



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

URČOVÁNÍ ELASTICKÝCH CHARAKTERISTIK VYSOCE-PORÉZNÍCH MATERIÁLŮ S VYUŽITÍM IMPULSOVÉ EXCITAČNÍ TECHNIKY

DETERMINATION OF THE ELASTIC CHARACTERISTICS OF HIGHLY-POROUS MATERIALS BY
MEANS OF THE IMPULSE EXCITATION TECHNIQUE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Marek Kollmann

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Oldřich Ševeček, Ph.D.

BRNO 2021

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student:	Marek Kollmann
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Oldřich Ševeček, Ph.D.
Akademický rok:	2020/21

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

Určování elastických charakteristik vysoce-porézních materiálů s využitím impulsové excitační techniky

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce bude zaměřena na nastudování problematiky určování modulu pružnosti materiálů pomocí impulsové excitační techniky (IET) a analýzou možností a případných omezení této metody při její aplikaci na určování elastických charakteristik vysoce porézních materiálů.

První částí práce bude rešeršní studie s cílem nastudovat aktuálně dostupné poznatky a zmapovat oblast použitelnosti uvedené metody u různých materiálů. V další části práce bude mít student za úkol, s využitím výpočtového modelu, analyzovat vliv porozity materiálu na přesnost určení elastických charakteristik pěnového vzorku dle normy pro IET (která je primárně určena pro využití na homogenních materiálech). Výpočtový model na bázi metody konečných prvků bude vytvořen v SW Ansys. Elastické charakteristiky získané touto nepřímou cestou budou následně porovnány s výpočtem odpovídajících veličin prostřednictvím simulace tahové zkoušky daného pěnového vzorku.

Dalším cílem bude porovnat hodnoty modulu pružnosti v tahu získané numerickým modelováním s výstupy experimentů a vyvodit z výsledků příslušné závěry o přesnosti a použitelnosti excitační techniky v případě její aplikace na vysoce porézní materiály.

Cíle bakalářské práce:

- a) Provést rešerši v oblasti využití impulsové excitační techniky (IET) pro určování elastických charakteristik homogenních a porézních materiálů.
- b) V SW Ansys vytvořit model vzorku z homogenního materiálu vhodného pro IET, určit jeho vlastní frekvence a porovnat modul pružnosti v tahu (případně Poissonův poměr) tohoto materiálu s nepřímým výpočtem dle normy pro IET.
- c) V SW Ansys vytvořit parametrický model porézního materiálu, určit jeho vlastní frekvence, dle normy pro IET určit elastické charakteristiky pěny a porovnat výsledky s přímou simulací tahové zkoušky dané pěnové struktury.
- d) Analyzovat vliv porozity a velikosti buněk pěnové struktury na přesnost určení modulu pružnosti v tahu pěny s využitím IET.
- e) Porovnat výstupy numerického modelu (přímá/nepřímá metoda) s dostupnými experimenty.

Seznam doporučené literatury:

ASTM E1876 – 15 Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration. www.astm.org.

ISO 12680-1:2005 – Methods of test for refractory products -- Part 1: Determination of dynamic Young's modulus (MOE) by impulse excitation of vibration.

ANSYS Inc. ANSYS Release 2019 R3 User's Manual. Pennsylvania: Swanson Analysis Sys. Inc, 2019, www.ansys.com.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu doc.

Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá aplikací impulzně excitační techniky (IET) k určování elastických charakteristik vysoce-porézních materiálů a ověřením její praktické použitelnosti k tomuto účelu. V teoretické části je vysvětlen princip této metody spolu s argumenty pro využití mimo podmínky stanovené normou. V další části je s využitím programu ANSYS vytvořen model pěnové struktury s otevřenou pórovitostí tvořené Kelvinovými buňkami, který slouží jak pro zjištění modálních charakteristik modelu, vstupujících do vyhodnocení elastických vlastností porézního materiálu pomocí IET, tak pro simulaci standardní tahové zkoušky určující tyto homogenizované elastické charakteristiky přímým způsobem. Na výpočtovém modelu byl dále analyzován vliv porozity a velikosti buněk na jeho elastické charakteristiky. Ten se prokázal být ve shodě s teorií dle Gibsonové a Ashbyho. V závěru práce jsou konfrontovány výstupy výpočtových modelů s dostupnými, experimenty naměřenými, daty elastických vlastností různě porézních materiálů a zhodnoceny možnosti využití IET k určení těchto charakteristik. Ukázalo se, že IET podává s přijatelnou přesností informace o Youngově modulu pružnosti i u vysoce porézních materiálů.

Klíčová slova

Impulzně excitační technika, IET, pěnová struktura s otevřenou pórovitostí, MKP, ANSYS, Kelvinova buňka

Abstract

The bachelor thesis dealt with the application of impulse excitation technique (IET) to determine the elastic characteristics of highly-porous materials. The first part explained the principle of this method together with the arguments for use outside the conditions given by the standard. In the next part, a model of the foam structure with an open porosity based on Kelvin cell was created in ANSYS software. The influence of porosity and cell size on its elastic characteristics was determined on the model. It was showed to agree with the theory according to Gibson and Ashby. The result of the work was the evaluation of the possibility of using IET to determine these characteristics, these results were then compared with the experimental values. It was shown that IET provides with acceptable accuracy also for highly porous materials.

Keywords

Impulse excitation technique, IET, foam structure with open porosity, FEM, ANSYS, Kelvin cell

KOLLMANN, Marek. Určování elastických charakteristik vysoce-porézních materiálů s využitím impulsové excitační techniky. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132146>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Vedoucí práce Oldřich Ševeček.

Citace elektronického zdroje:

KOLLMANN, Marek. Určování elastických charakteristik vysoce-porézních materiálů s využitím impulsové excitační techniky [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-04-05]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132146>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Vedoucí práce Oldřich Ševeček.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Určování elastických charakteristik vysoce-porézních materiálů s využitím impulsové excitační techniky“ vypracoval samostatně s použitím odborné literatury uvedené v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

V Brně dne 21. května 2021

.....
Marek Kollmann

Na tomto místě bych chtěl poděkovat vedoucímu práce Ing. Ševečkovi, PhD. za jeho nekonečnou trpělivost a lidský přístup a svým sestrám za morální podporu ve studiu.

Marek Kollmann

Obsah

1.	Úvod.....	2
2.	Teoretická část	3
2.1.	Určování elastických charakteristik porézních a neporézních materiálů	3
2.1.1.	Destruktivní metody	3
2.1.2.	Nedestruktivní metody (NDT).....	5
2.2.	Princip impulzní excitační techniky (IET).....	6
2.2.1.	Vlastní měření.....	9
2.2.2.	Porovnání IET s tahovou zkouškou	11
2.2.3.	Aplikace IET mimo podmínky dané normou ASTM	12
2.3.	Určování elastických charakteristik vysoce-porézních materiálů pomocí IET 13	
2.3.1.	Vysoce-porézní materiály	13
2.3.2.	Model materiálu s otevřenými póry dle Gibsonové-Ashbyho.....	14
2.3.3.	Příklady aplikací IET pro určování elastických charakteristik	15
3.	Výpočtová část.....	16
3.1.	Výpočtové modely pro modální analýzu a tahovou zkoušku	16
3.1.1.	Model homogenního tělesa	16
3.1.2.	Model porézního tělesa	17
3.1.3.	Analýza vlivu vstupních parametrů	19
3.2.	Elastické charakteristiky porézního tělesa určené z modálních vlastností modelu zkušebního tělesa (dle normy pro IET).....	23
3.2.1.	Závislost elastických charakteristik na velikosti buňky.....	23
3.2.2.	Závislost elastických charakteristik na porositě tělesa	24
3.3.	Srovnání výsledků IET s výsledky tahové zkoušky	26
3.4.	Srovnání výsledků výpočtového modelu s experimenty	30
3.4.1.	Elastické vlastnosti bioaktivních sklo-keramik na bázi 45S5 Bioglass® [28]	30
3.4.2.	Elastické charakteristiky keramické pěny z materiálu Vukopor®A [22] 32	
3.5.	Zhodnocení výsledků a diskuse.....	33
4.	Závěr	35
	Seznam obrázků a tabulek	41
	Seznam použitých zkratk a symbolů.....	44

1. Úvod

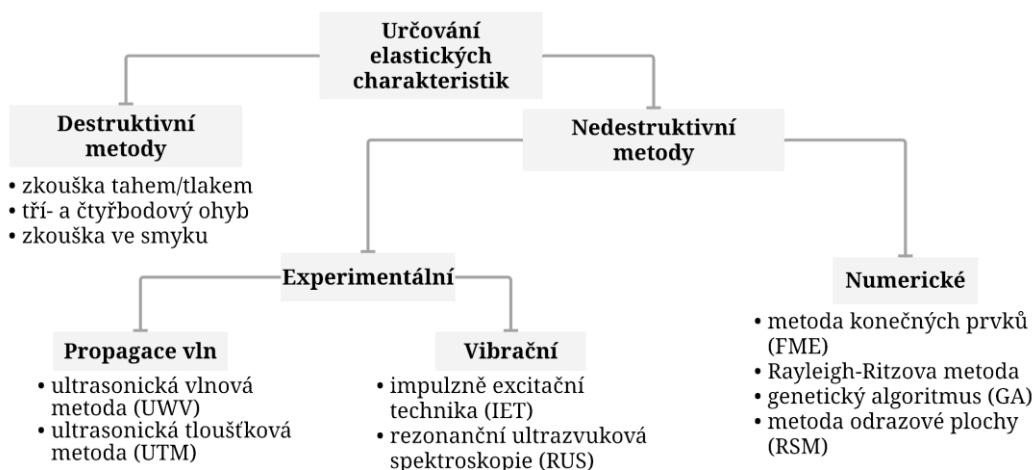
Youngův modul pružnosti patří mezi základní materiálové charakteristiky a vstupuje do celé řady inženýrských výpočtů. K jeho měření existuje několik základních metod, každá se svými výhodami a nevýhodami. Alternativou ke standardně používaným destruktivním metodám je tzv. impulzní excitační technika (z angl. Impulse Excitation Technique, dále jen IET), která díky svým relativně nízkým nákladům a jednoduchému provedení rychle nabývá na atraktivitě.

IET využívá závislosti mezi vlastní frekvencí zkušebního vzorku a jeho elastickými charakteristikami. Tento vztah je definován prostřednictvím příslušné normy pro homogenní (neporézní, jednomateriálová) tělesa s jednoduchou geometrií (nejčastěji ve formě nosníku ve tvaru kvádra). V praxi se čím dál častěji setkáváme s různě porézními materiály (od pískovce po vysoce-porézní keramické pěny a voštiny). Přítomnost pórů propůjčuje porézním materiálům unikátní set vlastností, a to především vhodný poměr pevnosti vůči hmotnosti. Toho se využívá například v leteckém průmyslu, kde výsledná hmotnost hraje klíčovou roli [1]. Další významnou vlastností pěnových materiálů je jejich výrazně lepší schopnost absorpce mechanické energie [2]. S rostoucím využitím porézních materiálů vzniká poptávka po jednoduchém a spolehlivém určení efektivních elastických charakteristik do výpočtových modelů sloužících pro návrh či kontrolu pevnosti součástí zhotovených z těchto materiálů.

Relativně vysoká komplikovanost provedení tahových zkoušek u keramických pěn je jednou z motivací pro hledání vhodnějších metod. Zde se nabízí využití IET, které ovšem nebylo pro nehomogenní materiály navrženo. Je tedy otázkou, s jakou přesností bude u těchto materiálů fungovat, a zda s ní lze efektivně elastické charakteristiky vůbec určovat. Pokud by se IET prokázala jako vhodná metoda, znamenalo by to snížení nákladů a celkové urychlení experimentu.

Cílem této práce bude tedy ověřit, zda a jak se rostoucí porozitou materiálu mění vztah mezi vlastními frekvencemi vzorku a odpovídajícími elastickými charakteristikami popsaného ve výše zmíněné normě. Elastické charakteristiky pěnových materiálů určené z vlastních frekvencí zkušebního modelu budou porovnány se simulacemi tahové zkoušky provedené na pěnové struktuře a s dostupnými experimenty na pěnových materiálech.

2. Teoretická část



Obrázek 2.1. Kategorizace metod určování elastických charakteristik [3].

2.1. Určování elastických charakteristik porézních a neporézních materiálů

Metody určování elastických charakteristik se obvykle dělí na destruktivní a nedestruktivní (z ang. Non-destructive testing, NDT), a to na základě toho, jestli během zkoušky nedochází k nevratnému poškození zkušebního tělesa (obr. 2.1). Mezi nedestruktivní řadíme metody statické (zatěžování pod mezí kluzu) a dynamické, které se dále dělí na metody vibrační a metody založené na principu vlnové propagace tělesem. NDT jsou pak často doprovázeny výpočetními modely sloužícími k optimalizaci měřicího procesu. Například u vibračních metod můžeme pomocí metody konečných prvků (dále jen MKP) určit spektrum vlastních frekvencí nebo do jisté míry ověřit správné nastavení aparatury [3].

2.1.1. Destruktivní metody

Během destruktivní zkoušky měříme elastické charakteristiky do překročení meze kluzu zkušebního tělesa. V této oblasti je závislost přetvoření zkušební vzorku na působícím napětí a popsána Hookovým zákonem v tahu (2.1) a ve smyku (2.3).

$$\sigma = \varepsilon \cdot E \quad (2.1)$$

kde, E je Youngův modul pružnosti, ε je délkové přetvoření a σ je napětí. Poissonův poměr poté získáme z definice (2.2)

$$\mu = -\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = -\frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_1} \quad (2.2)$$

kde, μ je Poissonův poměr, ε_1 je délkové přetvoření v příčném směru a $\varepsilon_{2,3}$ jsou délková přetvoření v podélném směru.

$$\tau = \gamma \cdot G \quad (2.3)$$

kde, G je modul pružnosti ve smyku, γ je úhlová poměrná deformace a τ je smykové napětí.

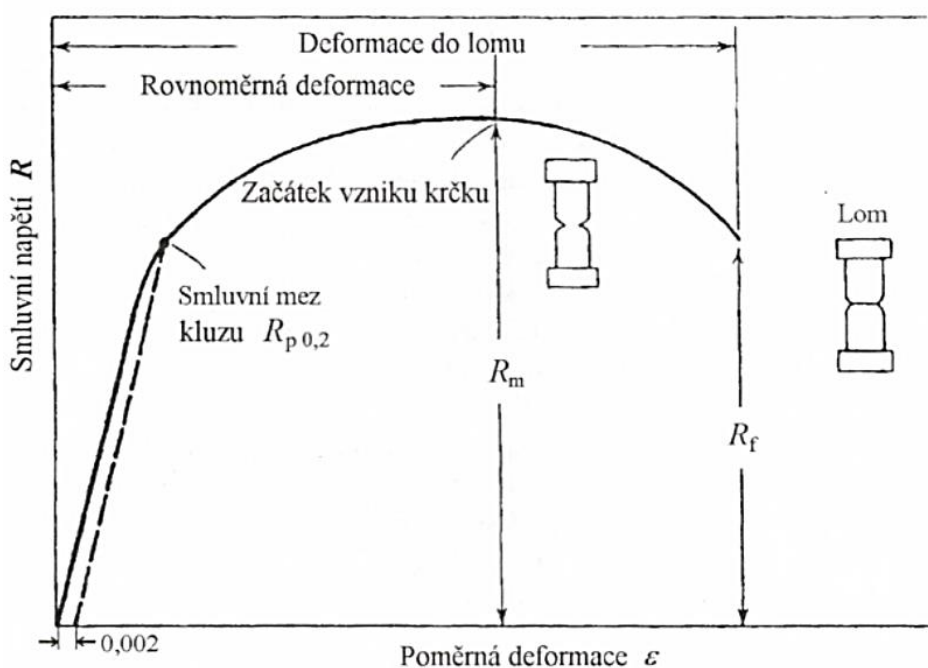
U izotropních materiálů platí mezi elastickými charakteristikami vztah (2.4)

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)} \quad (2.4)$$

kde, G je modul pružnosti ve smyku, E je Youngův modul pružnosti a μ je Poissonův poměr.

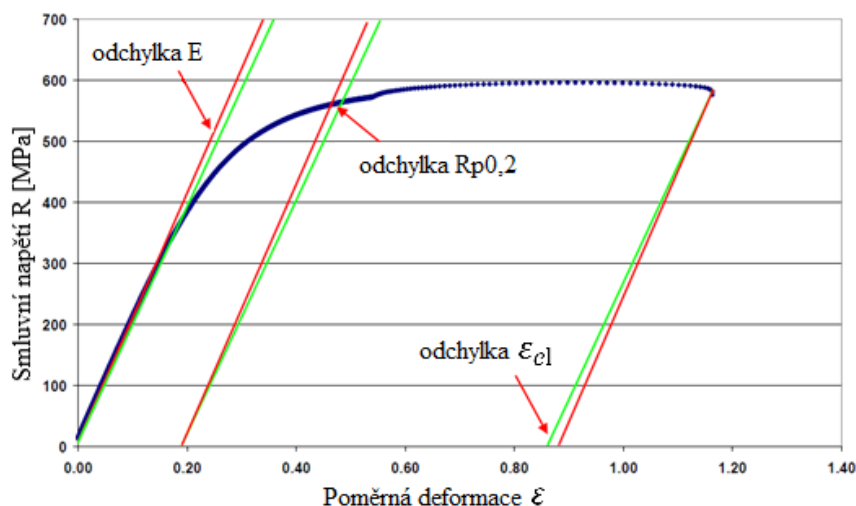
Zkouška tahem

Zkouška tahem je nejstarší a nejrozšířenější destruktivní metoda sloužící k získání Youngova modulu pružnosti a Poissonova poměru daného materiálu. Na trhačím stroji je zkušební vzorek plynule zatěžován až do přetržení. V průběhu zkoušky je zaznamenávána závislost přetvoření zkušebního vzorku na působícím napětí. Je-li k výpočtu napětí použit původní průměr zkušebního vzorku, obdržíme klasický smluvní diagram napětí-deformace (obr. 2.2) [4].



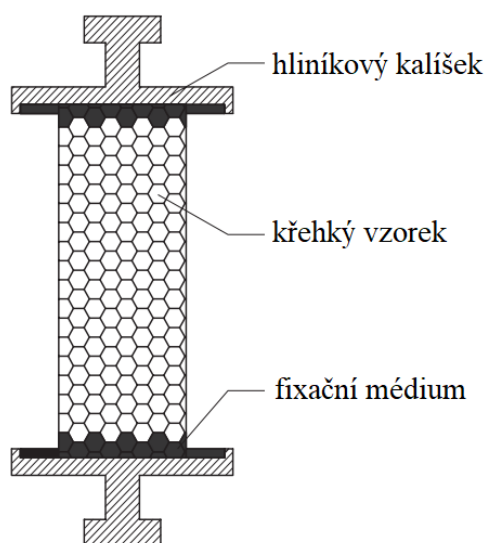
Obrázek 2.2. Smluvní diagram napětí-deformace [4].

Lineární oblast ovšem tvoří pouze malou část tahového diagramu. Pokud není zkouška prováděna za účelem získání Youngova modulu pružnosti, může vzniknout významná odchylka, což představuje problém při určování meze kluzu (viz obr. 2.3) [5].



Obrázek 2.3. Vliv odchylky Youngova modulu pružnosti na ostatní parametry [5].

Pro některé materiály je navíc tahová zkouška obtížně proveditelná. Jedná se především o křehké materiály (např. keramiky), kde není jednoduché samotné uchycení vzorku, aniž by došlo k jeho poškození. Vyžaduje většinou speciální přípravky, komplikující a prodražující celý experiment (viz obr. 2.4) [6].



Obrázek 2.4. Schéma uložení křehkého materiálu za pomoci hliníkových kalíšků a adhezivního přípravku [6].

2.1.2. Nedestruktivní metody (NDT)

Nedestruktivní metody vznikly za účelem preventivních kontrol bezpečnosti konstrukcí, aniž by došlo k jejich poškození. Díky rychlosti, jednoduchosti a relativně nízké ceně měřicího zařízení se aplikace NDT rapidně rozšířila, viz tab. 2.1 [7].

Tabulka 2.1. Kategorizace možných aplikací IET [7].

Kontrola jakosti	Určování materiálových charakteristik
• strukturální tlumení	• Youngův modul pružnosti
• termální šok	• modul pružnosti ve smyku
• deformace	• Poissonův poměr
• únava	• relaxace
• detekce vad	• creep
	• tranzitní teploty

Při určování elastických charakteristik se nejčastěji setkáváme s impulzně excitační technikou (IET). Jedná se o nepřímou měřicí metodu, protože využíváme jiné než definiční vztahy. Z toho důvodu musíme při řešení nových problémů (např. vývoj nového materiálu) výsledky ověřit klasickými metodami.

2.2. Princip impulzní excitační techniky (IET)

Počátek IET je v 60. letech 20. století, kdy byla zavedena norma ASTM C 1548-02. Princip IET je založen na Tymošenkově nosníkové teorii (1922). Za pomoci této teorie lze aproximovat závislost Youngova modulu pružnosti na základní ohybové frekvenci (2.5) a modul pružnosti ve smyku na základní torzní frekvenci (2.8) [8] [9].

$$E = 0,9465 \cdot \left(\frac{m \cdot f_f^2}{b} \right) \cdot \left(\frac{L}{t} \right)^3 \cdot T_1 \quad (2.5)$$

$$T_1 = 1 + 6,686 \cdot (1 + 0,0752 \cdot \mu + 0,8109 \cdot \mu^2) \cdot \left(\frac{t}{L} \right)^2 - 0,868 \cdot \left(\frac{t}{L} \right)^4 - \left[\frac{8,34 \cdot (1 + 0,2023 \cdot \mu + 2,173 \cdot \mu^2) \cdot (t/L)^4}{1 + 6,338 \cdot (1 + 0,1408 \cdot \mu + 1,536 \cdot \mu + 1,536 \cdot \mu^2) \cdot (t/L)^2} \right] \quad (2.6)$$

$$T_1 = 1 + 6,858 \cdot (t/L)^2 \dots \text{ pro } L/t \geq 20 \quad (2.7)$$

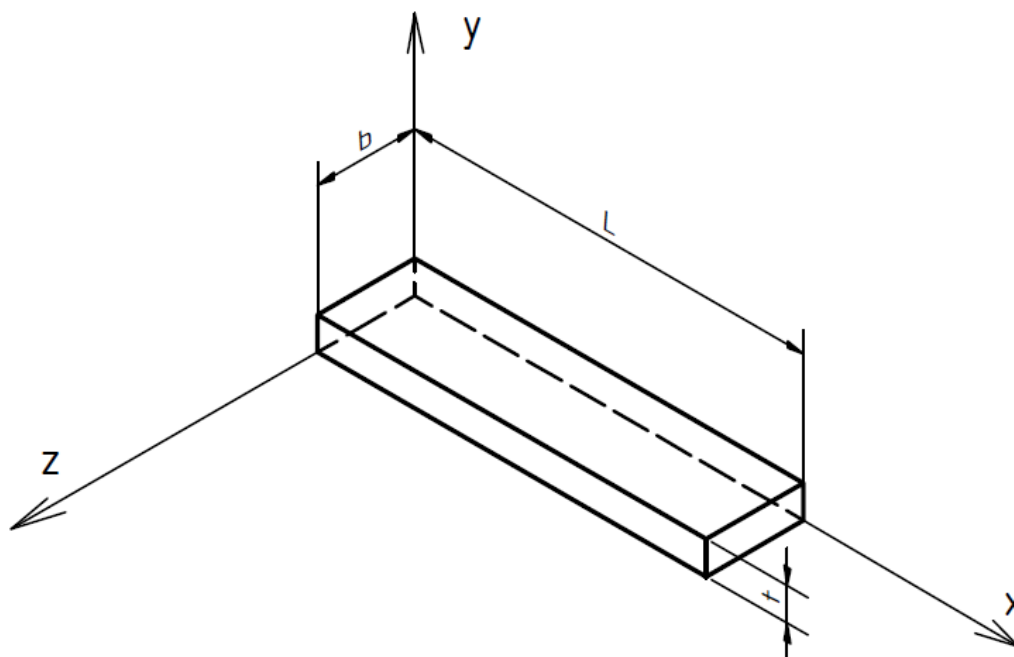
kde, E je Youngův modul pružnosti, m je hmotnost zkušební tělesa, f_f je základní ohybová frekvence, $L \times b \times t$ jsou rozměry zkušební tělesa (viz obr. 2.5) a T_1 je korekční faktor dán vztahem (2.6), který pro $L/t \geq 20$ lze zjednodušit na vztah (2.7).

$$G = \frac{4 \cdot L \cdot m \cdot f_t^2}{b \cdot t} \cdot \frac{B}{1 + A} \quad (2.8)$$

$$B = \frac{(t/b)^{-1} + t/b}{4 \cdot (t/b) - 2,52 \cdot (t/b)^2 + 0,21 \cdot (t/b)^6} \quad (2.9)$$

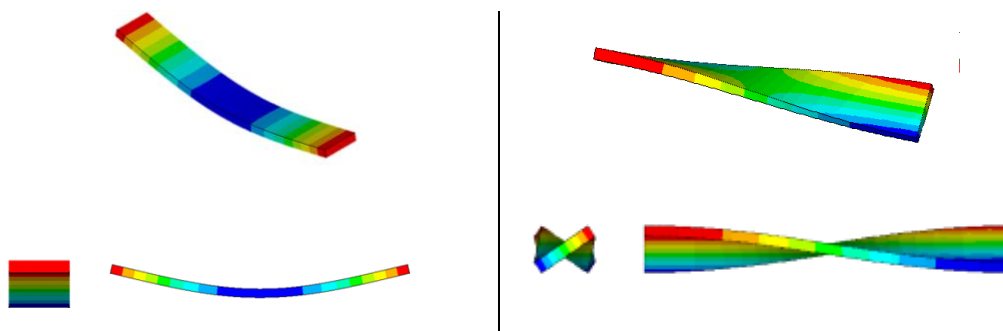
$$A = \frac{0,0562 - 0,8776 \cdot (b/t) + 0,3504 \cdot (b/t)^2 - 0,0078 \cdot (b/t)^3}{12,03 \cdot (b/t) + 9,891 \cdot (b/t)^2} \quad (2.10)$$

kde G je modul pružnosti ve smyku, m je hmotnost zkušební tělesa, f_t je základní torzní frekvence, $L \times b \times t$ jsou rozměry zkušební tělesa (viz obr. 2.5), B a A jsou korekční faktory dány vztahy (2.9) a (2.10).



Obrázek 2.5. Rozměry nosíkového zkušební vzorku s obdélníkovým příčným průřezem.

Těleso kmitající na vlastní frekvenci má svůj charakteristický tvar kmitání, který označujeme jako vibrační módy. Každý mód vibrujícího tělesa je dán rozmístěním uzlů (míst s nulovou hodnotou výchylky) a kmiten (míst kde vlna nabývá extrémních hodnot). Dva nejdůležitější módy pro volně uložené těleso (bez omezení stupňů volnosti) jsou módy ohybové (*flexural*) a torzní (*torsional*), přičemž první módy jsou označovány jako základní (viz obr. 2.6).



Obrázek 2.6. Základní vibrační módy nosíkového zkušební vzorku. Vlevo základní ohybový mód, vpravo základní torzní mód.

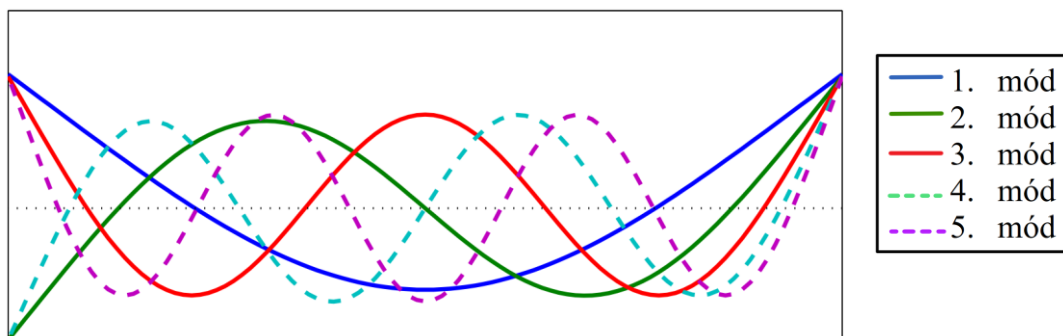
Ohybové módy

První mód volně uloženého tělesa je zpravidla ohybový. Ze základní rovnice pro ohybové kmitání (2.11) je zřejmá závislost na Youngově modulu pružnosti [10].

$$EJ_z \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + \rho S \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0 \quad (2.11)$$

kde E je Youngův modul pružnosti, J_z je osový kvadratický moment příčného průřezu, ρ je hustota, S je plocha příčného průřezu a y je průhyb nosníku.

Rovnice (2.11) doplněná okrajovými podmínkami (nulové síly a nulové momenty na koncích nosníku) nemá analytické řešení a je třeba ji řešit numericky. Výsledné vlastní frekvence jsou ve známém poměru $1 : 2,757 : 5,404 : 8,933 : 13,344 : 18,638 \dots$. Pomocí výsledných vlastních tvarů lze určit rozmístění kmiten a uzlů (viz obr. 2.7) [11] [12].



Obrázek 2.7. Střednice nosníkového tělesa pro dané vibrační módy [12].

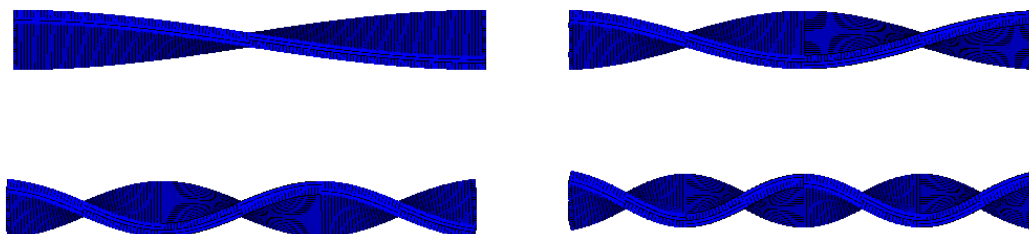
Torzní módy

Pro volně uložené netlumené nosníkové těleso se obvykle torzní módy začínají vyskytovat po ohybových módech v závislosti na poměru délky a šířky nosníku, kde se s rostoucí délkou základní torzní mód objevuje později. Z rovnice pro torzní kmitání (2.8) je zřejmá závislost na smykovém modulu pružnosti [12].

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} - \frac{G}{\rho J_p} \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} = 0 \quad (2.12)$$

kde G je modul pružnosti ve smyku, J_p je polární kvadratický moment příčného průřezu, ρ je hustota, y je průhyb nosníku a ϑ je natočení nosníku.

Zde, narozdíl od (2.11), je řešení exaktní a vlastní frekvence jsou v poměru $1 : 2 : 3 \dots$. Pomocí výsledných vlastních tvarů (viz obr. 2.8) opět určíme polohu kmiten a uzlů [11] [12].



Obrázek 2.8. Zkroucení nosníku při prvních čtyřech torzních frekvencích.

2.2.1. Vlastní měření

Zkušební vzorek

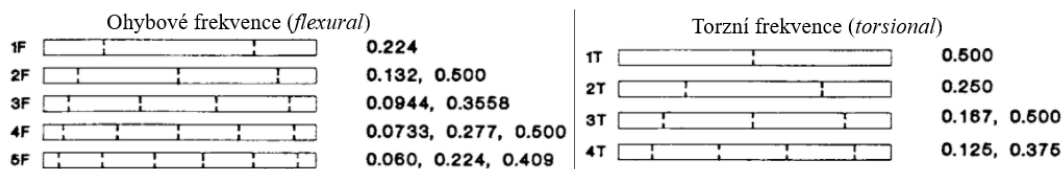
Geometrie vzorku je omezena na tvary, u kterých je znám vztah mezi elastickými vlastnostmi, hmotností a rozměry. Norma [8] se tedy vztahuje na následující tělesa:

- pruty kruhových a obdélníkových příčných průřezů,
- disky,
- disky se střední dírou (např. brusné disky),
- tenké prstence (např. pístní kroužky),
- široké prstence,
- čtvercové desky.

Velmi důležitá je přesnost při přípravě vzorků. Například u prutového zkušebního tělesa rozměry šířky a tloušťky vstupují do rovnic se třetí mocninou a jakákoliv nepřesnost se může následně ve výstupech významně projevit. Zkušební těleso by mělo být broušeno a leštěno pro zaručení co nejpřesnějšího měření rozměrů [11].

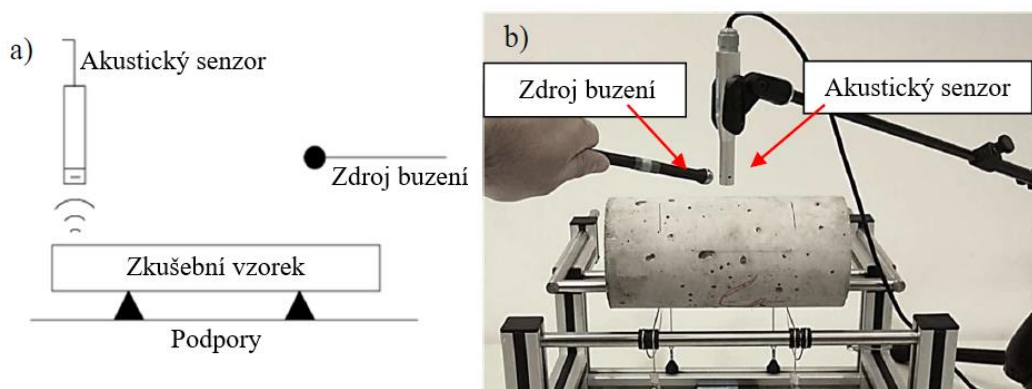
Nastavení aparatury

Zkušební vzorek je zajištěn v uzlech módů, jejichž frekvenci měříme (viz obr. 2.9). Pro nosníkové vzorky lze využít skutečnost, že první ohybový mód a druhý torzní mají lokaci krajních uzlů ve skoro stejném bodě, čímž dokážeme z jednoho měření vyvodit Youngův modul pružnosti i modul pružnosti ve smyku.



Obrázek 2.9. Poměrné vzdálenosti od konce pro měření konkrétních vlastních frekvencí [8].

Těleso je uloženo tak, aby byl vliv okolí během měření minimální, a zároveň aby během samotného kmitání nedošlo k posuvu vodícího lanka. Doporučená jsou buď vodivá lanka nebo smyčky. Také se snažíme minimalizovat tlumení způsobené podporou. Klasické nylonové struny jsou dostačující. Příklad uložení lze vidět na obrázku 2.10 [11].



Obrázek 2.10. a) Schéma nastavení aparatury pro určení základní ohybové frekvence, b) měřicí zařízení Sonelastic® s betonovým válcem [13].

Buzení

Doporučovaný způsob buzení je zasažení zkušebního vzorku pomocí ložiskové kuličky nebo keramické brusné kuličky. Místo úderu volíme na základě nastavení aparatury, nejčastěji volný konec nosníku. Zde je vhodné zmínit výhodu IET oproti rezonanční metodě, která vyžaduje kontinuální buzení [11].

Záznam vibrací a výpočet vlastních frekvencí

Pro zaznamenání vibrací je nezbytné mít techniku, která dokáže zachytit frekvence v dostatečné škále. Dokážeme-li odhadnou přibližnou hodnotu modulu pružnosti, lze očekávanou frekvenci vyjádřit z rovnic (2.5) a (2.8). Norma [8] udává očekávaný interval vlastních frekvencí pro měření, ovšem pro možnou kontrolu správnosti nastavení aparatury je dobré měřit až šest vlastních frekvencí. To však klade vyšší požadavky na měřicí zařízení.

Vhodným senzorem je piezosenzor. Obvykle bývá umístěn přímo na zkušebním vzorku, což může ovlivnit výsledek samotného měření v případě, že bychom testovali malé a lehké těleso. Senzor je vhodné umístit poblíž, ale ne přímo na uzel. Je-li možné limitovat interferenci tělesa se senzorem prodlužovací sondou, je vhodné tak učinit [11].

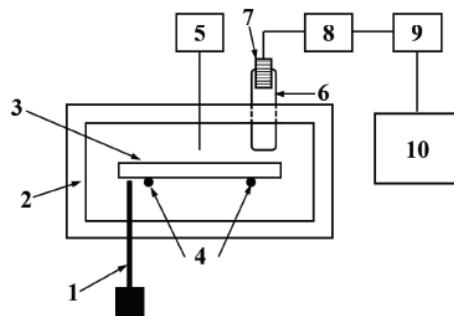
Pokud je okolní prostředí vzduch nebo inertní plyn, lze použít mikrofon pro zachycení vibrací. Ten musí být schopen zachytit vibrace na ultrasonických frekvencích.

Nejsofistikovanější a nejdražší možností je laserový vibrometr, který míří na kmitnu zkušebního vzorku. Tato možnost je vhodná pro vysoké teploty i vakuum [11].

Ze záznamu vibrací poté pomocí rychlé Fourierovy transformace obdržíme výsledné harmonické frekvence (viz obr. 2.12).

Měření za vysokých teplot

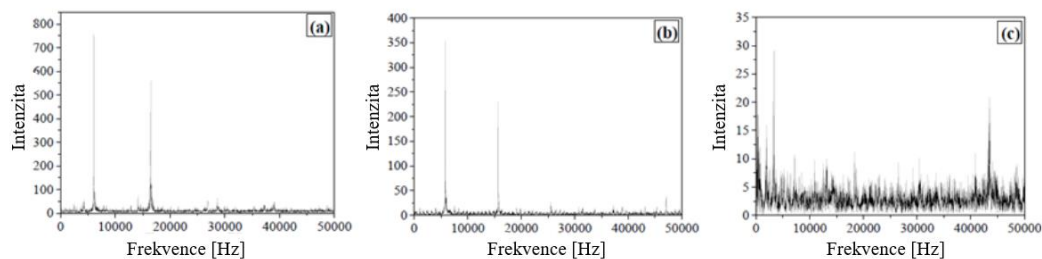
Jednou z největších výhod IET je jednoduchost, se kterou můžeme měřit za vysokých teplot. Na obrázku 3.11 lze vidět nastavení aparatury v peci.



Obrázek 2.11. Schéma měření IET za vysokých teplot. (1) Automatické buzení, (2) pec, (3) zkušební vzorek, (4) podpory, (5) termočlánek, (6) hliníková trubka, (7) mikrofón, (8) zesilovač signálu, (9) analyzátor frekvencí, (10) monitor [14].

V potaz je nutné v tomto případě brát teplotní roztažnost zkušebního tělesa. Do rovnic (2.5), (2.8) vstupují skutečné rozměry, zanedbáním tepelné roztažnosti dochází k chybě v rozmezí 1-2 %. Dále může dojít k vychýlení podpory, proto musíme zvolit vhodný materiál (např. platina nebo nylon) [11].

Norma [8] udává interval přijatelných teplot, od -195°C do 1200°C . U vysokých teplot však může dojít k atenuaci akustického vlnění okolním prostředím, což vede ke zhoršení kvality záznamu (2.12) [14].



Obrázek 2.12. Porovnání intenzity zvukového signálu pro různé teploty měření. (a) Pokojová teplota, (b) 800°C , (c) 1200°C [14].

2.2.2. Porovnání IET s tahovou zkouškou

Při měření stejného zkušební vzorku nedestruktivní a následně destruktivní metodou, obdržíme zpravidla rozdílné hodnoty modulu pružnosti.

Jeden z důvodů je, že výsledky destruktivních zkoušek jsou lokálního charakteru, na rozdíl od NDT, které jsou globální. Tato skutečnost hraje roli především, pokud vyšetřujeme těleso s přítomností defektů [15].

Další, méně významný rozdíl lze do jisté míry kvantifikovat zavedením modulu pružnosti určeného za izotermických podmínek E_{iz} (destruktivní) a za adiabatických podmínek E_{ad} (nedestruktivní), kdy je rozdíl těchto hodnot popsán vztahem (2.13). Typický poměr E_{ad}/E_{iz} je 5 % [11].

$$\frac{1}{E_{ad}} = \frac{1}{E_{iz}} - \frac{\alpha^2 \cdot T}{\rho \cdot c_p} \quad (2.13)$$

kde E_{ad} je Youngův modul pružnosti zjištěný nedestruktivní zkouškou, E_{iz} je Youngův modul pružnosti zjištěný destruktivní zkouškou, α je teplotní součinitel délkové roztažnosti, T je absolutní teplota, ρ je hustota a c_p je měrná tepelná kapacita při konstantním tlaku.

Při výběru metody k měření elastických charakteristik musíme zvážit několik kritérií v závislosti na konkrétní aplikaci (např. požadovaná přesnost, cena, provedení atd., viz tab. 2.2) [11].

Tabulka 2.2. *Výhody a nevýhody IET a tahové zkoušky.*

<i>Výhody IET</i>	<i>Nevýhody IET</i>
• rychlá a jednoduchá • nedestruktivní • snadné měření za vysokých teplot • možnost určení tlumení • náklady • možnost kontinuálního měření	• nejednoznačná interpretace výsledků • nedostatečný výzkum v oblasti nehomogenních anizotropních materiálů • náchylná k rozměrovým odchylkám geometrie vzorku • nelze určit lokální vlastnosti
<i>Výhody tahové zkoušky</i>	<i>Nevýhody tahové zkoušky</i>
• dobře interpretovatelné výsledky • generování tahových diagramů • určování lokálních vlastností	• cena zkušebního stroje i měřících zařízení • složité měření některých materiálů

2.2.3. Aplikace IET mimo podmínky dané normou ASTM

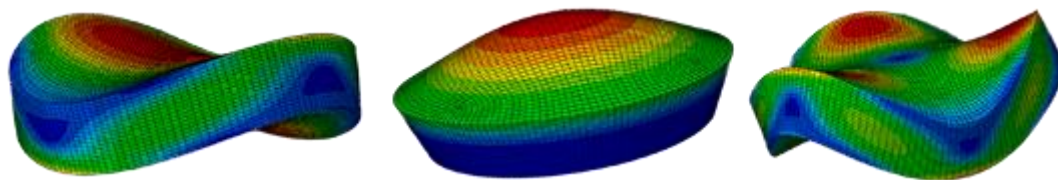
Norma [8] udává, že výsledky pro nehomogenní a neizotropní tělesa by měly být brány spíše orientačně, nicméně IET je hojně používána i nad rámec těchto specifikací, a to zejména pro určování elastických charakteristik kompozitů a laminátů [16].

Neschopnost určit lokální vlastnosti pomocí IET limitovala její využití, avšak nedávno se podařilo pomocí modifikace uložení zkušebního vzorku tento problém překonat [17].

Další výzkum se zabýval validitou výsledků IET při určování elastických charakteristik laminátu s reziduálním poškozením. Zprůměrováním výsledků obdržených tahovou zkouškou bylo dosaženo hodnoty obdržené IET. To lze interpretovat jako potvrzení věrohodnosti výsledků IET [15].

Dřevo jakožto porézní anizotropní materiál by mělo pro IET znamenat překážku. Byla publikována řada studií, v nichž byla IET srovnávána nejčastěji s trojbodovou ohybovou zkouškou s dobrými výsledky a koeficient determinace R^2 v rozmezí od 0,80 do 0,85 [18] [19].

Překvapivé využití IET se našlo i ve farmacii pro zjišťování elastických charakteristik tabletek [20].



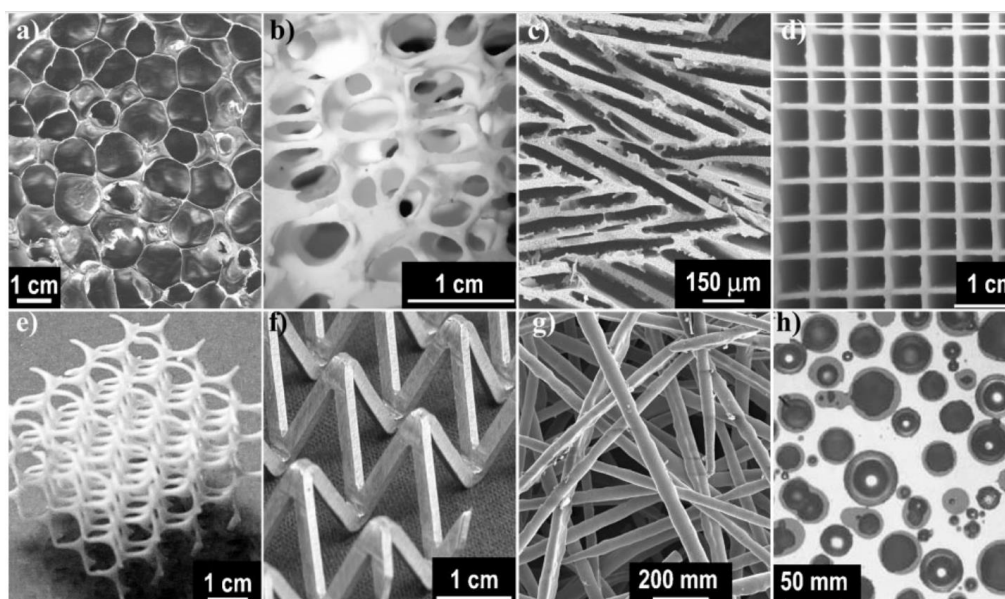
Obrázek 2.13 První tři módy frekvence pilulky [20].

2.3. Určování elastických charakteristik vysoce-porézních materiálů pomocí IET

2.3.1. Vysoce-porézní materiály

Za vysoce-porézní materiál se považují dvoufázové materiály látka-vzduch s objemovým podílem vzduchu vyšším než 50–75 %. Jak již bylo zmíněno v úvodu, vysoce-porézní materiály jsou velice atraktivní pro jejich unikátní set vlastností, a to zejména poměr pevnosti ku hmotnosti. Porézní materiály nalezneme jak v přírodě (struktura korku, dřeva, kostí), tak i v technické praxi (pevný filtrů katalyzátorů, tepelné nebo akustické izolace, filtry tekutých kovů a další.) [21].

Struktura buňky leží v prostoru mezi dvěma extrémy – pravidelnou rovinnou strukturou (např. voština) a zcela nepravidelnými, náhodně orientovanými tvary. Na obrázku 3.14. jsou uvedeny některé příklady těchto struktur [2] .



Obrázek 2.14. Příklady porézních struktur: (a) hliníková slitina obsahující částice S_iC (přímé pění); (b) pěna z Al_2O_3 (replikace); (c) pěna z Al_2O_3 (freeze-casting); (d) extruze voštinové struktury na bázi $Mg_2Al_4Si_5O_{18}$; (e) kostra z Al_2O_3 ; (f) tetraedrální mřížka plechu AW6061; (g) svázaná vlákna z nerezové oceli; (h) syntetická pěna z metalického skla s uhlíkovými mikro kuličkami [21].

Parametrem nejvíce ovlivňujícím mechanické vlastnosti porézního materiálu je jeho relativní hustota daná vztahem (2.14). Častěji se lze setkat s porozitou. Vztah mezi těmito dvěma veličinami je poté (2.15) [2]:

$$\rho_{rel} = \rho^* / \rho_s \quad (2.14)$$

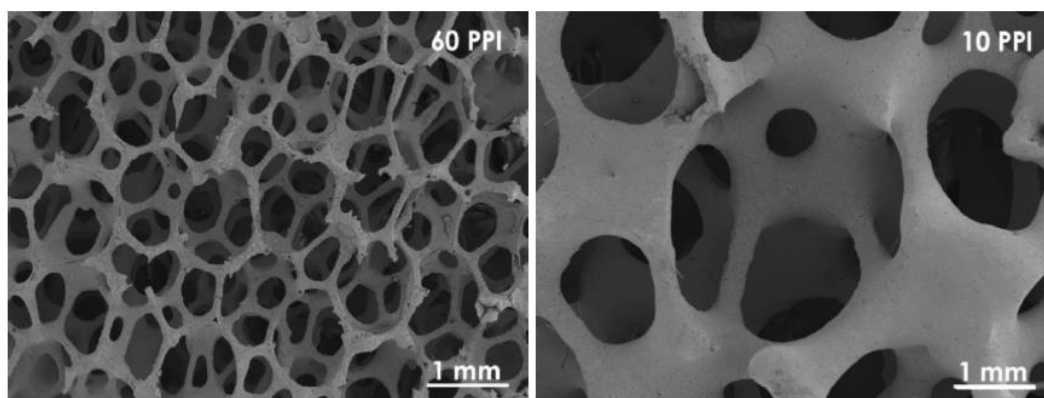
kde ρ_{rel} je relativní hustota, ρ^* je hustota porézního tělesa a ρ_s je hustota hutného tělesa,

$$P = 1 - \rho_{rel} \quad (2.15)$$

kde P je porozita materiálu a ρ_{rel} je relativní hustota.

Další důležité parametry jsou:

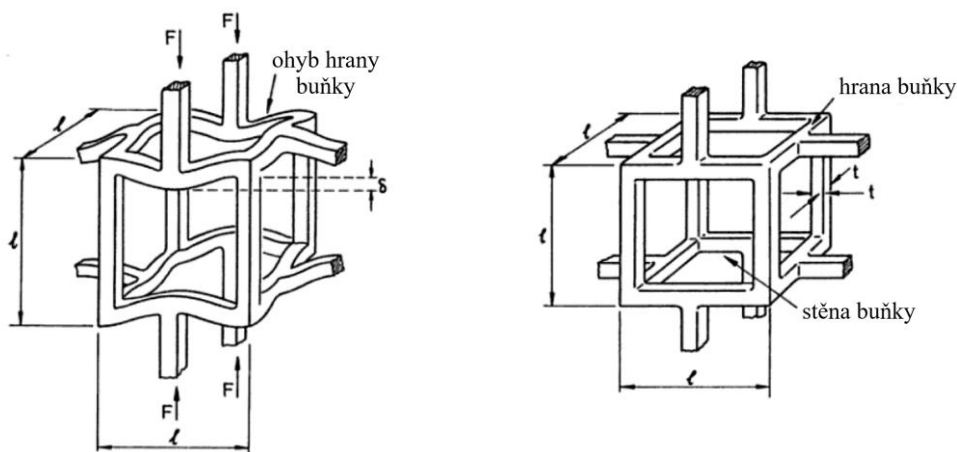
- velikost a tvar buněk
- tloušťka a rozložení trámečků,
- tvar a morfologie trámečků (např. zda jsou hutné nebo obsahují centrální díru),
- vzájemná propojenost buněk (průměrná velikost otvoru ve stěně společné dvěma buňkám),
- stupeň anizotropie (např. pórovitosti, velikosti pórů, gradientní materiály apod.),
- poměr povrchu k objemu [22].



Obrázek 2.15. Struktura keramické pěny Vukopor[®] A, 60 PPI (vlevo) a 10 PPI (vpravo) [22].

2.3.2. Model materiálu s otevřenými póry dle Gibsonové-Ashbyho

Tato práce se zabývá zejména strukturami s otevřenými póry, kde při určování jejich elastických vlastností vycházíme z modelu Gibsonové a Ashbyho (obr. 2.16). Podle něj je hlavní příčinou deformace ohyb trámečku s tím, že hlavním parametrem je relativní hustota [2].



Obrázek 2.16. *Elementární buňka porézního materiálu s otevřenou pórovitostí dle Gibsonové-Ashbyho vlevo, ohyb hrany buňky vpravo [2].*

Vztahy popisující elastické charakteristiky porézního tělesa (Youngův modul E^* , modul pružnosti ve smyku G^* a Poissonův poměr μ^*) dle této teorie jsou následující [2]:

$$\frac{E^*}{E_s} = C_1 \cdot \left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)^2 \quad (2.16)$$

$$\frac{G^*}{E_s} = C_2 \cdot \left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)^2 \quad (2.17)$$

$$\mu^* = \frac{C_1}{2 \cdot C_2} - 1 = C_3 \quad (2.18)$$

kde E_s je Youngův modul hutného tělesa, C_1 je konstanta úměrnosti ($C_1 \cong 1$), C_3 se nejčastěji udává jako 0,3, C_2 poté lze z rovnic (2.10) a (2.12) určit jako $\frac{3}{8}$. Tyto hodnoty pozměňujeme ve snaze proložit naměřená data vhodnou funkcí, například u hliníkových pěn je běžná hodnota $C_1 = 0,3$ [2].

2.3.3. Příklady aplikací IET pro určování elastických charakteristik

Voština je pravděpodobně nejznámější vysoce-porézní struktura. Díky jejímu výhodnému poměru povrchu ku objemu se široce využívá v leteckém průmyslu. IET byla použita k parametrické studii faktorů ovlivňujících tuhost voštiny a je hodnocena jako vhodná a rychlá náhrada klasické ohybové zkoušky [23].

Rovněž u vysoce porézních keramických pěn lze IET použít místo klasických zkoušek. Jedno z častých kritérií, které by potvrzovalo výsledky, je shoda s teorií dle Gibsonové a Ashbyho, a to především závislost Youngova modulu na relativní hustotě [24] [25] [26].

Během vyšetřování charakteristik keramické kejdy se podařilo získat menší rozptyl dat a vyšší replikovatelnost pomocí IET oproti ohybové zkoušce. Obdržené výsledky poté odpovídaly očekávaným výsledkům dle teorie Gibsonové. Zároveň IET v této oblasti ukázala potenciál jako náhrada viskozimetru [27].

Jednou z unikáních aplikací vysoce-porézních keramik je jejich uplatnění v biomedicině jako náhrada kostní tkáně pomocí bioaktivních pěn (např. 45S5 Bioglass®). Jedná se o další příklad toho, kdy nevěrohodnost informací může mít za následek ohrožení lidského života.

Pro křehkost těchto pěn je klasická statická zkouška opět obtížná k provedení. Navíc možnost zachování vzorku a jeho použití k opětovnému měření je další motivací k používání IET [6] [28].

Při standardním měření vibrací za pomoci mikrofону lze však narazit na potíže během měření materiálu s otevřenými buňkami a nízkým PPI, kdy kvůli malému vibrujícímu povrchu může být záznam vibrací problematický [29].

3. Výpočtová část

3.1. Výpočtové modely pro modální analýzu a tahovou zkoušku

3.1.1. Model homogenního tělesa

Vstupní parametry

První úkol spočíval ve vytvoření modelu homogenního tělesa, na kterém by se otestovala přesnost IET v prostředí ANSYS. Byly simulovány materiály Vukopor[®]A a 45S5 Bioglass[®], jejichž elastické charakteristiky byly převzaty z [6] a [28] (viz tab. 3.1).

Tabulka 3.1. *Elastické charakteristiky a hustota modelů.*

<i>Materiál</i>	<i>E_s [GPa]</i>	<i>μ_s [-]</i>	<i>G_s [GPa]</i>	<i>ρ_s [g/cm³]</i>
Vukopor [®] A	90	0,2500	36,00	4,00
45S5 Bioglass [®]	78	0,2674	30,77	2,78

Protože rovnice (2.1) má jinou formulaci pro délky $L \geq 20$ mm, byly vytvořeny dva modely. Model o délce 35 mm označený jako A_{L35} sloužil k ověření rovnice (3.3) a model o délce 10 mm označený jako B_{L10} k ověření rovnice (3.2). Pro model A_{L35} byl zvolen materiál Vukopor[®]A a pro model B_{L10} materiál 45S5 Bioglass[®]. Kvůli sjednocení s druhým úkolem byly tyto modely síťovány pomocí kvadratických objemových elementů SOLID186. Ostatní vstupní parametry jsou uvedeny v tabulce 4.2.

Tabulka 3.2. *Doplňující vstupní parametry modelů A_{L35} a B_{L10}*

<i>Název parametru</i>	<i>Označení</i>	<i>Jednotka</i>	<i>Hodnota</i>
šířka	b	[mm]	3,0
hloubka	t	[mm]	1,0
velikost elementu	Em_{size}	[mm]	0,1

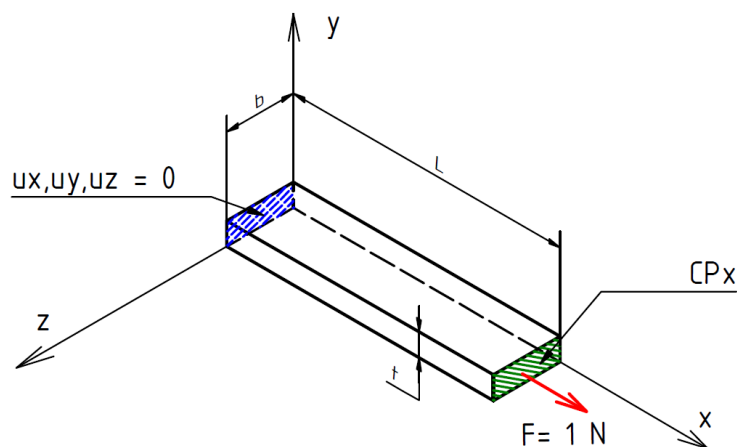
Výpočet elastických charakteristik

IET

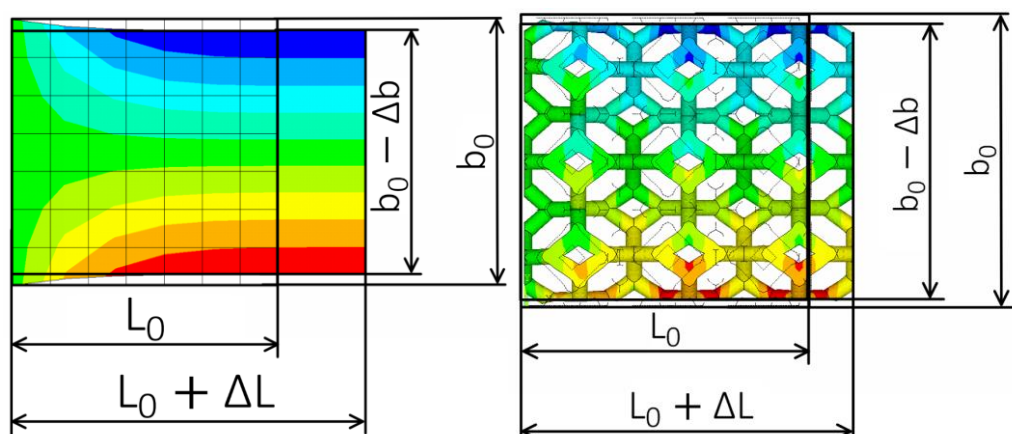
Jak již bylo výše uvedeno, zkušební vzorek pro IET je uložen volně, tudíž nemusíme aplikovat žádné okrajové podmínky. Současně zde však nemůžeme použít symetrii a tím výpočet usnadnit. Vlastní frekvence byly obdrženy pomocí modální analýzy programu ANSYS. Základní ohybová a torzní frekvence byla dosazena do vztahů (2.5) a (2.8) s tím, že Poissonův poměr byl vyjádříme ze vztahu (2.4).

Tahová zkouška

Okrajové podmínky simulující tahovou zkoušku jsou schematicky zobrazeny na obrázku 3.1. Uzlům ležícím v rovině YZ byly zamezeny veškeré posuvy ($u_x, u_y, u_z = 0$). Protěžší stěně byl posuv svázán posuv svázán (*coupling*) ve směru osy x, k zajištění rovnoměrné deformace při zatížení byl. Výsledná přetvoření (viz obr. 3.2) spolu se vstupními parametry dosadíme do rovnic (2.1) a (2.4).



Obrázek 3.1. Schématické znázornění okrajových podmínek aplikovaných na homogenní nosníkový model za účelem simulování tahové zkoušky.



Obrázek 3.2. Znázornění deformace homogenního a porézního modelu.

Zjištěné hodnoty byly porovnány se vstupními hodnotami (viz tab. 3.3). Lze tedy konstatovat, že simulované IET i tahová zkouška homogenního tělesa podávají věrohodné výsledky.

Tabulka 3.3. Porovnání výsledků IET a tahové zkoušky pro modely A_{L20} a B_{L10} .

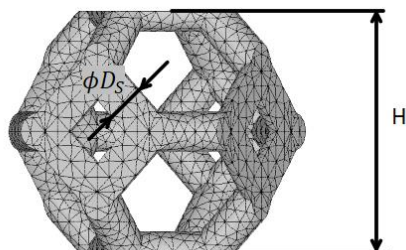
	E_{IET}/E_s	G_{IET}/G_s	μ_{IET}/μ_s	E_{tah}/E_s	G_{tah}/G_s	μ_{tah}/μ_s
A_{L20}	0,99	1,00	0,99	1,01	1,00	1,00
B_{L10}	1,00	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00

3.1.2. Model porézního tělesa

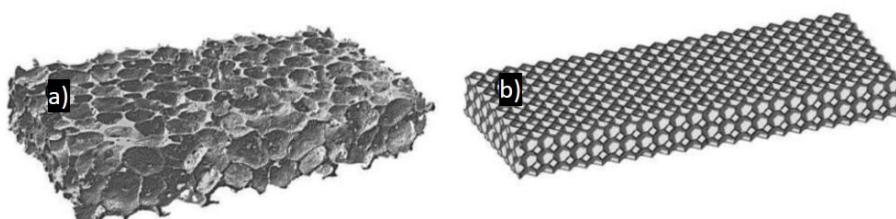
Model buňky

Ve snaze modelovat pěny se nejčastěji setkáváme s Kelvinovou buňkou (viz obr. 3.2). Tento mnohostěn je známý svou schopností minimalizovat poměr povrchu a objemu. Zároveň je podobný skutečným pěnám, což lze vidět na obr. 3.3. Tento model byl zvolen v návaznosti na mnohé práce, které se podobnou problematikou zabývaly (např. [6] [30] [31] [32]). Jelikož se jedná o složitou strukturu, k síťování

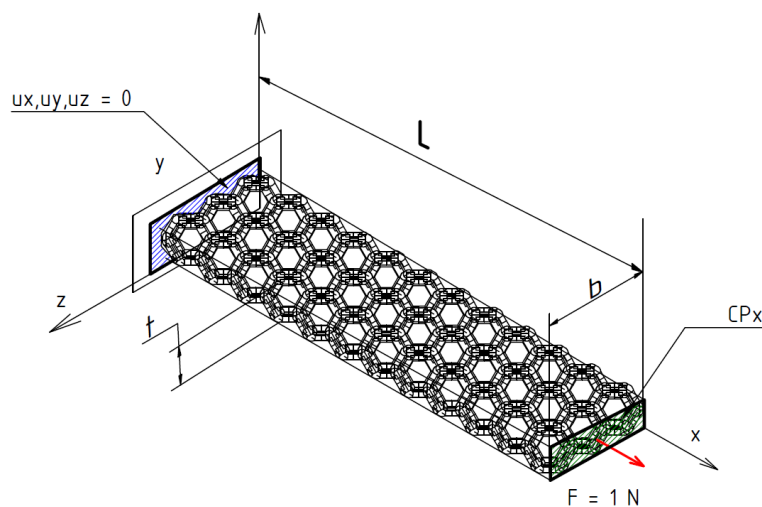
byl zvolen kvadratický objemový prvek SOLID186. Příklad modelu spolu s aplikovanými okrajovými podmínkami lze vidět na obrázku 3.6.



Obrázek 3.3. Model Kelvinovy buňky o porozitě $P=0,85$, výšce H a průměru trámečku D_s .

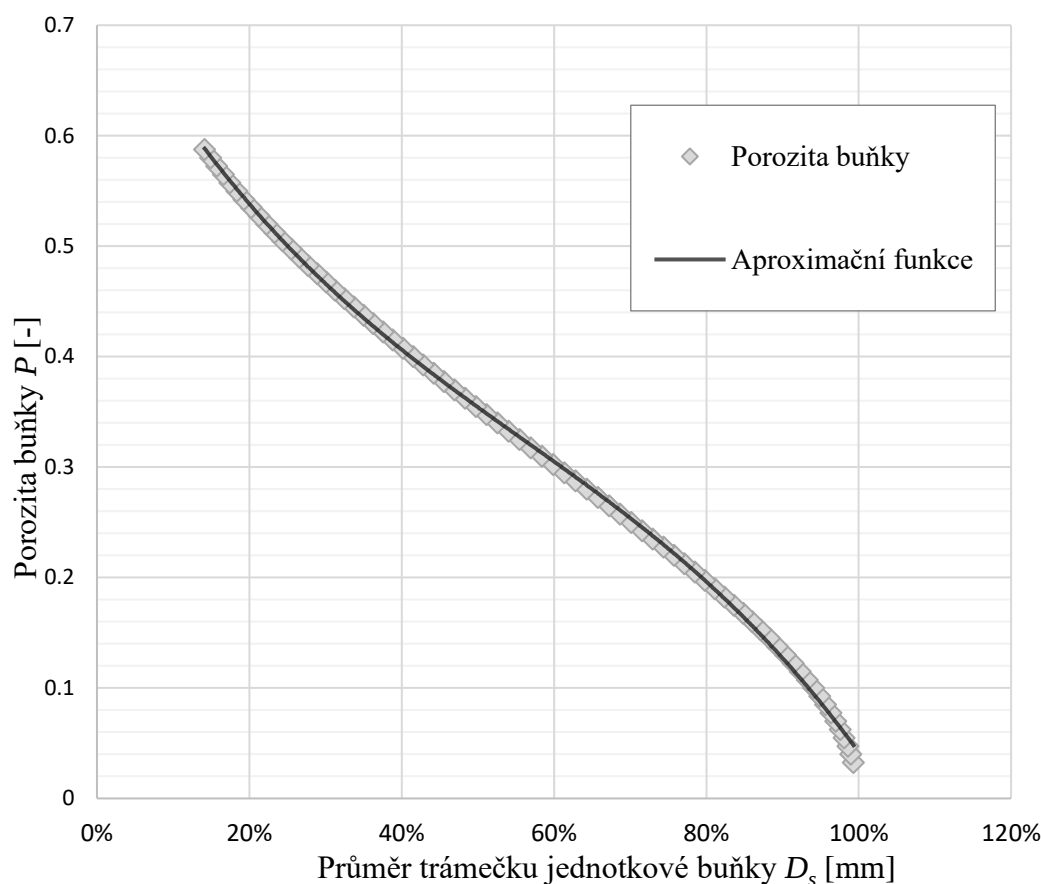


Obrázek 3.4. Porovnání (a) skutečné porézní struktury s (b) modelem sestaveným z Kelvinových buněk [33].



Obrázek 3.5 Schématické znázornění okrajových podmínek aplikovaných na porézní nosníkový model za účelem simulování tahové zkoušky

Hodnotu porozity buňky obdržíme jako poměr objemu Kelvinovy buňky a objemu krychle o straně rovné výšce buňky. Objem jednotkové Kelvinovy buňky byl zjištěn pomocí funkce VSUM v prostředí ANSYS. Ze série vygenerovaných jednotkových buněk byla získána funkce (3.1), pomocí níž byl odhadnut průměr trámečku.



Obrázek 3.6. Závislost porozity jednotkové buňky na průměru trámečku.

$$D_s = \frac{-0.7946P^3 + 1.3367P^2 - 1.2395P + 0.7391}{H} \quad (3.1)$$

kde D_s je průměr trámečku, H je výška buňky a P je porozita.

Při práci s keramickými pěnamí je zvykem používat počet pórů na lineární palec (PPI z angl. *pore per inch* dále jen PPI). Použité PPI jsou uvedeny v tabulce 3.4.

Tabulka 3.4. Počet pórů na palec pro dané výšky buňky.

<i>PPI [pórů na palec]</i>	<i>H [mm]</i>
25	1,00
50	0,50
100	0,25

3.1.3. Analýza vlivu vstupních parametrů

Pro vytvoření výpočetně co nejméně náročného modelu je třeba posoudit vliv vstupních parametrů na ty výstupní, což nám umožní nalézt např. optimální velikost diskretizace konečnými prvky při zachování požadované přesnosti výsledků.

Výpočet elastických charakteristik

Výpočet elastických charakteristik je pro porézní model proveden po vzoru homogenního, nicméně u porézního modelu se setkáváme s anizotropním chováním. Můžeme tedy očekávat určitou chybu ve výpočtu Poissonova poměru v případě IET a modulu pružnosti ve smyku v případě tahové zkoušky, protože oba využívají vztah (2.4), který platí pouze pro izotropní materiály. Již zmíněné vzaty pro výpočet elastických charakteristik tedy jsou:

IET

$$E = 0,9465 \cdot \left(\frac{m \cdot f_f^2}{b} \right) \cdot \left(\frac{L}{t} \right)^3 \cdot T_1 \quad (2.5)$$

$$G = \frac{4 \cdot L \cdot m \cdot f_t^2}{b \cdot t} \cdot \frac{B}{1 + A} \quad (2.8)$$

$$\mu = \frac{E}{2G} - 1 \quad (2.4)$$

Tahová zkouška

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2.1)$$

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)} \quad (2.4)$$

$$\mu = -\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \quad (2.2)$$

Velikost elementu

První parametr, jehož význam je nutno posoudit, je jemnost sítě. Zde je vhodné zavést veličinu N_{div} vyjadřující počet elementů trámečku, pomocí které můžeme pro různé průměry trámečku jednodušeji kvantifikovat jemnost sítě. Příklad sítě lze vidět na obr. 3.5. Parametry modelu sloužící ke zjištění tohoto vlivu jsou uvedeny v tabulce 3.5.

Tabulka 3.5. Vstupní parametry modelu určujícího vliv jemnosti sítě

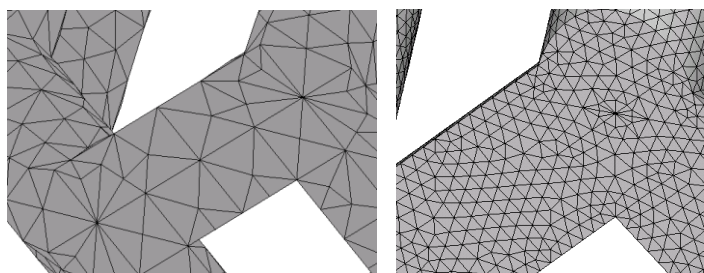
Rozměry [mm]	Materiál	Porozita [-]	H [mm]	PPI
20 × 2 × 1	Vukopor®A	0,85	1	25

Jemnější síť se zpravidla projevuje nižší tuhostí, o čemž svědčí obdržené výsledky (viz tab. 3.6). Z těch je patrné, že volba $N_{div} > 2$ nevede k výraznému zpřesnění výsledků.

Tabulka 3.6. Závislost vypočteného Youngova modulu pružnosti na velikosti použitých prvků.

N_{div} [-]	E_{mod} [GPa]	E_{tah} [GPa]
1,5	1,95	1,91
2,0	1,88	1,86
5,0	1,87	1,84
10,0	1,85	1,82

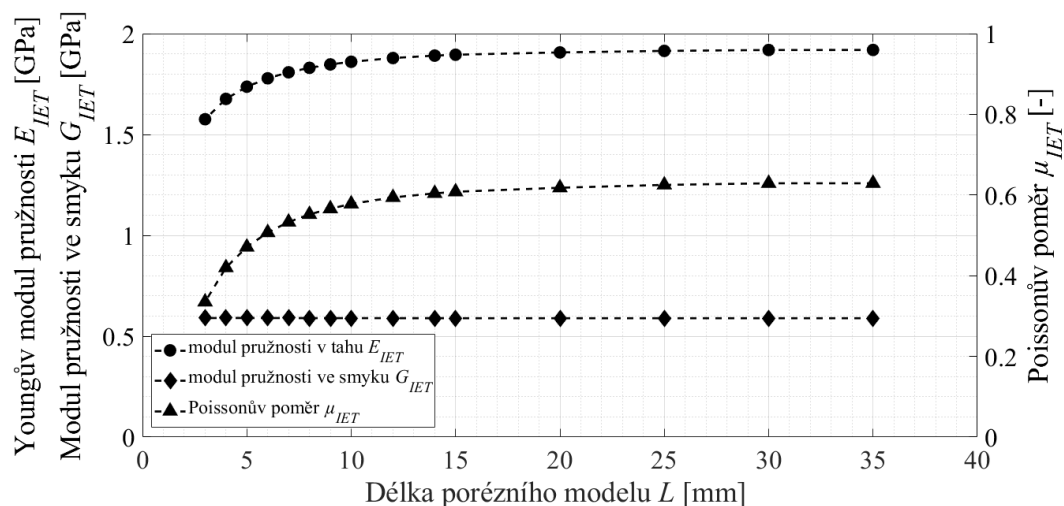
Obrázek 3.7. Ukázka jemnosti sítě trámečku. Vlevo $N_{div} = 2$, vpravo $N_{div} = 10$.



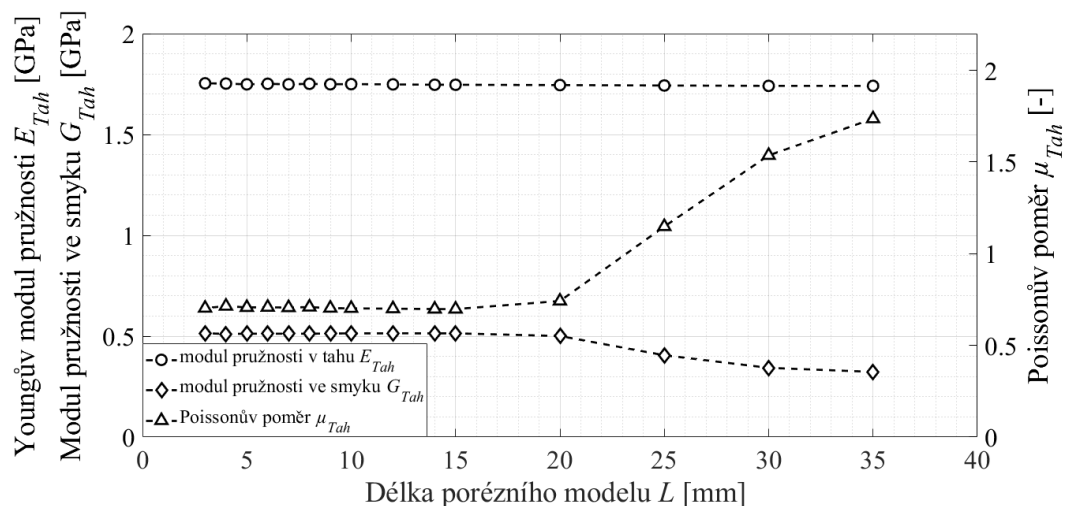
Délka

Ke snížení výpočtové náročnosti je vhodné zvolit model co nejmenších rozměrů. Vstupní materiál a porozita viz tab. 3.5.

Z obr. 3.8 vyplývá, že délka modelu $L = 12$ mm je nejmenší délkový rozměr modelu, od kterého se již hodnoty elastických charakteristik určené pomocí IET příliš neliší. Tento závěr je ve shodě s [34]. Z obrázku 3.9 vyplývá tělesa s poměrem $L/D > 20$ jsou příliš tenká pro provedení tahové zkoušky.



Obrázek 3.8. Závislost elastických charakteristik, obdržených z vlastních frekvencí modelu (metodika pro IET), na délce porézního tělesa.



Obrázek 3.9. Závislost elastických charakteristik obdržených pomocí tahové zkoušky na délce porézního tělesa.

Šířka modelu

Výše zmíněný model o délce $L = 12$ mm byl postupně prodlužován ve směru osy Z. Na základě výsledků (viz tab. 3.7 a 3.8) lze konstatovat, že změna šířky modelu nemá na moduly pružnosti obdržené pomocí IET významný vliv do překročení poměru $L/B = 0,5$, kdy těleso ztrácí nosníkový charakter. U modulu pružnosti ve smyku je třeba volit těleso o obdélníkovém příčném průřezu. Můžeme pozorovat že i nepatrná změna modulů pružnosti má výrazný vliv na hodnotu Poissonova poměru.

Tabulka 3.7. Vliv šířky modelu na elastické charakteristiky určené z vlastních frekvencí modelu (dle normy pro IET).

Šířka [mm]	E_{IET} [GPa]	G_{IET} [GPa]	μ_{IET} [-]
1	1,90	0,60	0,62
2	1,92	0,51	0,89
3	1,93	0,49	0,96
4	1,93	0,48	0,98
6	1,71	0,49	0,75

Tabulka 3.8. Vliv šířky modelu na elastické charakteristiky obdržené za pomoci tahové zkoušky.

Šířka [mm]	E_{tah} [GPa]	G_{tah} [GPa]	μ_{tah} [-]
1	1,88	0,51	0,83
2	1,93	0,51	0,90
3	1,95	0,51	0,92
4	1,96	0,51	0,93
6	1,88	0,51	0,83

Tloušťka

Pro IET je doporučováno volit poměr $b/t \geq 1,1$, tudíž pro model o délce $L = 12$ mm a šířce $b = 2$ mm je vhodné volit tloušťku $t = 1$ mm.

Na základě těchto poznatků bylo vytvořeno zkušební těleso o minimálních rozměrech (viz tab. 3.10). Po jeho porovnání s relativně přesnějším modelem lze konstatovat, že naše zkušební těleso podává věrohodné výsledky.

Tabulka 3.9 Porovnání elastických charakteristik při zvětšení zkušebního tělesa. Veličiny E a G v jednotkách [GPa], veličina μ bezrozměrná.

$L \times b \times t$	Materiál	PPI	P	E_{IET}	E_{tah}	G_{IET}	G_{tah}	μ_{IET}	μ_{tah}
$35 \times 3 \times 1$	45S5	25	0,85	1,34	1,40	0,37	0,44	0,815	0,601
$12 \times 3 \times 1$	Bioglass®			1,34	1,35	0,35	0,42	0,882	0,589

3.2. Elastické charakteristiky porézního tělesa určené z modálních vlastností modelu zkušebního tělesa (dle normy pro IET)

3.2.1. Závislost elastických charakteristik na velikosti buňky

Určování vlivu velikosti buňky představuje výpočetně náročný úkol. Každé půlení velikosti buňky znamená několikanásobné zvýšení celkového počtu buněk, proto byl tento vliv zkoumán na malém tělese simulující materiál Vukopor® A o rozměrech $6 \times 2 \times 1$. Následně byla stejná analýza provedena u tělesa prodlouženého na délku $L = 12$ mm, ale s tím rozdílem, že minimální velikost buňky byla PPI 50. Výsledky lze vidět v tabulkách Tab. 3.10 a Tab. 3.11. Z těch vyplývá, že samotná velikost buňky nemá na výsledky obdržené pomocí IET značný vliv. Zásadní je poměr počtu buněk na délkové rozměry.

Tabulka 3.10. Vliv velikosti buňky na elastické charakteristiky obdržené za pomoci IET, těleso o délce $L = 6$ mm.

<i>PPI</i>	E_{mod} [GPa]	G_{mod} [GPa]	μ_{mod} [-]
25	1,77	0,59	0,53
50	1,83	0,51	0,79
100	1,93	0,52	0,80

Tabulka 3.11. Vliv velikosti buňky na elastické charakteristiky obdržené za pomoci tahové zkoušky, těleso o délce $L = 12$ mm.

<i>PPI</i>	E_{IET} [GPa]	G_{IET} [GPa]	μ_{IET} [-]
25	1,92	0,51	0,89
50	1,90	0,51	0,82

3.2.2. Závislost elastických charakteristik na porozitě tělesa

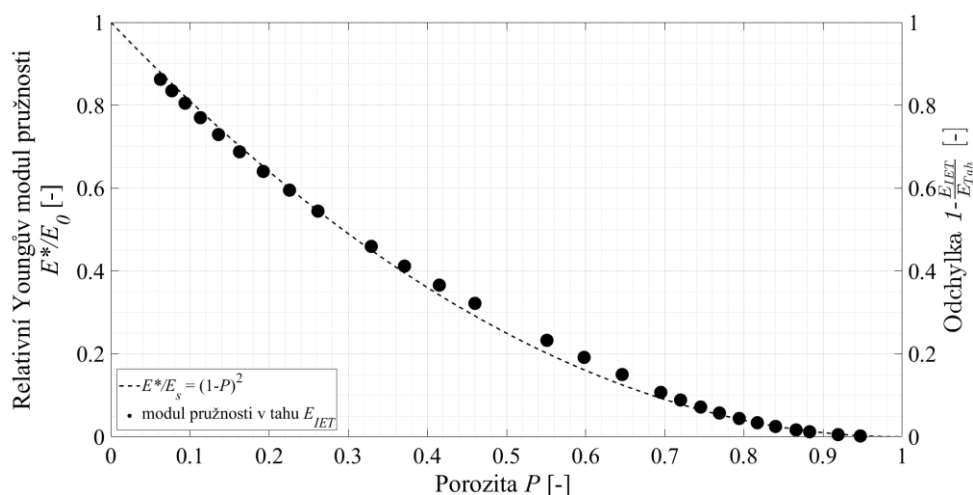
K určení závislosti elastických charakteristik na porozitě tělesa, byl vytvořen model simulující materiál 45S5 Bioglass® o rozměrech $12 \times 3 \times 1$, PPI 25 a hustotou v intervalu od 0,016 do 0,950. Výsledné závislosti byly proloženy funkcemi dle teorie Gibsonové-Ashbyho (2.11-2.13) (viz obr. 3.8-10) [2]. Zde se v literatuře můžeme setkat s relativní porozitou (2.14) a logaritmickými osami spolu s normováním modulu pružnosti ve smyku Youngovým modulem. Pro naše účely byly zvoleny lineární osy. Modul pružnosti ve smyku porézního tělesa byl normován modulem pružnosti ve smyku tělesa hutného. K proložení byly tudíž použity funkce:

$$\frac{E^*}{E_s} = (1 - P)^2 \quad (3.2)$$

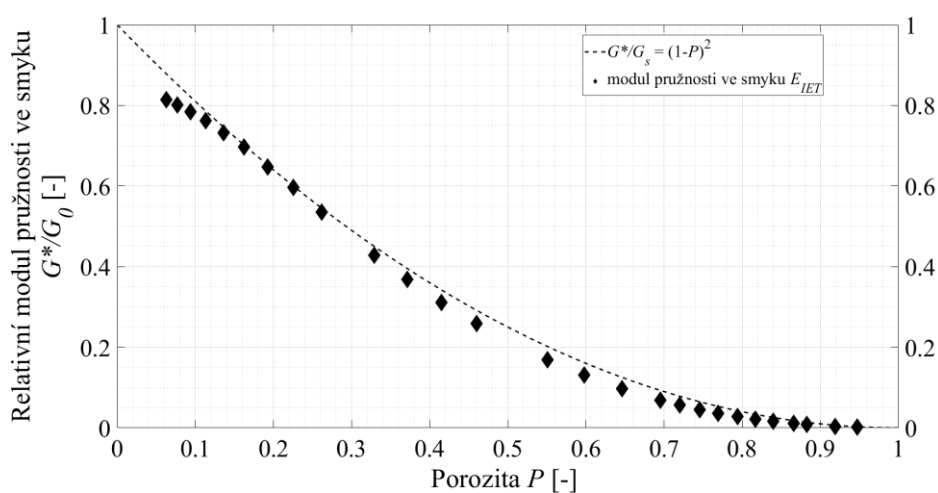
$$\frac{G^*}{G_s} = (1 - P)^2 \quad (3.3)$$

$$\mu_s = 0,2674 \quad (3.4)$$

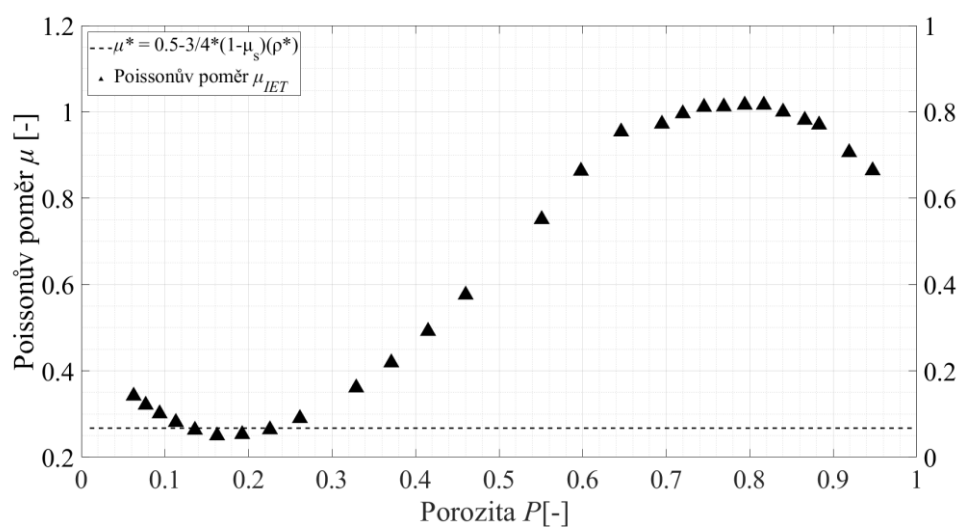
kde E^* je Youngův modul pružnosti porézního modelu, E_s je Youngův modul pružnosti hutného tělesa ($E_s = 78$ GPa), P je porozita, G^* je modul pružnosti ve smyku porézního modelu, G_s je modul pružnosti ve smyku hutného tělesa ($G_s = 30,77$ GPa) a μ_s je Poissonův poměr hutného tělesa.



Obrázek 3.10. Vliv porozity tělesa na Youngův modul pružnosti určený z modálních charakteristik modelu (dle normy pro IET).



Obrázek 3.11. Vliv porozity na modul pružnosti ve smyku určený z modálních charakteristik modelu (dle normy pro IET)



Obrázek 3.12. Vliv porozity na Poissonův poměr určený z modálních charakteristik modelu (dle normy pro IET).

Oba moduly pružnosti vykazují dobrou shodu s proloženými funkcemi, Poissonův poměr však vykazuje značnou závislost na porozitě. Tento jev je dále rozebrán v diskusi.

3.3. Srovnání výsledků IET s výsledky tahové zkoušky

Po určení elastických vlastností na základě provedené modální analýzy vždy následovalo provedení simulace tahové zkoušky, čímž byly pro každý model obdrženy dvě sady výsledků elastických charakteristik modelu. Výsledky tahové zkoušky slouží jako referenční hodnota a jsou vůči ní vztahovány výsledky elastických charakteristik určených dle normy pro IET. Vliv velikosti buňky na určené elastické charakteristiky je uveden v tab. 3.12 až tab. 3.17 a vliv porozity modelu na tyto charakteristiky v obr. 3.13-3.15).

Vliv velikosti buňky

U IET ani u tahové zkoušky nehraje velikost buňky roli. Jak už bylo zmíněno výše, záleží na poměru počtu buněk ku délkovým rozměrům.

Tabulka 3.12. *Závislost Youngova modulu pružnosti na velikosti buňky u krátkého modelu ($L = 6$ mm). Veličiny E a G v jednotkách [GPa], veličina μ bezrozměrná.*

i	PPI	E_{IET}	E_{IET_i}/E_{IET_1}	E_{tah}	E_{tah_i}/E_{tah_1}	E_{IET}/E_{tah}
1	25	1,77	1,00	1,85	1,00	0,97
2	50	1,83	1,03	1,89	1,02	0,97
3	100	1,93	1,09	2,09	1,13	0,92

Tabulka 3.13. *Závislost modulu pružnosti ve smyku na velikosti buňky u krátkého modelu ($L = 6$ mm). Veličiny E a G v jednotkách [GPa], veličina μ bezrozměrná.*

i	PPI	G_{IET}	G_{IET_i}/G_{IET_1}	G_{tah}	G_{tah_i}/G_{tah_1}	G_{IET}/G_{tah}
1	25	0,59	1,00	0,52	1,00	0,98
2	50	0,51	0,86	0,52	1,00	0,98
3	100	0,52	0,88	0,55	1,06	0,95

Tabulka 3.14. *Závislost Poissonova poměru na velikosti buňky u krátkého modelu ($L = 6$ mm). Veličiny E a G v jednotkách [GPa], veličina μ bezrozměrná.*

i	PPI	μ_{IET}	μ_{IET_i}/μ_{IET_1}	μ_{tah}	μ_{tah_i}/μ_{tah_1}	μ_{IET}/μ_{tah}
1	25	0,53	1,00	0,83	1,00	0,95
2	50	0,79	1,50	0,83	1,00	0,95
3	100	0,80	1,51	0,90	1,08	0,89

Tabulka 3.15. Závislost Youngova modulu pružnosti na velikosti buňky u prodlouženého modelu ($L = 12 \text{ mm}$). Veličiny E a G v jednotkách [GPa], veličina μ bezrozměrná.

i	PPI	E_{IET}	E_{IET_i}/E_{IET_1}	E_{tah}	E_{tah_i}/E_{tah_1}	E_{IET}/E_{tah}
1	25	1,92	1,00	1,75	1,00	1,10
2	50	1,90	0,99	2,06	1,19	0,92

Tabulka 3.16. Závislost modulu pružnosti ve smyku na velikosti buňky u prodlouženého modelu ($L = 12 \text{ mm}$). Veličiny E a G v jednotkách [GPa], veličina μ bezrozměrná.

i	PPI	G_{IET}	G_{IET_i}/G_{IET_1}	G_{tah}	G_{tah_i}/G_{tah_1}	G_{IET}/G_{tah}
1	25	0,51	1,00	0,51	1,00	1,00
2	50	0,51	1,00	0,63	1,24	0,81

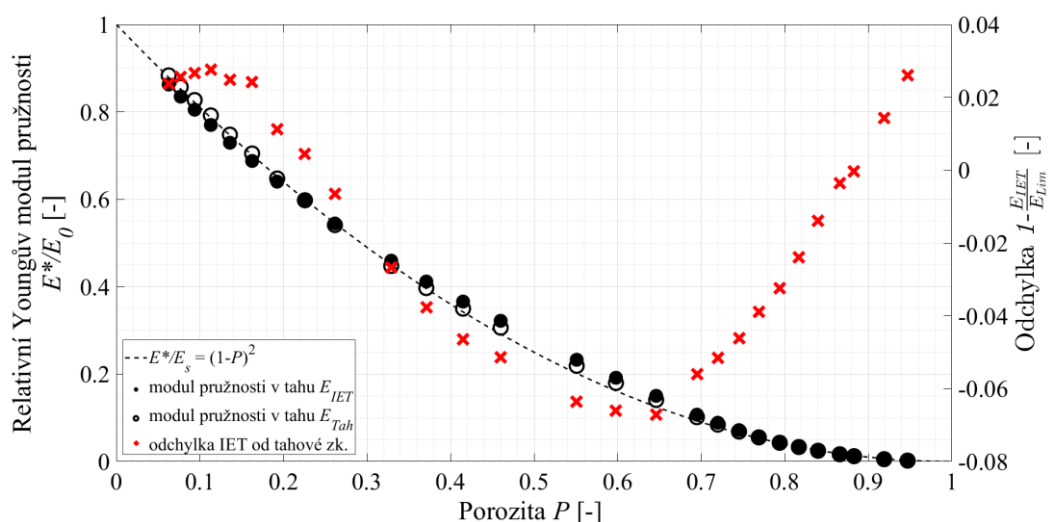
Tabulka 3.17 Závislost Poissonova poměru na velikosti buňky u prodlouženého modelu ($L = 12 \text{ mm}$). Veličiny E a G v jednotkách [GPa], veličina μ bezrozměrná.

i	PPI	μ_{IET}	μ_{IET_i}/μ_{IET_1}	μ_{tah}	μ_{tah_i}/μ_{tah_1}	μ_{IET}/μ_{tah}
1	25	0,89	1,00	0,71	1,00	1,25
2	50	0,82	0,92	0,63	0,89	1,30

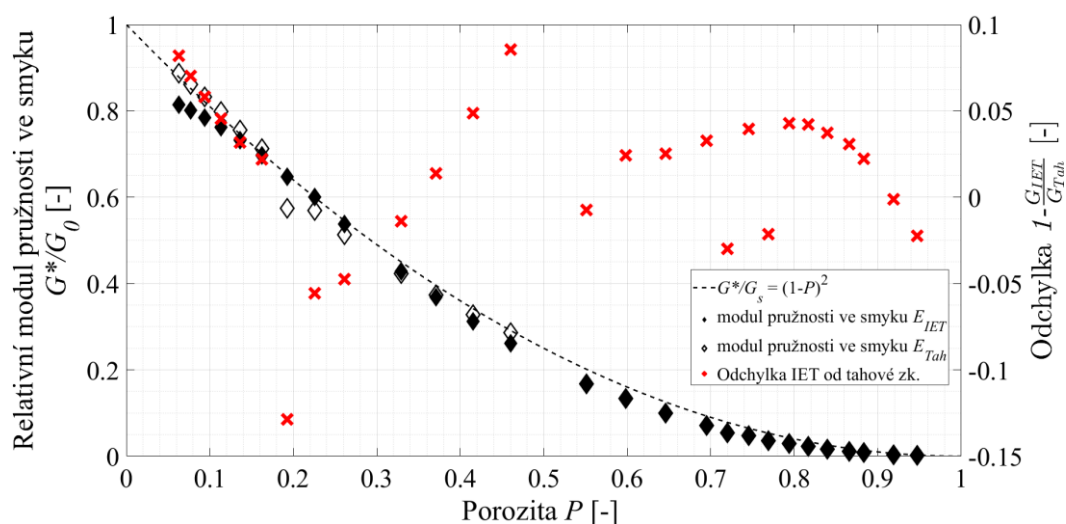
Závislost na porozitě

V oblasti vysokých porozit ($P > 0,65$) se setkáváme s dobrou shodou obou modulů pružnosti nicméně jak už bylo zmíněno, na Poissonově poměru se značně odrážejí i malé odchylky. Odchylky po překročení $P = 0,65$ jsou pravděpodobně způsobeny degenerací Kelvinovy buňky. Při ní dochází ke zvětšení průměru trámečku, buňka se postupně uzavírá, až připomíná uzavřený pór (viz obr. 3.13).

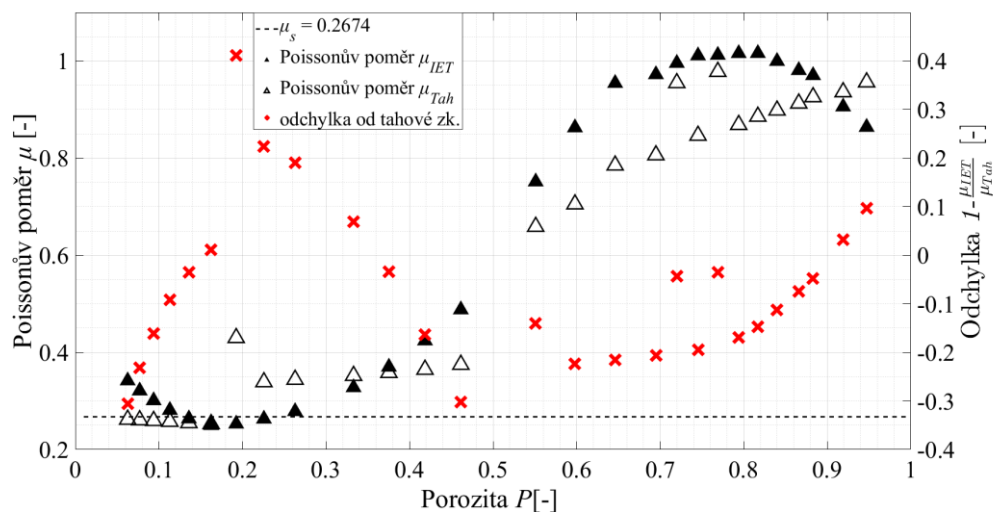
S největší odchylkou modulů pružnosti ve smyku se můžeme setkat při porozitě $P = 0,2$. Při porovnání deformace ve směru osy Y homogenního a porézního modelu (viz obr. 3.17-3.18) je patrná nízká kvalita tohoto modelu, zvětšením tloušťky nízko-porézního modelu tento problém vyřeší (viz obr. 3.19 a tab. 3.18). Youngův modul pružnosti velkou změnu nezaznamená. Zde by bylo vhodné k určování modulu pružnosti ve smyku využít zkoušku smykem, což je nad rámec naší práce.



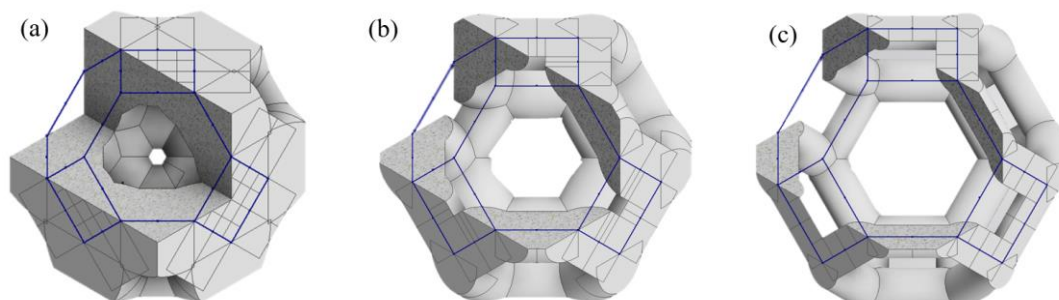
Obrázek 3.13. Porovnání relativního Youngova modulu pružnosti určeného pomocí IET se simulací tahové zkoušky: Znázornění procentuálního rozdílu těchto hodnot v závislosti na porositě tělesa.



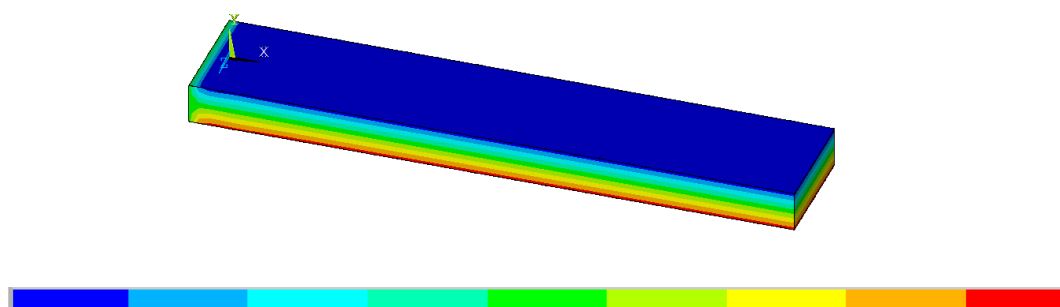
Obrázek 3.14. Porovnání relativního modulu pružnosti ve smyku určeného dle IET a ze simulace zkoušky smykem a znázornění procentuálního rozdílu těchto hodnot v závislosti na porositě tělesa.



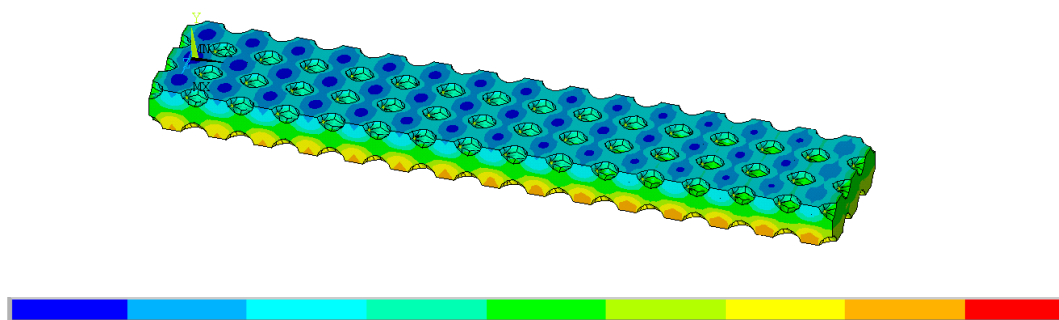
Obrázek 3.15. Porovnání Poissonova poměru určeného dle IET a ze simulace tahové zkoušky a znázornění procentuálního rozdílu těchto hodnot v závislosti na porositě tělesa.



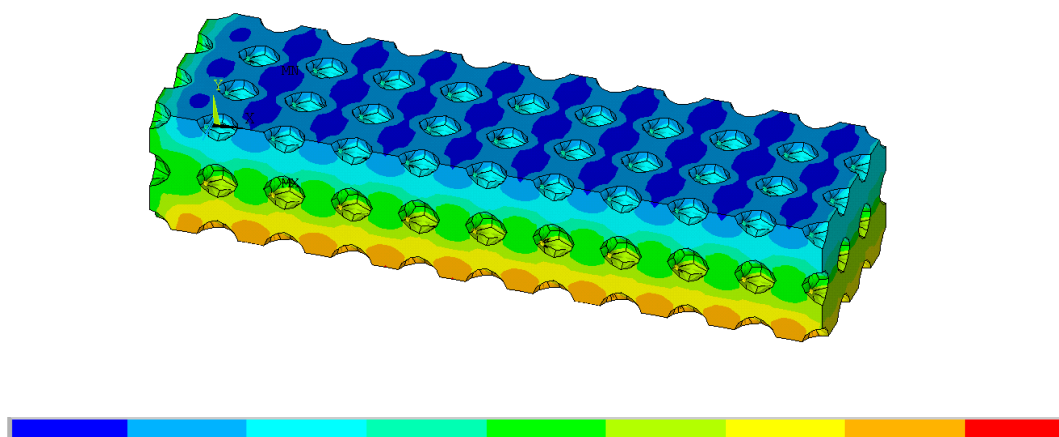
Obrázek 3.16. Kelvinova buňka o různé porositě: (a) $P = 0,2$; (b) $P = 0,65$; (c) $P = 0,85$.



Obrázek 3.17. Znázornění deformace ve směru osy Y homogenního nosníku během tahové zkoušky.



Obrázek 3.18. Znáznornění deformace ve směru osy Y porézního nosníku o tloušťce $t = 1$ a porozitě $P = 0,2$ během tahové zkoušky.



Obrázek 3.19. Znáznornění deformace ve směru osy Y rozšířeného porézního nosníku o tloušťce $t = 2$ a porozitě $P = 0,2$ během tahové zkoušky.

Tabulka 3.18 Porovnání elastických charakteristik základního trámečku o tloušťce $t = 1$ mm a rozšířeného o tloušťce $t = 2$ mm. Veličiny E a G v jednotkách [GPa], veličina μ bezrozměrná.

Model	E_{IET}	E_{tah}	G_{IET}	G_{tah}	μ_{IET}	μ_{tah}
základní	49,94	50,51	19,93	17,66	0,26	0,43
rozšířený	50,22	50,22	19,87	18,80	0,26	0,34

3.4. Srovnání výsledků výpočtového modelu s experimenty

3.4.1. Elastické vlastnosti bioaktivních sklo-keramik na bázi 45S5 Bioglass® [28]

Závislost elastických charakteristik na relativní hustotě sklo-keramik na bázi 45S5 Bioglass® byla převzata ze studie [28] (viz tab. 3.13). Obdržené porozity byly použity k vytvoření modelu o rozměrech $12 \times 3 \times 2$ a PPI 25. Porovnání experimentálních dat a simulovaných výsledů lze vidět v grafech (3.13-16), závislosti jsou proloženy křivkami dle teorie Gibsonové-Ashbyho, podobně jako v předchozích případech. Poissonův poměr vykazoval jinou závislost než tato teorie, proto byla autory k jeho proložení použita funkce (3.2) dle [35].

$$\mu^* = 0,5 - \frac{3}{4}(1 - \mu_s)(1 - P) \quad (3.2)$$

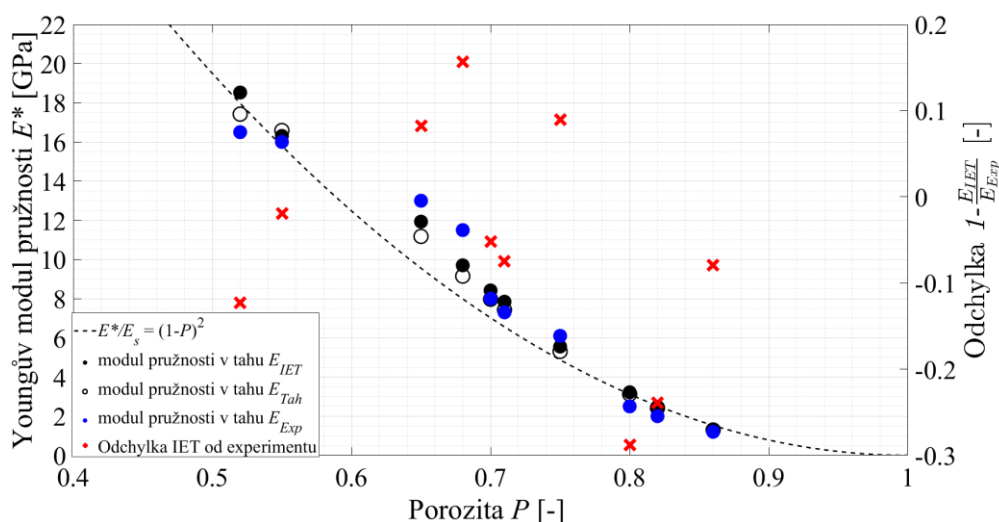
kde μ^* je Poissonův poměr porézního tělesa, μ_s je Poissonův poměr hutného tělesa a P je porozita.

Průměrná odchylka experimentálních hodnot a simulovaných výsledků Youngova modulu pružnosti je 11 %, jak u IET, tak u tahové zkoušky. Pro modul pružnosti ve smyku je průměrná odchylka 39 % u IET a 34 % u tahové zkoušky.

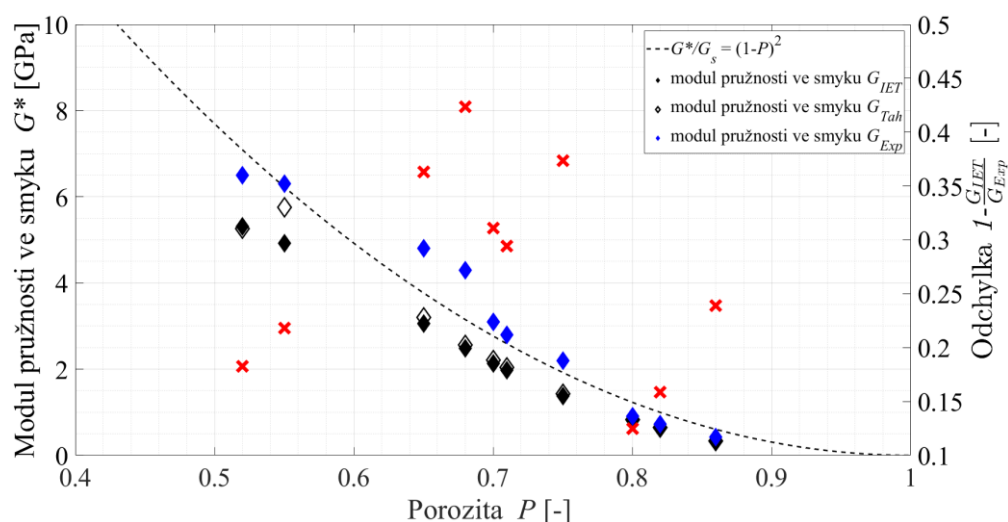
Tyto odchylky jsou způsobeny defekty ve skutečné struktuře. V případě Poissonova poměru se opět setkáváme s výraznou odchylkou.

Tabulka 3.19. Převzaté hodnoty původně naměřené Bianem a Fiumem [28].

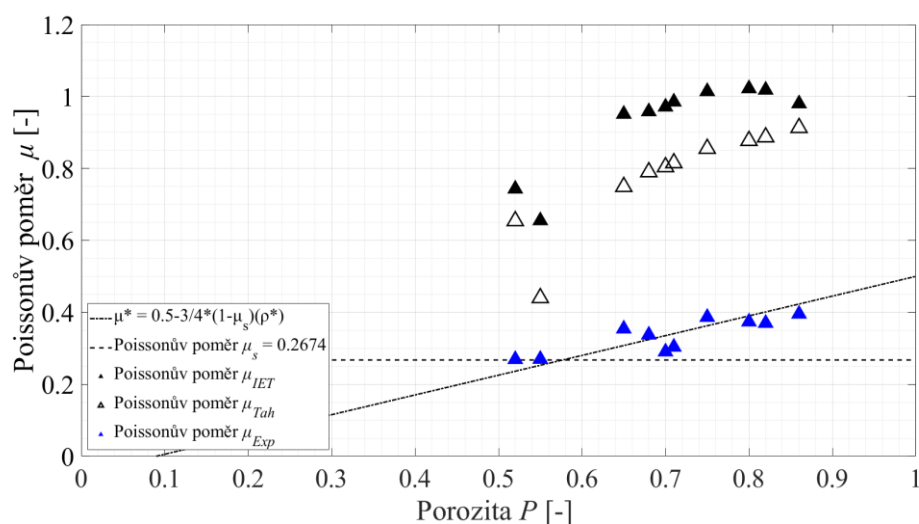
P [-]	E [GPa]	G [GPa]	μ [-]
0,86	1,2	0,43	0,3953
0,82	2,0	0,73	0,3698
0,80	2,5	0,91	0,3736
0,75	6,1	2,20	0,3863
0,71	7,3	2,80	0,3035
0,70	8,0	3,10	0,2903
0,68	11,5	4,30	0,3372
0,65	13,0	4,80	0,3541
0,55	16,0	6,30	0,2698
0,52	16,5	6,50	0,2692



Obrázek 3.20. Závislost Youngova modulu pružnosti na porozitě – porovnání výstupů výpočtového modelu a experimentálně naměřených hodnot (pro materiál 45S5 Bioglass®).



Obrázek 3.21. Závislost modulu pružnosti ve smyku na porozitě – porovnání výstupů výpočtového modelu a experimentálně naměřených hodnot (pro materiál 45S5 Bioglass®).



Obrázek 3.22. Závislost Poissonova poměru na porozitě – porovnání výstupů výpočtového modelu a experimentálně naměřených hodnot (pro materiál 45S5 Bioglass®).

3.4.2. Elastické charakteristiky keramické pěny z materiálu Vukopor®A [22]

V Řehořkově práci [22] byla k určení elastických vlastností keramické pěny s porozitou $P = 0,85$ použita mimo jiné metoda IET. Dále byly tyto výsledky využity k vytvoření MKP modelu keramické pěnové struktury s otevřenou pórovitostí [31].

Byl vytvořen model o rozměrech $35 \times 3 \times 2$, PPI 25 a $N_{div} = 3$. Jelikož vícero modelů nebylo třeba, mohli jsme si dovolit vytvořit model výpočetně náročnější. Výsledky obou prací spolu s výsledky simulace jsou srovnávány v tabulce 3.14. Z této tabulky vyplývá, že hodnoty vypočtené zde uvedeným modelem se přibližují hodnotám dle modelu z práce (Barančík) [31]. Odchylka u Youngova modulu pružnosti nepřesahuje 5 %. U modulu pružnosti ve smyku zjištěným pomocí IET je

odchylka výrazná, ta lze vysvětlit anizotropním chováním, které je patrné z výsledků pana Barančíka.

Můžeme však vyvodit stejný závěr jako [31], kdy odchylka od reálného experimentu (Řehořek) je způsobená nejpravděpodobněji přítomností vad ve skutečném zkušebním vzorku.

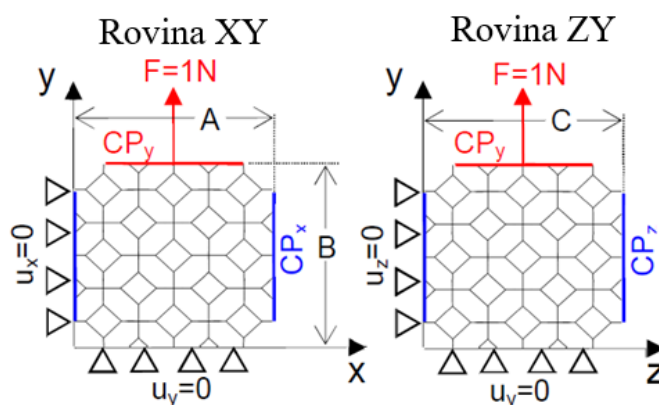
Tabulka 3.20. *Převzaté a zjištěné elastické charakteristiky modelu s $P = 0,85$ z materiálu Vukopor[®] A.*

Zdroj	E [GPa]	G [GPa]	μ [-]
Experiment (Řehořek [22])	1,56	-	-
MKP model (Barančík [31])	1,97	0,67	0,35
Tahová zkouška	2,07	0,64	0,61
IET	1,92	0,52	0,83

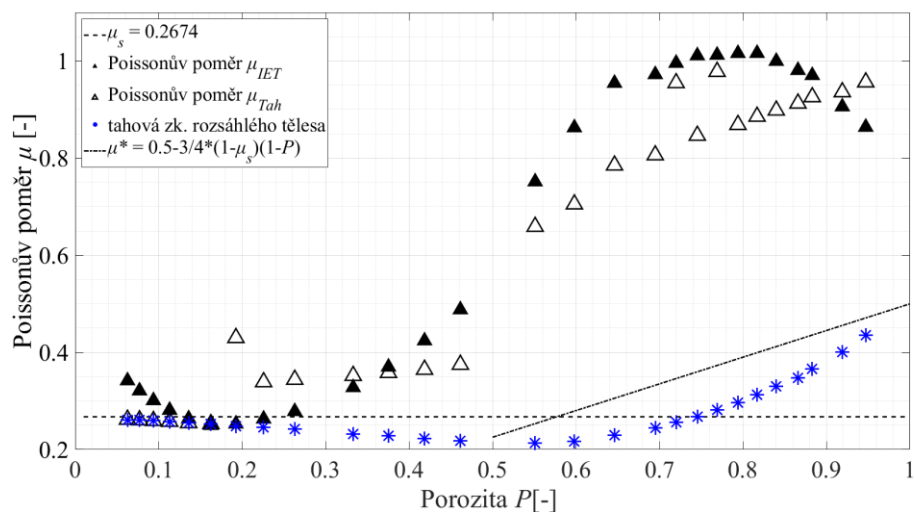
3.5. Zhodnocení výsledků a diskuse

Rozdíl mezi IET a tahovou zkouškou

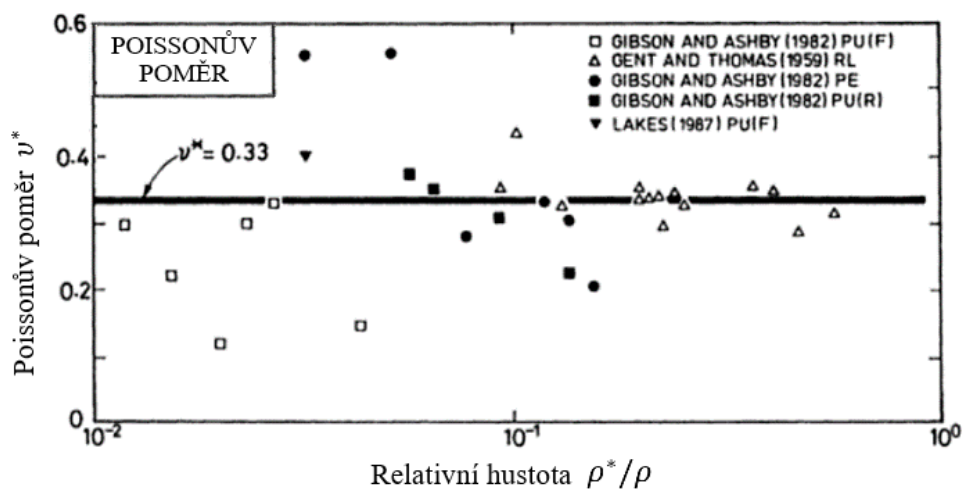
Jak už bylo řečeno, pro Youngův modul pružnosti máme dobrou shodu s teorií dle Gibsonové-Ashbyho. U modulu pružnosti ve smyku dochází k značné odchylce, zde by bylo vhodné využít zkoušku smykem, to je však nad rámec této práce. Určený Poissonův poměr se průběžně skrz oblast vysokých porozit jeví jako nerealistický. V případě tahové zkoušky je tento znatelný rozdíl průběhu Poissonova poměru pravděpodobně způsoben příliš malými modely porézních struktur a v případě IET anizotropním chováním. Hodnoty byly tedy srovnávány s modelem dostatečně velkého tělesa, u nějž se již do určených elastických charakteristik neprojeví vlivy okrajových podmínek (viz obr. 3.24), zajištěné pomocí okrajové podmínky *coupling* předepsané na boční stěny modelu (viz obr. 3.23) [34]. Tento průběh je více ve shodě s teorií Gibsonové-Ashbyho (viz obr. 3.25), kde po překročení $P = 0,75$ lze pozorovat podobné chování jako [35].



Obrázek 3.23. *Schéma okrajových podmínek rozsáhlého modelu[34].*



Obrázek 3.24. Závislost Poissonova poměru na porozitě obdržená pomocí IET, tahové zkoušky s okrajovou podmínkou vetknutí a s tahovou zkouškou s limitní tuhostí.



Obrázek 3.25. Experimentálně získané hodnoty Poissonova poměru porézních materiálů dle [2].

4. Závěr

Cílem této práce bylo ověření, zda s rostoucí porozitou materiálu (tělesa) stále platí normou definované vztahy mezi vlastními frekvencemi a elastickými charakteristikami zkušebního tělesa. V první části této práce byl vysvětlen princip impulzně excitační techniky (IET), jejíž použití pro určování elastických charakteristik homogenních materiálů je upraveno výše zmíněnou normou. Z dostupné literatury bylo zjištěno, že IET má využití i mimo podmínky normou vymezené, a to především v oblasti kompozitních a vysoce-porézních materiálů. Zde je IET ceněna pro svou rychlost a relativně nízké náklady.

Navazující část práce se věnuje analýze možnosti využití IET jako náhrady destruktivních metod pro určování elastických charakteristik vysoce-porézních materiálů s otevřenou pórovitostí. K modelování porézních struktur byla využita metoda konečných prvků (MKP), v první řadě se však musela ověřit přesnost simulace IET na homogenním tělese. Na modelech porézní struktury vytvořených z Kelvinových buněk byl následně analyzován vliv rostoucí porozity a velikosti buňky na elastické (homogenizované) charakteristiky celého modelu porézní struktury. Ty byly následně konfrontovány s teorií dle Gibsonové-Ashbyho a s převzatými experimentálními daty.

Při vyšetřování vlivu velikosti buňky na malém tělese bylo zjištěno, že zpřesnění výsledků není způsobeno samotným zmenšením buňky, nýbrž zvýšením poměru počtu buněk na délkové rozměry. Zmenšení velikosti buňky u delšího tělesa nemělo vliv na výsledné elastické charakteristiky.

Pro vyšetřování vlivu porozity byl stanoven model o minimálních rozměrech k úspoře výpočetního výkonu. Na tomto modelu byl Youngův modul pružnosti obdrženy jak z IET, tak tahové zkoušky, v dobré shodě.

Příčinou odchylek v oblasti nízkých porozit je pravděpodobně degenerace Kelvinovy buňky z otevřeného na částečně uzavřený pór. Zvětšení tloušťky modelu v místě největší odchylky ($P = 0,2$) zlepšilo shodu IET a tahové zkoušky.

Poissonův poměr se značně liší od teorie dle Gibsonové-Ashbyho, proto byly výsledky tahové zkoušky a IET dále srovnávány s tahovou zkouškou zdánlivě rozsáhlého tělesa. Toto referenční těleso vykazovalo shodu s uvedenou teorií, je tedy otázkou, zda rozměry výpočtových modelů nebyly pro tyto účely příliš malé (respektive neměli dostatečný počet buněk po výšce či šířce modelu) a dále je také otázkou, do jaké míry hraje roli anizotropní chování materiálu. To se jeví jako významnější s rostoucí porozitou.

V závěru práce byly konfrontovány výstupy výpočtových analýz s dostupnými experimentálně naměřenými elastickými charakteristikami na keramických pěnách. Jelikož nedokonalosti materiálů či různé defekty mají negativní dopad na jeho reálnou tuhost, jsou teoretické hodnoty zpravidla vyšší než hodnoty získané experimentálně.

Simulovanou IET obdržení Youngův modul pružnosti pěny z materiálu Vukopor®A o porozitě $P = 0,85$ je téměř shodný s výsledky simulace z [31]. Výsledný modul pružnosti ve smyku vykazuje značnou odchylku. K vyšetření příčiny této odchylky by bylo vhodné namáhání smykem a použití modelu o větších rozměrech, aby byl potlačen vliv okrajových podmínek a volných povrchů.

IET se tedy jeví jako dobrá metoda ke zjištění Youngova modulu pružnosti a i u vysoce porézních materiálů, pouze je potřeba počítat u vyšších porozit, pouze je potřeba počítat u vyšších porozit ($P > 0.65$) s chybou pohybující se do 10 %.

Seznam použité literatury

- [1] ROEBBEN, G., B. BOLLEN, A. BREBELS, J. VAN HUMBEECK a O. VAN DER BIEST. Impulse excitation apparatus to measure resonant frequencies, elastic moduli, and internal friction at room and high temperature. *Review of Scientific Instruments*. 1997, **68**(12), 4511-4515. ISSN 0034-6748. Dostupné z: doi:10.1063/1.1148422
- [2] GIBSON, Lorna J a M. F ASHBY. *Cellular solids: structure and properties*. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1999, xviii, 510 s. : il. ISBN 0-521-49911-9.
- [3] TAM, Jun Hui, Zhi Chao ONG, Zubaidah ISMAIL, Bee Chin ANG a Shin Yee KHOO. Identification of material properties of composite materials using nondestructive vibrational evaluation approaches: A review. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*. 2016, **24**(12), 971-986. ISSN 1537-6494. Dostupné z: doi:10.1080/15376494.2016.1196798
- [4] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu. I*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003, xii, 516 s. : il. ISBN 80-7204-283-1.
- [5] LORD, J.D, M.S LOVEDAY, M RIDES a I MCENTEGGART. *Digital tensile software evaluation: TENSTAND WP2 Report* [online]. 1st. Teddington, Middlesex, Velká Británie: National Physical Laboratory, 2004 [cit. 2021-05-12]. ISBN ISSN 1744-0262. Dostupné z: <https://eprintspublications.npl.co.uk/3224/>
- [6] REHOREK, L, I DLOUHY, Z CHLUP a L REHOREK. TENSILE BEHAVIOUR OF OPEN CELL CERAMIC FOAMS. *Ceramics-Silikaty* [online]. 2009, **53**(4), 237-241 [cit. 2021-05-06]. ISSN 0862-5468. Dostupné z: <http://search.proquest.com/docview/743773250/>
- [7] IMCE. *IMCE* [online]. Belgie [cit. 2021-05-11]. Dostupné z: <https://www.imce.eu/theory>
- [8] *ASTM E1875-20a, Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Sonic Resonance*. 2020. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2020.
- [9] SPINNER, S., T. W. REICHARD a W. E. TEFFT. A comparison of experimental and theoretical relations between Young's modulus and the flexural and longitudinal resonance frequencies of uniform bars. *Journal of Research of the National Bureau of Standards Section A: Physics and Chemistry*. 1960, **64**(2), 147-155. ISSN 0022-4332. Dostupné z: doi:10.6028/jres.064A.014
- [10] CROCKER, Malcolm J. *Handbook of noise and vibration control*. 1st. Hoboken: Wiley, 2007, xxiv, 1569 s. : il. ISBN 978-0-471-39599-7.

-
- [11] LORD, J D a J MORREL. *Measurement Good Practice Guide No. 98 Elastic Modulus Measurement*. 1st. Teddington, Middlesex, Velká Británie: National Physical Laboratory, 2007. ISBN ISSN 1744-3911. Dostupné také z: <https://eprintspublications.npl.co.uk/3782/>
- [12] CARESTA, Mauro. Vibrations of a Free-Free Beam. In: *UNSW vibration & acoustics research group* [online]. Sydney: UNSW Sydney, 2011 [cit. 2021-05-06]. Dostupné z: http://www.varg.unsw.edu.au/Assets/link%20pdfs/Beam_vibration.pdf
- [13] OTANI, Lucas Barcelos a Antônio Henrique Alves PEREIRA. *Estimation of the static modulus of elasticity of concrete using the Impulse Excitation Technique*. São Carlos, Brazílie: ATCP Physical Engineering, 2017. Dostupné z: doi:10.13140/RG.2.2.33979.41767
- [14] NIE, G., Y. BAO, D. WAN a Y. TIAN. Measurement of the high temperature elastic modulus of alumina ceramics by different testing methods. *Key Engineering Materials* [online]. Trans Tech Publications Ltd, 2018, **768**, 24-30 [cit. 2021-05-06]. ISBN 9783035711752. ISSN 10139826. Dostupné z: doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.768.24
- [15] PAOLINO, Davide S, Hanze GENG, Alessandro SCATTINA, Andrea TRIDELLO, Maria Pia CAVATORTA a Giovanni BELINGARDI. Damaged composite laminates: Assessment of residual Young's modulus through the Impulse Excitation Technique. *Composites. Part B, Engineering* [online]. Elsevier Ltd, 2017, **128**(10129), 76-82 [cit. 2021-04-28]. ISSN 1359-8368. Dostupné z: doi:10.1016/j.compositesb.2017.07.008
- [16] JOHNSON, Jeffrey J. a Michael J. VIENS. *Determination of Elastic Moduli of Fiber-Resin Composites Using an Impulse Excitation Technique - NASA-TM-104629* [online]. 1996 [cit. 2021-05-07]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/2060/19960015949>
- [17] BOURSIER NIUTTA, Carlo, Andrea TRIDELLO, Giovanni BELINGARDI a Davide Salvatore PAOLINO. Nondestructive determination of local material properties of laminated composites with the impulse excitation technique. *Composite structures* [online]. Elsevier Ltd, 2021, **262**(113607) [cit. 2021-04-28]. ISSN 0263-8223. Dostupné z: doi:10.1016/j.compstruct.2021.113607
- [18] LIMA, M.P., J.C. BIAZZON, V.A. DE ARAUJO et al. Mechanical properties evaluation of Eucalyptus grandis wood at three different heights by impulse excitation technique (IET). *BioResources* [online]. North Carolina State University, 2018, **13**(2), 3377-3385 [cit. 2021-05-07]. ISSN 19302126. Dostupné z: doi:10.15376/biores.13.2.3377-3385
- [19] BAAR, Jan, Jan TIPPNER a Peter RADEMACHER. Prediction of mechanical properties - modulus of rupture and modulus of elasticity - of five tropical species by nondestructive methods. *Maderas. Ciencia y tecnología*. 2015, (), 0-0. ISSN 0718-221X. Dostupné z: doi:10.4067/S0718-221X2015005000023

-
- [20] MAZEL, Vincent a Pierre TCHORELOFF. Applicability of impulse excitation technique as a tool to characterize the elastic properties of pharmaceutical tablets: Experimental and numerical study. *International journal of pharmaceutics* [online]. Elsevier B.V, 2020, **590**(119892) [cit. 2021-04-28]. ISSN 0378-5173. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijpharm.2020.119892
- [21] COLOMBO, P. a H. P. DEGISCHER. Highly porous metals and ceramics. *Materials Science and Technology*. 2013, **26**(10), 1145-1158. ISSN 0267-0836. Dostupné z: doi:10.1179/026708310X12756557336157
- [22] ŘEHOŘEK, Lukáš. *Mechanická odezva pěnových keramických materiálů*. Brno, 2012, 157 s. : il. (některé barev.) + 1 CD-ROM. Disertace (Ph.D.). Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav materiálových věd a inženýrství. Vedoucí práce Dlouhý, Ivo.
- [23] SURYA KIRAN, M Phani, I BALASUNDAR, K GOPINATH a T RAGHU. Parametric study on factors influencing the stiffness of honeycomb sandwich panels using impulse excitation technique. *Journal of Sandwich Structures and Materials*. 2019, **21**(1), 115-134. ISSN 1099-6362. Dostupné z: doi:10.1177/1099636216686649
- [24] DHARA, Santanu a Parag BHARGAVA. Influence of Slurry Characteristics on Porosity and Mechanical Properties of Alumina Foams. *International Journal of Applied Ceramic Technology* [online]. Malden, USA: Blackwell Publishing Inc, 2006, **3**(5), 382-392 [cit. 2021-05-12]. ISSN 1546-542X. Dostupné z: doi:10.1111/j.1744-7402.2006.02098.x
- [25] OLIVEIRA, F.A. Costa. Elastic moduli of open-cell cordierite foams. *Journal of non-crystalline solids* [online]. Elsevier B.V, 2005, **351**(19), 1623-1629 [cit. 2021-05-12]. ISSN 0022-3093. Dostupné z: doi:10.1016/j.jnoncrysol.2005.04.051
- [26] PABST, Willi, Eva GREGOROVÁ, Tereza UHLÍŘOVÁ, Anna MUSILOVÁ a Zuzana ANDELOVÁ. Elastic Properties of Porous Alumina, Zirconia and Composite Ceramics. In: *Key Engineering Materials* [online]. Švýcarsko: Trans Tech Publications, 2014, , s. 618-621 [cit. 2021-05-12]. ISBN 9783037859346. ISSN 1013-9826. Dostupné z: doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.592-593.618
- [27] PSIUK, Bronisław, Paulina WIECINSKA, Barbara LIPOWSKA, Emilia PIETRZAK a Jacek PODWÓRNY. Impulse Excitation Technique IET as a non-destructive method for determining changes during the gelcasting process. *Ceramics international* [online]. Elsevier Ltd, 2016, **42**(3), 3989-3996 [cit. 2021-05-12]. ISSN 0272-8842. Dostupné z: doi:10.1016/j.ceramint.2015.11.067
- [28] BAINO, F a E FIUME. Elastic Mechanical Properties of 45S5-Based Bioactive Glass-Ceramic Scaffolds. *Materials* [online]. MDPI, 2019, **12**(19) [cit. 2021-05-12]. ISSN 19961944. Dostupné z: doi:10.3390/ma12193244

-
- [29] GRABENHORST, Joern, Bruno LUCHINI, Jens FRUHSTORFER et al. Influence of the measurement method and sample dimensions on the Young's modulus of open porous alumina foam structures. *Ceramics international* [online]. Elsevier Ltd, 2019, **45**(5), 5987-5995 [cit. 2021-05-07]. ISSN 0272-8842. Dostupné z: doi:10.1016/j.ceramint.2018.12.069
- [30] BARANČÍK, Milan. *Homogenizace pěnové struktury s otevřenou pórovitostí pomocí Kelvinovy buňky*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2015, 42 listy + 1 CD-ROM. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Vedoucí práce Ing. Petr Skalka, Ph.D.
- [31] BARANČÍK, Milan. *Stanovení mechanických vlastností keramické pěnové struktury s otevřenou pórovitostí metodou konečných prvků*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2017, 75 stran + 1 CD-ROM. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Vedoucí práce Ing. Petr Skalka, Ph.D.
- [32] PAPŠÍK, Roman. *Výpočtová analýza vlivu výrobních defektů na porušení keramické pěny při mechanickém zatížení*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2019. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Vedoucí práce Ing. Oldřich Ševeček, Ph.D.
- [33] BUCHER, Tizian, Christopher BOLGER, Min ZHANG, Chang Jun CHEN a Y. Lawrence YAO. Effect of Geometrical Modeling on Prediction of Laser-Induced Heat Transfer in Metal Foam. *Procedia Manufacturing*. 2016, **5**, 1265-1282. ISSN 23519789. Dostupné z: doi:10.1016/j.promfg.2016.08.099
- [34] ŠEVEČEK, Oldřich, Petr NAVRÁTIL, Roman PAPŠÍK, Petr SKALKA a Michal KOTOUL. Influence of the Ceramic Foam Structure Irregularity on the Tensile Response. *Solid State Phenomena*. 2016, **258**, 161-164. ISSN 1662-9779. Dostupné z: doi:10.4028/www.scientific.net/SSP.258.161
- [35] ARNOLD, M., A. R. BOCCACCINI a G. ONDRACEK. Prediction of the Poisson's ratio of porous materials. *Journal of Materials Science*. 1996, **31**(6), 1643-1646. ISSN 0022-2461. Dostupné z: doi:10.1007/BF00357876

Seznam obrázků a tabulek

Obrázek 2.1. Kategorizace metod určování elastických charakteristik [3].	3
Obrázek 2.2. Smluvní diagram napětí-deformace [4].	4
Obrázek 2.3. Vliv odchylky Youngova modulu pružnosti na ostatní parametry [5].	5
Obrázek 2.4. Schéma uložení křehkého materiálu za pomoci hliníkových kalíšků a adhezivního přípravku [6].	5
Obrázek 2.5. Rozměry nosníkového zkušební vzorku s obdélníkovým příčným průřezem.	7
Obrázek 2.6. Základní vibrační módy nosníkového zkušební vzorku. Vlevo základní ohybový mód, vpravo základní torzní mód.	7
Obrázek 2.7. Střednice nosníkového tělesa pro dané vibrační módy [12].	8
Obrázek 2.8. Zkroucení nosníku při prvních čtyřech torzních frekvencích.	8
Obrázek 2.9. Poměrné vzdálenosti od konce pro měření konkrétních vlastních frekvencí [8].	9
Obrázek 2.10. a) Schéma nastavení aparatury pro určení základní ohybové frekvence, b) měřicí zařízení Sonelastic® s betonovým válcem [13].	10
Obrázek 2.11. Schéma měření IET za vysokých teplot. (1) Automatické buzení, (2) pec, (3) zkušební vzorek, (4) podpory, (5) termočlánek, (6) hliníková trubka, (7) mikrofón, (8) zesilovač signálu, (9) analyzátor frekvencí, (10) monitor [14].	11
Obrázek 2.12. Porovnání intenzity zvukového signálu pro různé teploty měření. (a) Pokojová teplota, (b) 800 °C, (c) 1200 °C [14].	11
Obrázek 2.13 První tři módy frekvence pilulky [20].	13
Obrázek 2.14. Příklady porézních struktur: (a) hliníková slitina obsahující částice SiC (přímé pění); (b) pěna z Al ₂ O ₃ (replikace); (c) pěna z Al ₂ O ₃ (freeze- casting); (d) extruze voštinové struktury na bázi Mg ₂ Al ₄ Si ₅ O ₁₈ ; (e) kostra z Al ₂ O ₃ ; (f) tetraedrální mřížka plechu AW6061; (g) svázaná vlákna z nerezové oceli; (h) syntetická pěna z metalického skla s uhlíkovými mikro kuličkami [21].	13
Obrázek 2.15. Struktura keramické pěny Vukopor® A, 60 PPI (vlevo) a 10 PPI (vpravo) [22].	14
Obrázek 2.16. Elementární buňka porézního materiálu s otevřenou pórovitostí dle Gibsonové-Ashbyho vlevo, ohyb hrany buňky vpravo [2].	15
Obrázek 3.1. Schématické znázornění okrajových podmínek aplikovaných na homogenní nosníkový model za účelem simulování tahové zkoušky.	17
Obrázek 3.2. Znázornění deformace homogenního a porézního modelu.	17
Obrázek 3.3. Model Kelvinovy buňky o porozitě $P=0,85$, výšce H a průměru trámečku D_s .	18
Obrázek 3.4. Porovnání (a) skutečné porézní struktury s (b) modelem sestaveným z Kelvinových buněk [33].	18
Obrázek 3.5 Schématické znázornění okrajových podmínek aplikovaných na porézní nosníkový model za účelem simulování tahové zkoušky	18
Obrázek 3.6. Závislost porozity jednotkové buňky na průměru trámečku.	19
Obrázek 3.7. Ukázka jemnosti sítě trámečku. Vlevo $N_{div} = 2$, vpravo $N_{div} = 10$.	21
Obrázek 3.8. Závislost elastických charakteristik, obdržených z vlastních frekvencí modelu (metodika pro IET), na délce porézního tělesa.	21

Obrázek 3.9. Závislost elastických charakteristik obdržených pomocí tahové zkoušky na délce porézního tělesa.	22
Obrázek 3.10. Vliv porozity tělesa na Youngův modul pružnosti určený z modálních charakteristik modelu (dle normy pro IET).	25
Obrázek 3.11. Vliv porozity na modul pružnosti ve smyku určený z modálních charakteristik modelu (dle normy pro IET).	25
Obrázek 3.12. Vliv porozity na Poissonův poměr určený z modálních charakteristik modelu (dle normy pro IET).	25
Obrázek 3.13. Porovnání relativního Youngova modulu pružnosti určeného pomocí IET se simulací tahové zkoušky: Znázornění procentuálního rozdílu těchto hodnot v závislosti na porozitě tělesa.	28
Obrázek 3.14. Porovnání relativního modulu pružnosti ve smyku určeného dle IET a ze simulace zkoušky smykem a znázornění procentuálního rozdílu těchto hodnot v závislosti na porozitě tělesa.	28
Obrázek 3.15. Porovnání Poissonova poměru určeného dle IET a ze simulace tahové zkoušky a znázornění procentuálního rozdílu těchto hodnot v závislosti na porozitě tělesa.	29
Obrázek 3.16. Kelvinova buňka o různé porozitě: (a) $P = 0,2$; (b) $P = 0,65$; (c) $P = 0,85$	29
Obrázek 3.17. Znázornění deformace ve směru osy Y homogenního nosníku během tahové zkoušky.	29
Obrázek 3.18. Znázornění deformace ve směru osy Y porézního nosníku o tloušťce $t = 1$ a porozitě $P = 0,2$ během tahové zkoušky.	30
Obrázek 3.19. Znázornění deformace ve směru osy Y rozšířeného porézního nosníku o tloušťce $t = 2$ a porozitě $P = 0,2$ během tahové zkoušky.	30
Obrázek 3.20. Závislost Youngova modulu pružnosti na porozitě – porovnání výstupů výpočtového modelu a experimentálně naměřených hodnot (pro materiál 45S5 Bioglass®).	31
Obrázek 3.21. Závislost modulu pružnosti ve smyku na porozitě – porovnání výstupů výpočtového modelu a experimentálně naměřených hodnot (pro materiál 45S5 Bioglass®).	32
Obrázek 3.22. Závislost Poissonova poměru na porozitě – porovnání výstupů výpočtového modelu a experimentálně naměřených hodnot (pro materiál 45S5 Bioglass®).	32
Obrázek 3.23. Schéma okrajových podmínek limitně tuhého tělesa [34].	33
Obrázek 3.24. Závislost Poissonova poměru na porozitě obdržená pomocí IET, tahové zkoušky s okrajovou podmínkou vetknutí a s tahovou zkouškou s limitní tuhostí.	34
Obrázek 3.25. Experimentálně získané hodnoty Poissonova poměru porézních materiálů dle [2].	34
Tabulka 2.1. Kategorizace možných aplikací IET [7].	6
Tabulka 2.2. Výhody a nevýhody IET a tahové zkoušky.	12
Tabulka 3.1. Elastické charakteristiky a hustota modelů.	16
Tabulka 3.2. Doplnující vstupní parametry modelů AL35 a BL10.	16
Tabulka 3.3. Porovnání výsledků IET a tahové zkoušky pro modely AL20 a BL10.	17
Tabulka 3.4. Počet pórů na palec pro dané výšky buňky.	19

Tabulka 3.5. Vstupní parametry modelu určujícího vliv jemnosti sítě	20
Tabulka 3.6. Závislost vypočteného Youngova modulu pružnosti na velikosti použitých prvků.	21
Tabulka 3.7. Vliv šířky modelu na elastické charakteristiky určené z vlastních frekvencí modelu (dle normy pro IET).....	23
Tabulka 3.8. Vliv šířky modelu na elastické charakteristiky obdržené za pomoci tahové zkoušky.....	23
Tabulka 3.9 Porovnání elastických charakteristik při zvětšení zkušebního tělesa. Veličiny E a G v jednotkách [GPa], veličina μ bezrozměrná.....	23
Tabulka 3.10. Vliv velikosti buňky na elastické charakteristiky obdržené za pomoci IET, těleso o délce $L = 6$ mm.	24
Tabulka 3.11. Vliv velikosti buňky na elastické charakteristiky obdržené za pomoci tahové zkoušky, těleso o délce $L = 12$ mm.	24
Tabulka 3.12. Závislost Youngova modulu pružnosti na velikosti buňky u krátkého modelu ($L = 6$). Veličiny E a G v jednotkách [GPa], veličina μ bezrozměrná.	26
Tabulka 3.13. Závislost modulu pružnosti ve smyku na velikosti buňky u krátkého modelu ($L = 6$). Veličiny E a G v jednotkách [GPa], veličina μ bezrozměrná.	26
Tabulka 3.14. Závislost Poissonova poměru na velikosti buňky u krátkého modelu ($L = 6$). Veličiny E a G v jednotkách [GPa], veličina μ bezrozměrná.	26
Tabulka 3.15. Závislost Youngova modulu pružnosti na velikosti buňky u prodlouženého modelu ($L = 12$). Veličiny E a G v jednotkách [GPa], veličina μ bezrozměrná.....	27
Tabulka 3.16. Závislost modulu pružnosti ve smyku na velikosti buňky u prodlouženého modelu ($L = 12$). Veličiny E a G v jednotkách [GPa], veličina μ bezrozměrná.....	27
Tabulka 3.17. Závislost Poissonova poměru na velikosti buňky u prodlouženého modelu ($L = 12$). Veličiny E a G v jednotkách [GPa], veličina μ bezrozměrná.	27
Tabulka 3.18. Porovnání elastických charakteristik základního trámečku o tloušťce $t = 1$ mm a rozšířeného o tloušťce $t = 2$ mm. Veličiny E a G v jednotkách [GPa], veličina μ bezrozměrná.....	30
Tabulka 3.19. Převzaté hodnoty původně naměřené Bianem a Fiumem [28].	31
Tabulka 3.20. Převzaté a zjištěné elastické charakteristiky modelu s $P = 0,85$ z materiálu Vukopor [®] A.	33

Seznam použitých zkratk a symbolů

u_x, u_y, u_z	posuv v dané ose
ε_1 [-]	délkové přetvoření v příčném směru
$\varepsilon_{2,3}$ [-]	délkové přetvoření v podélném směru
μ^* [-]	Poissonův poměr porézního tělesa
μ_{IET} [-]	Poissonův poměr zjištěn pomocí IET
μ_s [-]	Poissonův poměr hutného tělesa
μ_s [-]	Poissonův poměr hutného tělesa
μ_{tah} [-]	Poissonův poměr zjištěn tahovou zkouškou
ρ^* [$kg\ m^{-3}$]	hustota porézního tělesa
ρ_{rel} [-]	relativní hustota porézního tělesa
ρ_s [$kg\ m^{-3}$]	hustota hutného tělesa
α [K^{-1}]	teplotní součinitel délkové roztažnosti
ε [-]	poměrné délkové přetvoření
μ [-]	Poissonův poměr
ρ [$kg\ m^{-3}$]	hustota
σ [GPa]	normálové napětí
ϑ [rad]	natočení nosníku
A, B [-]	korekční faktory modulu pružnosti ve smyku
A_{L20}, B_{L10}	označení homogenních modelů
b [mm]	šířka zkušební vzorku
C_1 [-]	konstanta úměrnosti Youngova modulu pružnosti
C_2 [-]	konstanta úměrnosti modulu pružnosti ve smyku
C_3 [-]	konstanta Poissonova poměru
c_p [$J\ kg^{-1}\ K^{-1}$]	měrná tepelná kapacita při konstantním tlaku
D_s [mm]	průměr trámečku
E [GPa]	Youngův modul pružnosti

E^* [GPa]	Youngův modul pružnosti porézního tělesa
E_{ad} [GPa]	Youngův modul pružnosti za adiabatických podmínek při vysokých rychlostech (frekvencích) zatěžování
E_{IET} [GPa]	Youngův modul pružnosti zjištěn pomocí IET
E_{iz} [GPa]	Youngův modul pružnosti za izotermických podmínek při pomalé rychlosti zatěžování
E_s [GPa]	Youngův modul hutného tělesa
E_{tah} [GPa]	Youngův modul pružnosti zjištěn tahovou zkouškou
Em_{size} [mm]	velikost elementu
f_f [Hz]	základní ohybová frekvence
f_t [Hz]	základní torzní frekvence
G [GPa]	modul pružnosti ve smyku
G^* [GPa]	modul pružnosti ve smyku porézního tělesa
G_{IET} [GPa]	modul pružnosti ve smyku zjištěn pomocí IET
G_s [GPa]	modul pružnosti ve smyku hutného tělesa
G_{tah} [GPa]	modul pružnosti ve smyku zjištěn tahovou zkouškou
H [mm]	výška buňky
IET	impulzová excitační technika (angl. impulse excitation technique)
J_p [mm ⁴]	polární kvadratický moment příčného průřezu
J_z [mm ⁴]	osový kvadratický moment příčného průřezu
L [mm]	délka zkušební vzorku
m [kg]	hmotnost zkušební vzorku
N_{div} [-]	počet elementů na trámeček
NDT	nedestruktivní metody (angl. <i>non-destructive testing</i>)
P [-]	porozita

PPI	počet pórů na palec (angl. <i>pores per inch</i>)
$S [m^2]$	plocha příčného průřezu
$t [mm]$	tloušťka zkušebního vzorku
$T [K]$	absolutní hodnotě
$T_1 [-]$	korekční faktor Youngova modulu pružnosti
$y [mm]$	průhyb nosníku