabulka 11 Hodnoty logaritmických dekrementů.....	43
Tabulka 12 Rozmezí vlastních frekvencí všech nosníků	45