



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A
BIOMECHANIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND
BIOMECHANICS

HOMOGENIZACE PĚNOVÉ STRUKTURY S OTEVŘENOU PÓROVITOSTÍ POMOCÍ KELVINOVY BUŇKY

HOMOGENIZATION OF OPEN FOAM STRUCTURES USING KELVIN CELL

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MILAN BARANČÍK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. PETR SKALKA, Ph.D.

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky

Akademický rok: 2014/15

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Milan Barančík

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Základy strojního inženýrství (2341R006)**

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:

Homogenizace pěnové struktury s otevřenou pórovitostí pomocí Kelvinovy buňky

v anglickém jazyce:

Homogenization of open foam structures using Kelvin cell

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Výpočtové modelování pěnových struktur, na diskrétní úrovni, klade velké požadavky na hardware, a je velmi časově náročné. Z uvedených důvodů, které mnohdy brání v realizaci výpočtového modelování pěnových struktur, se diskrétní výpočtové modely převádí na výpočtové modely kontinua s odpovídajícími materiálovými charakteristikami. Tyto charakteristiky získáme homogenizací diskrétní pěnové struktury.

Cíle bakalářské práce:

- Provedení rešeršní studie
- Vytvoření výpočtového modelu Kelvinovy buňky
- Vytvoření výpočtového modelu pěnové struktury s otevřenou pórovitostí
- Provedení homogenizace pěnové struktury
- Parametrická studie vlivu charakteristických rozměrů Kelvinovy buňky na materiálové charakteristiky
- Zhodnocení dosažených výsledků

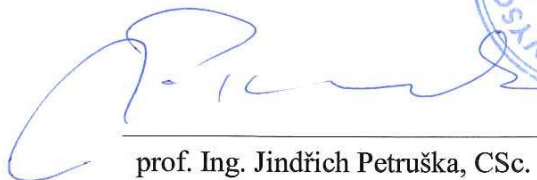
Seznam odborné literatury:

- Lorna J. Gibson, Michael F. Ashby: Cellular Solids - Structure and properties, Cambridge University Press, 1997
- C. Barry Carter, M. Grant Norton: Ceramic Materials - Science and Engineering, Springer Science, 2013
- Sia Nemat-Nasser, Muneo Hori: Micromechanics - overall properties of heterogeneous materials, 1998

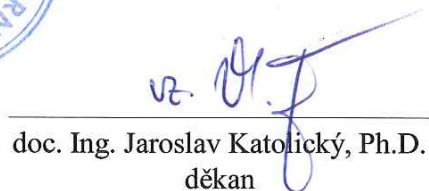
Vedoucí bakalářské práce: Ing. Petr Skalka, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/15.

V Brně dne 21. 11. 2014



prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu



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

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá homogenizací pěnové struktury s otevřenou pórovitostí pomocí Kelvinovy buňky. V programu ANSYS byl vytvořen výpočtový model pěnové struktury a převeden na výpočtový model kontinua s odpovídajícími materiálovými charakteristikami. Následně byla provedena parametrická studie vlivu charakteristických rozměrů Kelvinovy buňky na materiálové charakteristiky kontinua. Výstupem studie bylo zobecnění závislosti materiálových charakteristik kontinua na charakteristických rozměrech Kelvinovy buňky. Na závěr byla ověřena vhodnost tohoto zobecnění a zhodnoceny dosažené výsledky.

KLÍČOVÁ SLOVA

pěnová struktura s otevřenou pórovitostí, Kelvinova buňka, MKP, ANSYS

ABSTRACT

The bachelor thesis deals with homogenization of open foam structures using Kelvin cell. A computational model of the foam structure was created and converted into a computational model of solid with corresponding material characteristics in ANSYS software. Subsequently, a parametric study of the effect of Kelvin cell proportions on solid material characteristics was done. The output of the study was a generalization of the dependence of solid material characteristics on Kelvin cell proportions. Lastly, the suitability of the generalization was verified and achievements were evaluated.

KEYWORDS

open foam structures, Kelvin cell, FEM, ANSYS

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BARANČÍK, M. *Homogenizace pěnové struktury s otevřenou pórovitostí pomocí Kelvinovy buňky*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 42 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Petr Skalka, Ph.D..

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Petra Skalky, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 25. května 2015

.....

Milan Barančík

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval mému vedoucímu Ing. Petru Skalkovi, Ph.D. za jeho snahu, odborný dohled a vedení v průběhu vypracování bakalářské práce. Zvláště chci poděkovat svým nejbližším, kteří mi jakýmkoliv způsobem pomáhali a podporovali mě.

OBSAH

Úvod.....	10
1 Formulace problému	11
2 Cíle řešení	12
3 Rešeršní studie.....	13
3.1 Porézní keramické materiály	13
3.1.1 Struktura a rozdělení porézních materiálů.....	13
3.1.2 Vlastnosti keramických materiálů	14
3.1.3 Metody přípravy a využití porézních keramických materiálů	14
3.2 Charakteristické rozměry buňky porézní struktury	15
4 Analýza typu problému.....	16
5 Výpočtové modelování.....	17
5.1 Model geometrie	17
5.1.1 Model geometrie diskrétní struktury	17
5.1.2 Model geometrie kontinua.....	19
5.2 Model materiálových vlastností	20
5.2.1 Model materiálu diskrétní struktury	20
5.2.2 Model materiálu kontinua.....	20
5.3 Model okrajových podmínek	21
5.3.1 Okrajové podmínky diskrétní struktury.....	21
5.3.2 Okrajové podmínky kontinua	22
5.4 Model zatížení.....	23
5.4.1 Model zatížení diskrétní struktury.....	23
5.4.2 Model zatížení kontinua	23
6 Realizace algoritmu řešení.....	24
7 Prezentace a analýza výsledků	25
7.1 Diskrétní struktura s <i>Kelvinovou buňkou H0,5–D0,05</i>	25
7.1.1 Porovnání posuvu diskrétní struktury a kontinua	25
7.1.2 Analýza vlivu velikosti vzorku diskrétní struktury na materiálové charakteristiky kontinua.....	26
7.2 Nejtužší a nejpoddajnější varianta diskrétní struktury.....	28
7.3 Výsledky homogenizace všech variant diskrétní struktury.....	31
7.4 Zobecnění závislosti materiálových charakteristik kontinua na charakteristických rozměrech Kelvinovy buňky	33
Závěr	37

Seznam použitých zkratek a symbolů.....	39
Seznam obrázků.....	40
Seznam tabulek	41
Seznam příloh	42

ÚVOD

V poslední době jsou na materiály kladeny vysoké požadavky (zejména vysoká pevnost a tuhost při nízké hmotnosti). Podmínku nízké relativní hmotnosti splňují porézní materiály, které jsou tvořeny nosným materiálem s vysokým obsahem pórů. Zvýšený zájem o porézní materiály však není dán jenom nízkou relativní hmotností, ale jsou vyhledávány také pro jejich vysokou propustnost, velkou povrchovou plochu nebo tepelnou izolační schopnost. To vše jsou důvody, proč porézní materiály nalézají uplatnění v širokém pásmu oborů a technických aplikací [1, 6].

V úvodních kapitolách je formulována problémová situace a cíle řešení, kterých má tato práce dosáhnout. Rešeršní studie shrnuje základní rozdělení porézních materiálů, jejich vlastnosti a využití. V rešerši jsou také uvedena experimentálně získaná data [2], ze kterých práce vychází. Dále se práce zaměřuje na vytvoření výpočtového modelu pěnové struktury s otevřenou pórovitostí pomocí Kelvinovy buňky a homogenizaci této struktury pomocí metody konečných prvků v programu ANSYS. Závěrem byla provedena analýza vlivu charakteristických rozměrů Kelvinovy buňky na materiálové charakteristiky kontinua a shrnuty dosažené výsledky.

1 FORMULACE PROBLÉMU

Struktura porézního materiálu je tvořena buňkami, které se v materiálu opakují. Jejich rozměry jsou mnohokrát menší než rozměry zkušební vzorku, který tvoří makroskopický celek porézního materiálu. Vysoký počet buněk tvořících porézní materiál znamená velkou členitost a tudíž složitost mikrostruktury porézního materiálu.

Vytváření výpočtového modelu pěnové struktury a jeho následná analýza tak s sebou nesou několik potíží. Tvorba modelu pěnové struktury pomocí metody konečných prvků znamená vytvořit geometrickou strukturu s velkým množstvím prvků (a tím i velkým počtem stupňů volnosti). Řešení tohoto modelu vyžaduje dlouhý výpočtový čas a klade vysoké nároky na hardware. Proto je snahou nahrazovat tyto složité struktury kontinuem, které vykazuje stejné chování jako diskrétní struktura, ale výpočtově je podstatně méně náročné.

2 CÍLE ŘEŠENÍ

Cíle této bakalářské práce byly následující:

Vytvořit výpočtový model pěnové struktury s otevřenou pórovitostí, jejíž geometrická struktura je tvořena Kelvinovou buňkou. Provést homogenizaci pěnové struktury, tzn. převést výpočtový model diskrétní struktury na výpočtový model kontinua s odpovídajícími vlastnostmi. Dále realizovat parametrickou studii vlivu charakteristických rozměrů Kelvinovy buňky na materiálové charakteristiky kontinua a zhodnotit dosažené výsledky.

3 REŠERŠNÍ STUDIE

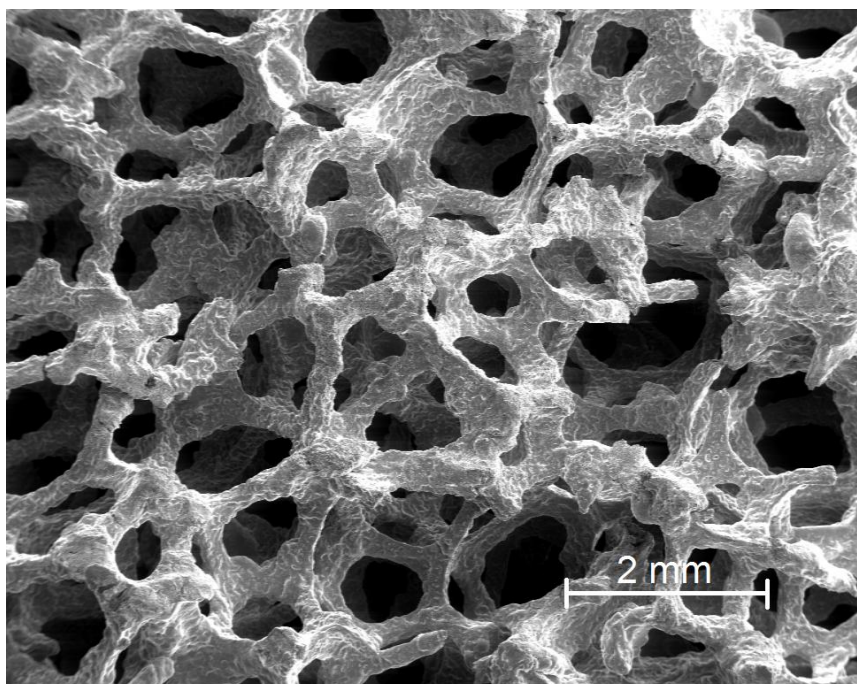
3.1 PORÉZNÍ KERAMICKÉ MATERIÁLY

3.1.1 STRUKTURA A ROZDĚLENÍ PORÉZNÍCH MATERIÁLŮ

Z hlediska této práce jsou důležitá následující rozdělení porézních materiálů. Podle typu mikrostruktury lze porézní materiály rozdělit na vláknové materiály a pěnové materiály. Mikrostruktura vláknového materiálu je tvořena navzájem spojenými vlákny nosného materiálu tvořící síť, která nevykazuje uspořádaný charakter [3].

Naopak pěnové materiály se vyznačují strukturou, která je tvořena buňkami podobných rozměrů. Každá buňka je tvořena pórem a nosným materiálem obklopujícím pór. Pokud se materiál vyskytuje pouze v okrajích buňky, pak se jedná o pěnový materiál s otevřenou pórovitostí. V případě, že jsou buňky od sebe odděleny stěnami nosného materiálu, pak jde o pěnový materiál s uzavřenou pórovitostí [3].

Tato práce se zabývá pěnovou strukturou s otevřenou pórovitostí, mikrostruktura tohoto typu materiálu je na Obrázku 3.1.



Obrázek 3.1 – Pěnová struktura s otevřenou pórovitostí [4]

3.1.2 VLASTNOSTI KERAMICKÝCH MATERIÁLŮ

Keramické materiály jsou anorganické tuhé materiály, na jejichž vlastnostech se kromě krystalické stavby významně podílí chemické složení. K výrobě keramických materiálů jsou nejčastěji používány oxidy, karbidy, boridy a nebo nitridy různých prvků, jako je hliník, hořčík, křemík, fosfor, zirkonium nebo titan. Kombinacemi těchto chemických sloučenin v keramickém materiálu lze dosáhnout vlastností jako vysoké chemické a strukturní stability, vysoké tvrdosti, odolnosti vůči opotřebení, žáru a nebo nízké tepelné a elektrické vodivosti. Keramické materiály jsou však zároveň křehké a nevykazují příliš dobré mechanické vlastnosti. Ty lze zlepšit povlakováním jinými materiály, například polymery [2, 5].

V této práci byl uvažován keramický materiál, který je komerčně známý pod názvem 45S5 Bioglass s chemickými sloučeninami SiO_2 , CaO , Na_2O a P_2O_5 [2].

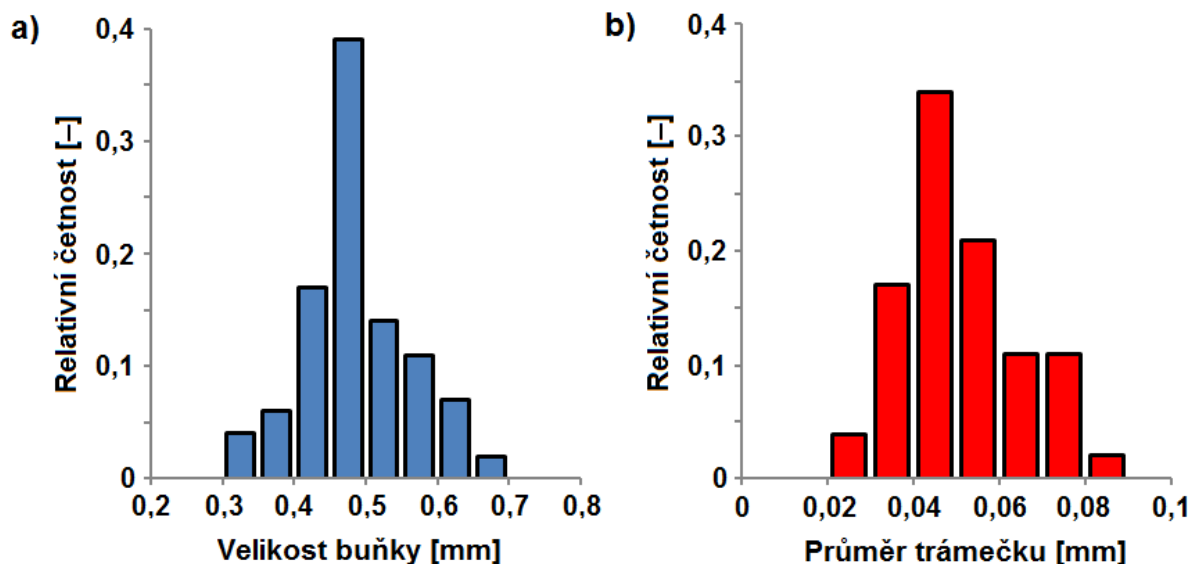
3.1.3 METODY PŘÍPRAVY A VYUŽITÍ PORÉZNÍCH KERAMICKÝCH MATERIÁLŮ

Na základě rozdílných vlastností požadovaných u porézních keramických materiálů bylo vyvinuto mnoho metod jejich přípravy. Průmyslově nejpoužívanější je replikační metoda založená na ponoření porézní polymerní pěny do keramické suspenze. Nadbytečná suspenze je odstraněna válcováním, polymer je sušením při postupném navyšování teploty extrahován a keramická pěna je následně slinována za vysokých teplot. Dále je používána metoda pění, v jejímž případě pěnová struktura vzniká vháněním vzduchu do keramické suspenze. Keramická pěna může být také vyrobena vypalováním dutých polymerních kuliček zalitých do keramické suspenze [7, 8].

V technické praxi je hlavním důvodem pro použití porézních materiálů nízká hmotnost konstrukce a ve spojení s výše uvedenými vlastnostmi nalézají porézní keramické materiály široké uplatnění. Konkrétními příklady aplikací keramických porézních materiálů jsou odlehčené nosné konstrukce, žáruvzdorné izolační materiály, tepelné a akustické izolační materiály, vysokoteplotní filtry a jiné [6].

3.2 CHARAKTERISTICKÉ ROZMĚRY BUŇKY PORÉZNÍ STRUKTURY

Tato práce vychází z experimentálně zjištěných hodnot četností výskytu buňky různých velikostí (Obrázek 3.2a) a s různými průměry trámečků (Obrázek 3.2b).



Obrázek 3.2 – Relativní četnost buňky a) různé velikosti b) různého průměru trámečku [2]

4 ANALÝZA TYPU PROBLÉMU

Homogenizace diskrétní struktury zahrnuje problém jak přímý, tak nepřímý. V případě přímého problému jsou známy vstupy (geometrie, materiálové charakteristiky, okrajové podmínky a zatížení diskrétní struktury) a hledají se výstupy (posuvy v osách x a y).

Nepřímý problém lze chápat jako iterační proces, ve kterém jsou na základě známých výstupů (posuvy v ose x a y) dohledávány vstupy (materiálové charakteristiky). Tento problém se v případě homogenizace diskrétní struktury týká kontinua. Na základě známé deformační odezvy diskrétní struktury jsou hledány materiálové charakteristiky kontinua tak, aby diskrétní struktura a kontinuum vykazovaly identické chování při zatížení.

5 VÝPOČTOVÉ MODELOVÁNÍ

V této kapitole je popsána struktura tvorby výpočtového modelu pěnové struktury pomocí Kelvinovy buňky a výpočtového modelu kontinua. Jednotlivě se tato kapitola věnuje modelu geometrie, materiálových vlastností, okrajových podmínek a zatížení.

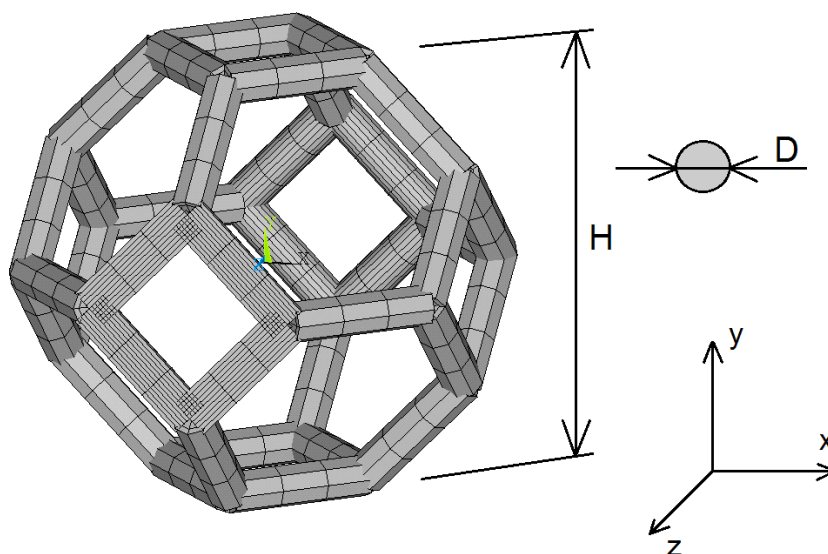
5.1 MODEL GEOMETRIE

5.1.1 MODEL GEOMETRIE DISKRÉTNÍ STRUKTURY

Reálnou podobu pěnové struktury s otevřenou pórovitostí bylo nutné převést na zjednodušený model diskrétní struktury. Nejprve byl v programu ANSYS vytvořen výpočtový model Kelvinovy buňky. Charakteristickými rozměry Kelvinovy buňky odpovídající otevřené pěnové struktuře byla velikost Kelvinovy buňky H a průměr trámečku D . Výpočtový model Kelvinovy buňky s jeho charakteristickými rozměry a zvoleným globálním souřadným systémem jsou na Obrázku 5.1.

Pro tvorbu trámečků modelu Kelvinovy buňky byl v programu ANSYS zvolen prvek BEAM189. Na výpočtovém modelu Kelvinovy buňky byla vytvořena síť konečných prvků tak, že byl každý z trámečků rozdělen na tři prvky, viz Obrázek 5.1

Z důvodu parametrické studie vlivu charakteristických rozměrů Kelvinovy buňky na materiálové charakteristiky kontinua byly na základě experimentálně zjištěných dat (Obrázek 3.2a a Obrázek 3.2b) zvoleny tři různé velikosti Kelvinovy buňky H a tři různé průměry trámečku D , viz Tabulka 5.1. Na základě této volby bylo vytvořeno devět různých variant Kelvinovy buňky.



Obrázek 5.1 – Výpočtový model Kelvinovy buňky

Tabulka 5.1 – Volba charakteristických rozměrů Kelvinovy buňky na základě experimentálně zjištěných dat [2]

Velikost buňky H [mm]	0,25	0,5	0,75
Průměr trámečku D [mm]	0,02	0,05	0,08

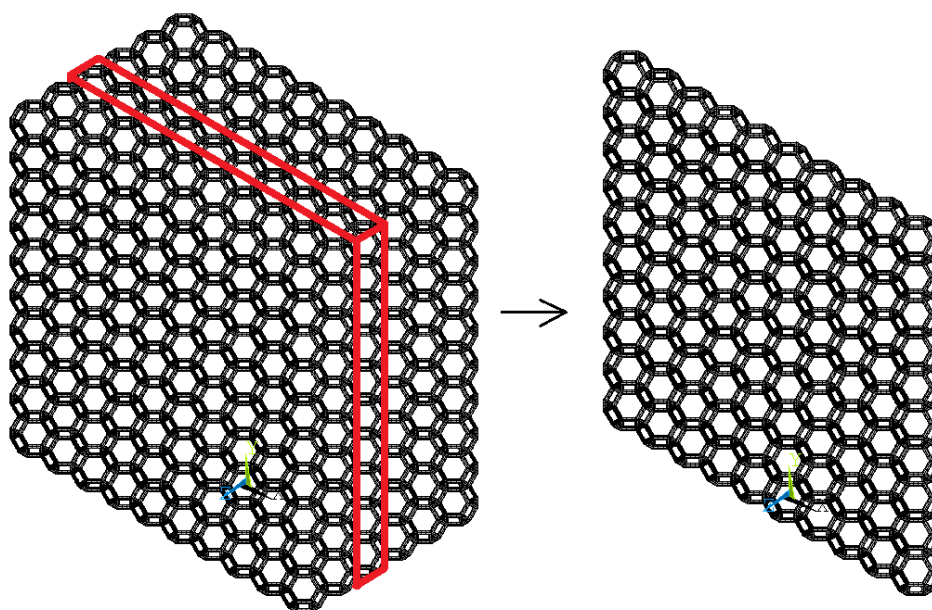
Z důvodu jednoznačného popisu výpočtových modelů diskretní struktury s různými velikostmi charakteristických rozměrů Kelvinovy buňky bylo značení vycházející z Tabulky 5.1 zvoleno následovně (demonstrováno na konkrétním příkladu):

Kelvinova buňka H0,75–D0,02

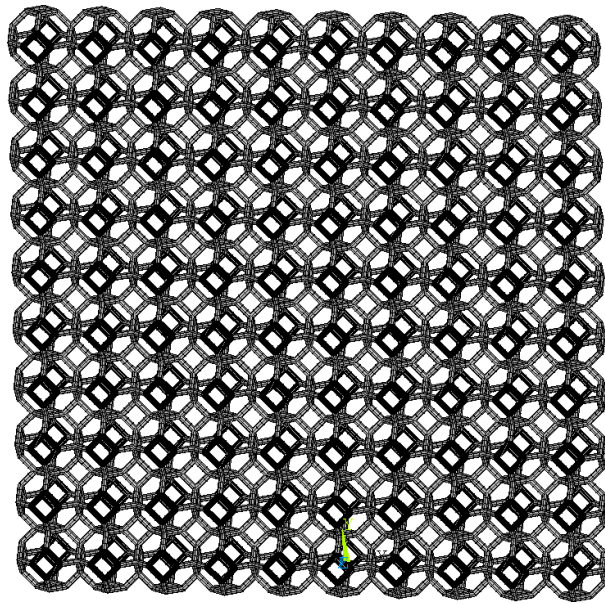
Pro názornost bude v dalších kapitolách prezentována diskretní struktura s *Kelvinovou buňkou H0,5–D0,05*, důvodem je nejvyšší relativní četnost buňky s těmito charakteristickými rozměry (Obrázek 3.2a a Obrázek 3.2b).

Z hlediska zjednodušení řešení výpočtového modelu diskretní struktury bylo využito rovinné deformace (Obrázek 5.2). Vzorek modelu diskretní struktury tak byl tvořen pouze jednou vrstvou Kelvinových buněk. Protože se na přední a zadní stěně Kelvinovy buňky nacházela rovina symetrie, byly zde vytvořeny poloviční trámečky (Obrázek 5.1). V opačném případě by tuhost trámečků byla dvojnásobná.

Označování velikosti vzorku modelu diskretní struktury bylo zvoleno následujícím způsobem: výška × šířka × tloušťka (v počtu Kelvinových buněk). Pro homogenizaci byly zvoleny následující varianty vzorků diskretní struktury: 1×1×1, 2×2×1, 4×4×1, 6×6×1, 10×10×1, 20×20×1, 40×40×1 a 100×100×1. Na Obrázku 5.3 je ukázán vzorek diskretní struktury 10×10×1.



Obrázek 5.2 – Využití rovinné deformace z důvodu zjednodušení řešení



Obrázek 5.3 – Vzorek diskrétní struktury 10×10×1

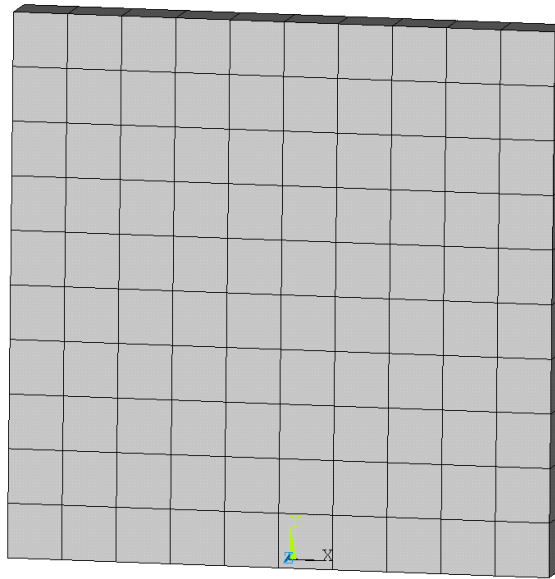
5.1.2 MODEL GEOMETRIE KONTINUA

Výpočtový model geometrie kontinua musel odpovídat výpočtovému modelu geometrie diskrétní struktury, proto byly vytvořeny vzorky kontinua, jejichž rozměry byly totožné s rozměry vzorků diskrétní struktury. Na Obrázku 5.4 je vzorek kontinua, který svými rozměry odpovídá vzorku diskrétní struktury 10×10×1.

Model kontinua byl diskretizován prvkem SOLID186. V případě vzorku kontinua na Obrázku 5.4 velikost prvku odpovídá velikosti Kelvinovy buňky diskrétní struktury.

Na kontinuu byly dohledávány tři materiálové charakteristiky. Při hledání modulu pružnosti v tahu E_{solid} a Poissonova čísla μ_{solid} byl vzorek kontinua namáhán prostým tahem. Ukázalo se, že při diskretizaci jedním prvkem kontinuum vykazovalo stejné posuvy v ose x a y jako v případě diskretizace více prvky. Z tohoto důvodu byl vzorek kontinua pokaždé diskretizován pouze jedním prvkem.

Modul pružnosti ve smyku G_{solid} byl dohledáván při zatížení smykem. V případě tohoto zatížení kontinuum nemohlo být diskretizováno jedním prvkem, protože deformační odezva tohoto prvku neuměla postihnout deformační odezvu diskrétní struktury. Z tohoto důvodu bylo kontinuum diskretizováno jemnější sítí prvků, viz Obrázek 5.4.



Obrázek 5.4 – Vzorek kontinua odpovídající diskrétní struktuře 10×10×1

5.2 MODEL MATERIÁLOVÝCH VLASTNOSTÍ

5.2.1 MODEL MATERIÁLU DISKRÉTNÍ STRUKTURY

Jak bylo v úvodních kapitolách zmíněno, nosným materiálem pěnové struktury je keramika. Z tohoto důvodu byl v případě diskrétní struktury uvažován Hookovský materiál – lineárně pružný a izotropní, který je definován modulem pružnosti v tahu $E_{\text{foam}} = 90000 \text{ MPa}$ a Poissonovým číslem $\mu_{\text{foam}} = 0,33$.

5.2.2 MODEL MATERIÁLU KONTINUA

Materiálové charakteristiky kontinua byly jako součást nepřímého problému iteračně dohledávány ze známých výstupů diskrétní struktury (posuvy v ose x a y).

V případě prvního typu zatížení (tahem–tlakem) byl uvažován Hookovský materiál – lineárně pružný a izotropní, který byl definován modulem pružnosti v tahu E_{solid} a Poissonovým číslem μ_{solid} .

V případě druhého typu zatížení (smykem) byl uvažován materiál lineární a ortotropní. Materiál kontinua byl v tomto případě definován modulem pružnosti v tahu E_{solid} a Poissonovým číslem μ_{solid} (tyto byly zjištěny homogenizací při prvním typu zatížení) a modulem pružnosti ve smyku G_{solid} (byl dohledáván).

5.3 MODEL OKRAJOVÝCH PODMÍNEK

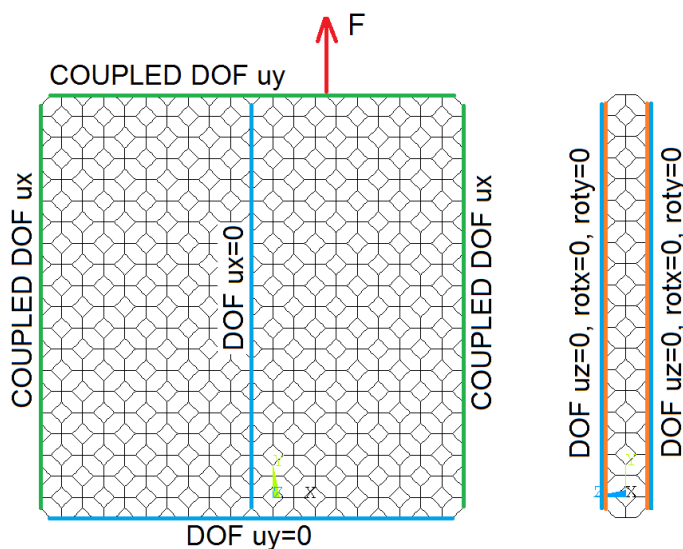
V závislosti na typu zatížení byly vytvořeny dva modely okrajových podmínek. První model okrajových podmínek vycházel ze zatížení tahem–tlakem. V tomto případě byly okrajové podmínky vytvořeny tak, aby při zatížení nevznikaly složky smykového napětí.

Druhý model okrajových podmínek vycházel ze smykového zatížení.

5.3.1 OKRAJOVÉ PODMÍNKY DISKRÉTNÍ STRUKTURY

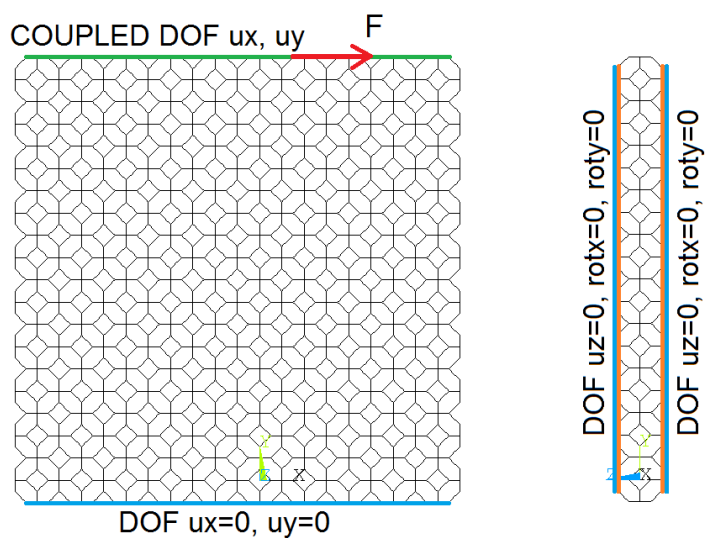
Jak už bylo výše zmíněno, pro zjednodušení výpočtového modelu diskrétní struktury byla využita rovinná deformace. Z tohoto důvodu byly na uzlech přední a zadní stěny diskrétní struktury zamezeny rotace kolem os ležících v rovinách těchto stěn, tzn. rotace kolem osy x a y , a posuv kolmý na tyto stěny, tzn. posuv v ose z . Rovinná deformace byla využita v obou modelech okrajových podmínek, proto budou už dále popsány pouze okrajové podmínky, které se rovinné deformace netýkaly.

V případě zatížení tahem–tlakem byly uzlům na spodní stěně vzorku diskrétní struktury zamezeny posuvy ve směru osy y a uzlům ve středu vzorku byly zamezeny posuvy ve směru osy x . Na krajích byly uzly svázány tak, aby v ose x při zatížení vykazovaly stejné posuvy. Uzly vrchní stěny byly svázány tak, aby byly jejich posuvy stejné v ose y . Model okrajových podmínek tohoto typu zatížení je ukázán na Obrázku 5.5.



Obrázek 5.5 – Model okrajových podmínek diskrétní struktury při zatížení tahem–tlakem

Při zatížení smykem byly uzlům ve spodní stěně vzorku diskrétní struktury zamezeny posuvy v ose x a y . Uzly vrchní stěny vzorku byly svázány tak, aby vykazovaly stejné posuvy ve směru osy x a y . Model okrajových podmínek pro zatížení smykem je na Obrázku 5.6.

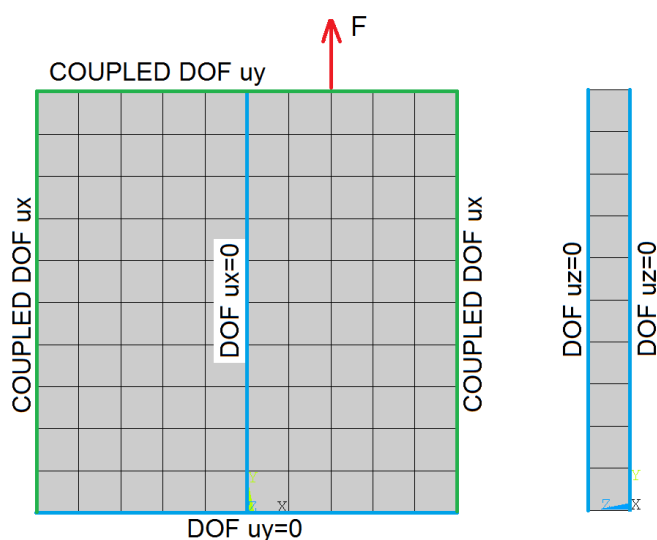


Obrázek 5.6 – Model okrajových podmínek diskrétní struktury při zatížení smykem

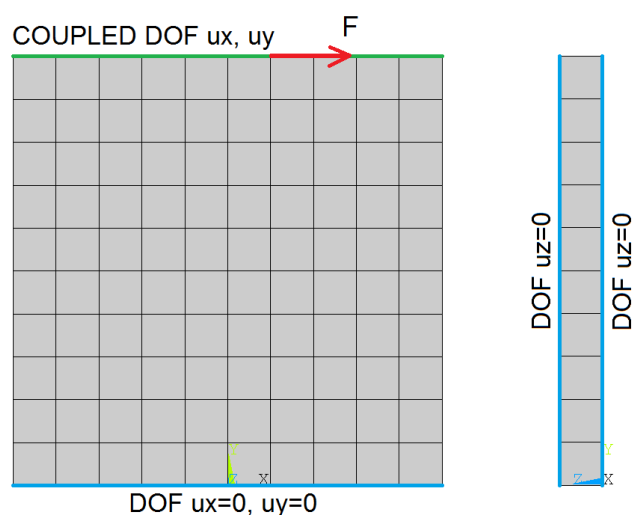
5.3.2 OKRAJOVÉ PODMÍNKY KONTINUA

Stejně jako v případě diskrétní struktury byl výpočtový model kontinua zjednodušen využitím rovinné deformace. Kontinuum bylo diskretizováno prvkem, jehož uzly mají pouze tři stupně volnosti (posuv v ose x , y a z), proto byl uzlům na přední a zadní stěně vzorku kontinua zamezen pouze posuv ve směru osy z .

Model okrajových podmínek kontinua pro zatížení tahem–tlakem je ukázán na Obrázku 5.7 a pro smykové zatížení na Obrázku 5.8.



Obrázek 5.7 – Model okrajových podmínek kontinua pro zatížení tahem–tlakem



Obrázek 5.8 – Model okrajových podmínek kontinua pro smykové zatížení

5.4 MODEL ZATÍŽENÍ

V případě homogenizace porézní struktury byly vytvořeny dva modely zatížení. Zatížením zkušební vzorku tahem–tlakem byly dohledávány materiálové charakteristiky modul pružnosti v tahu E_{solid} a Poissonovo číslo μ_{solid} na základě posuvu v ose x a y . V případě zatížení zkušební vzorku smykem byl dohledáván modul pružnosti ve smyku G_{solid} z posuvu v ose x .

5.4.1 MODEL ZATÍŽENÍ DISKRÉTNÍ STRUKTURY

Zatěžující síla byla v obou modelech zatížení umístěna do uzlu vrchní stěny vzorku diskrétní struktury. Při zatížení tahem–tlakem byla síla orientována ve směru osy y (Obrázek 5.5), v případě smykového zatížení působila síla ve směru osy x (Obrázek 5.6).

5.4.2 MODEL ZATÍŽENÍ KONTINUA

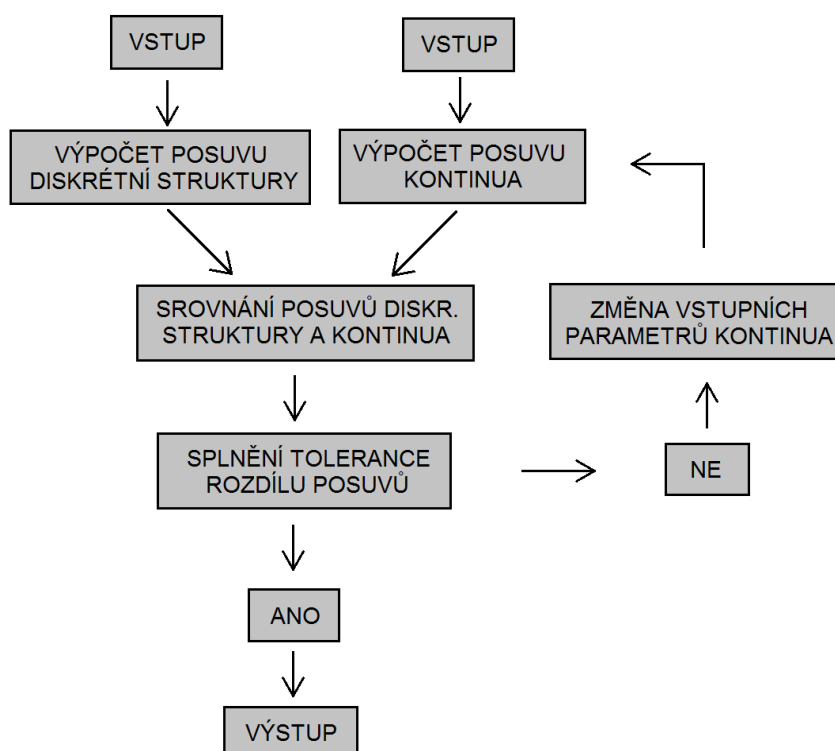
Kontinuum bylo zatíženo analogickým způsobem jako v případě diskrétní struktury. Síla byla zvolena totožně co do velikosti, tak i její orientace. Oba modely zatížení kontinua jsou na Obrázku 5.7 a Obrázku 5.8.

6 REALIZACE ALGORITMU ŘEŠENÍ

Keramický pěnový materiál s otevřenou pórovitostí není schopný odolávat vysokému mechanickému namáhání, a proto při vyšších deformacích okamžitě praská. Na základě této skutečnosti byly všechny varianty výpočtového modelu diskrétní struktury řešeny za podmínky malých deformací.

Cílem této práce bylo nalézt takové materiálové charakteristiky kontinua, aby při zatížení vykazovalo stejné chování jako diskrétní struktura. K tomu byl v programu ANSYS vytvořen algoritmus, který na základě porovnávání posuvu diskrétní struktury a kontinua dokáže nalézt odpovídající materiálové charakteristiky kontinua.

Na Obrázku 6.1 je znázorněno zjednodušené schéma algoritmu řešení. Vstupem do algoritmu byla geometrie, materiálové vlastnosti, okrajové podmínky a zatížení výpočtového modelu diskrétní struktury a kontinua. Řešením výpočtového modelu diskrétní struktury byly získány referenční posuvy podle modelu zatížení. Tyto referenční posuvy byly vstupem do iteračního procesu, ve kterém byly porovnány s posuvy kontinua. V případě, že nebyla splněna tolerance rozdílu posuvů diskrétní struktury a kontinua, byly změněny vstupní hodnoty modelu materiálu kontinua a celý proces se opakoval. Při dosažení tolerance rozdílu posuvu diskrétní struktury a kontinua se iterační proces zastavil. Výstupem byly hledané materiálové charakteristiky kontinua.



Obrázek 6.1 – Schéma algoritmu řešení

7 PREZENTACE A ANALÝZA VÝSLEDKŮ

7.1 DISKRÉTNÍ STRUKTURA S *KELVINOVOU BUŇKOU H0,5–D0,05*

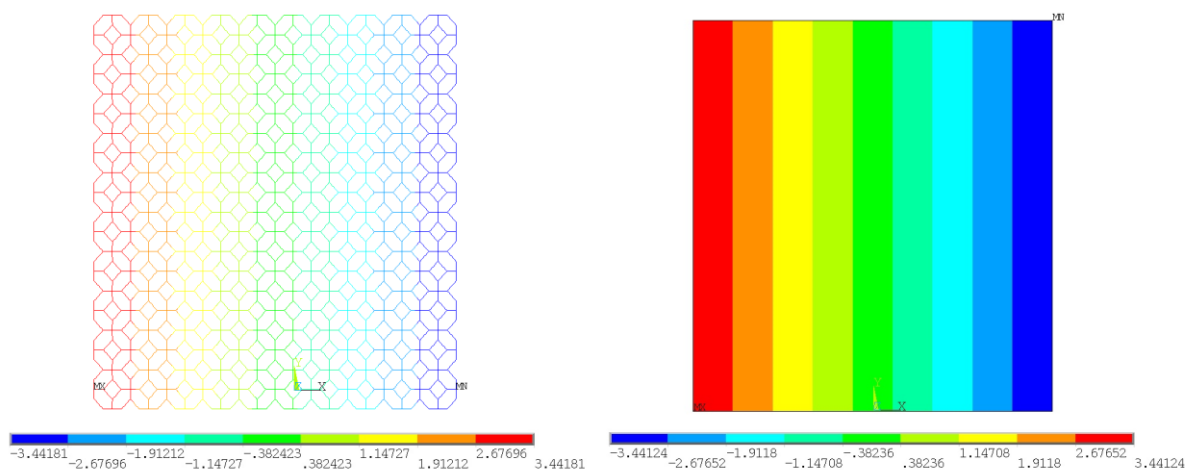
Na diskretní struktuře s *Kelvinovou buňkou H0,5–D0,05* bude podrobně prezentována analýza výsledků získaných její homogenizací. V případě ostatních variant diskretní struktury bylo při analýze postupováno analogickým způsobem.

7.1.1 POROVNÁNÍ POSUVU DISKRÉTNÍ STRUKTURY A KONTINUA

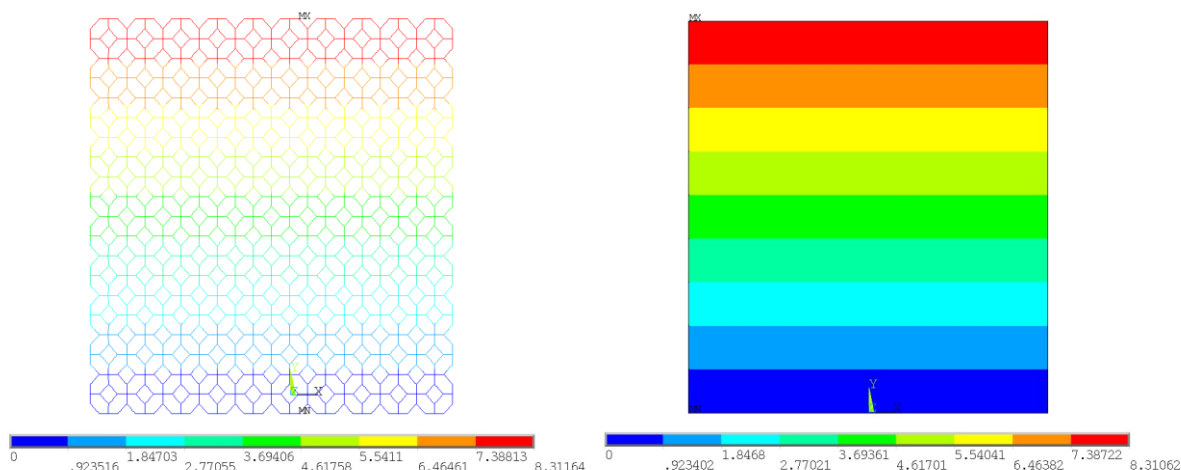
Při hledání materiálových charakteristik kontinua byly porovnávány jeho posuvy s posuvy diskretní struktury. Jakmile bylo dosaženo určité shody mezi těmito posuvy, aktuální materiálové charakteristiky kontinua byly ty výsledné.

Následně bude prezentována podobnost shody posuvu diskretní struktury o velikosti vzorku $10 \times 10 \times 1$ a kontinua s nalezenými materiálovými charakteristikami $E_{\text{solid}} = 191,3$ MPa, $\mu_{\text{solid}} = 0,453$ a $G_{\text{solid}} = 66,6$ MPa.

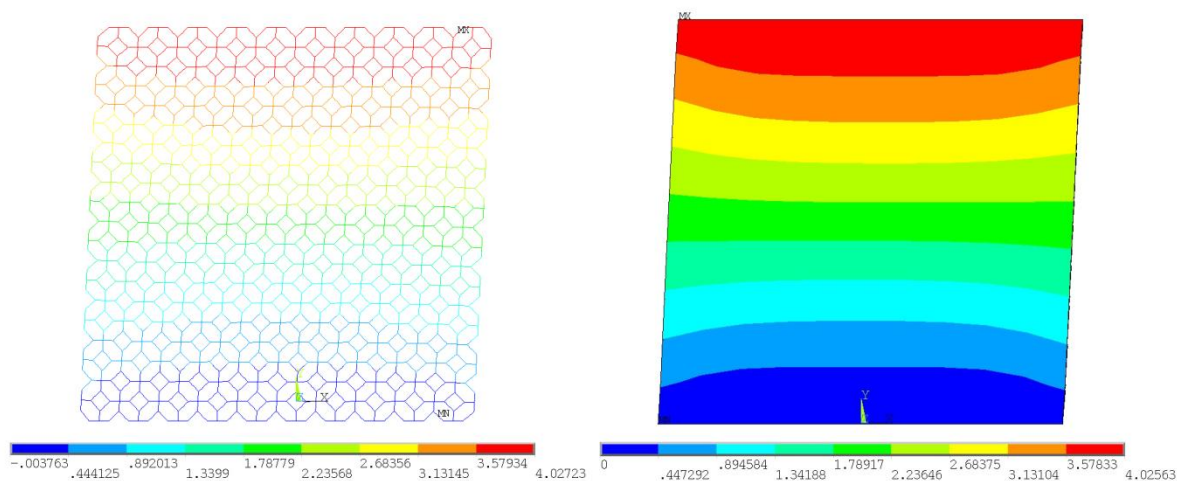
Posuvy diskretní struktury a kontinua při zatížení tahem-tlakem jsou porovnány na Obrázku 7.1 (posuv v ose x) a Obrázku 7.2 (posuv v ose y). Na Obrázku 7.3 je toto porovnání pro případ zatížení smykem (posuvy v ose x).



Obrázek 7.1 – Srovnání posuvu diskretní struktury a kontinua v ose x (tah–tlak)



Obrázek 7.2 – Srovnání posuvu diskrétní struktury a kontinua v ose y (tah–tlak)

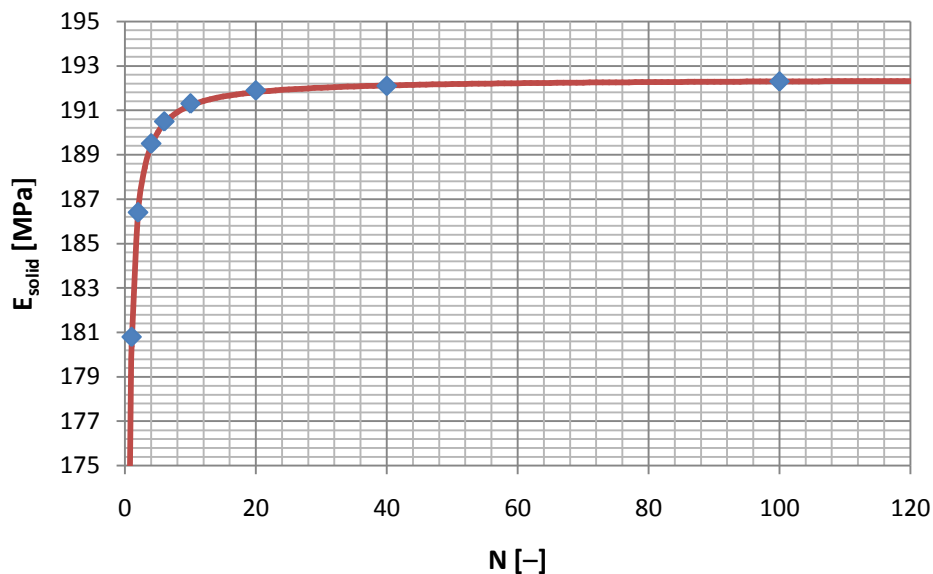


Obrázek 7.3 – Srovnání posuvu diskrétní struktury a kontinua v ose x (smyk)

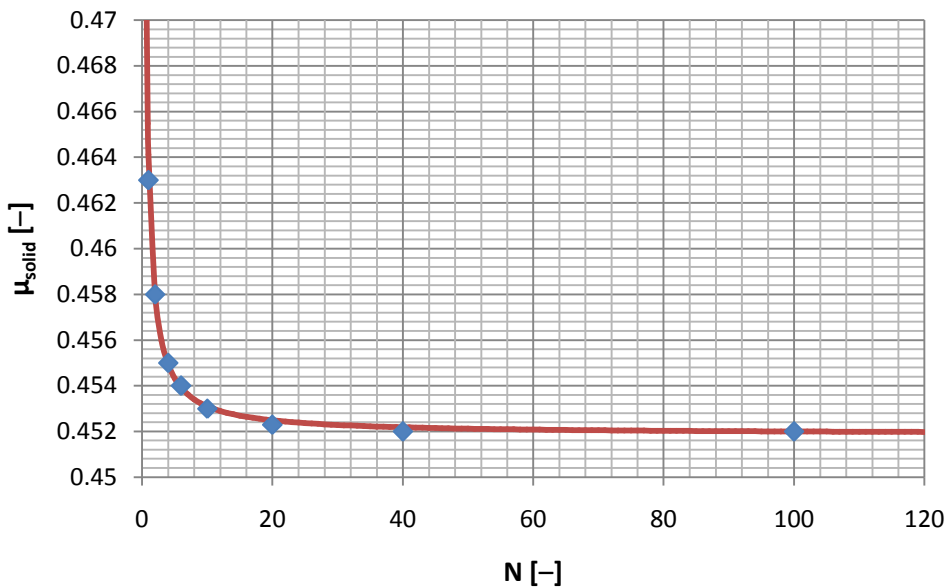
7.1.2 ANALÝZA VLIVU VELIKOSTI VZORKU DISKRÉTNÍ STRUKTURY NA MATERIÁLOVÉ CHARAKTERISTIKY KONTINUA

V kapitole Model geometrie diskrétní struktury bylo uvedeno několik variant rozměrů vzorků, na kterých byly dohledávány odpovídající materiálové charakteristiky kontinua. Velikost vzorku diskrétní struktury byla vyjádřena parametrem N , který označoval počet Kelvinových buněk na stranu tohoto vzorku (např. označením $N = 4$ byla vyjádřena velikost vzorku diskrétní struktury $4 \times 4 \times 1$).

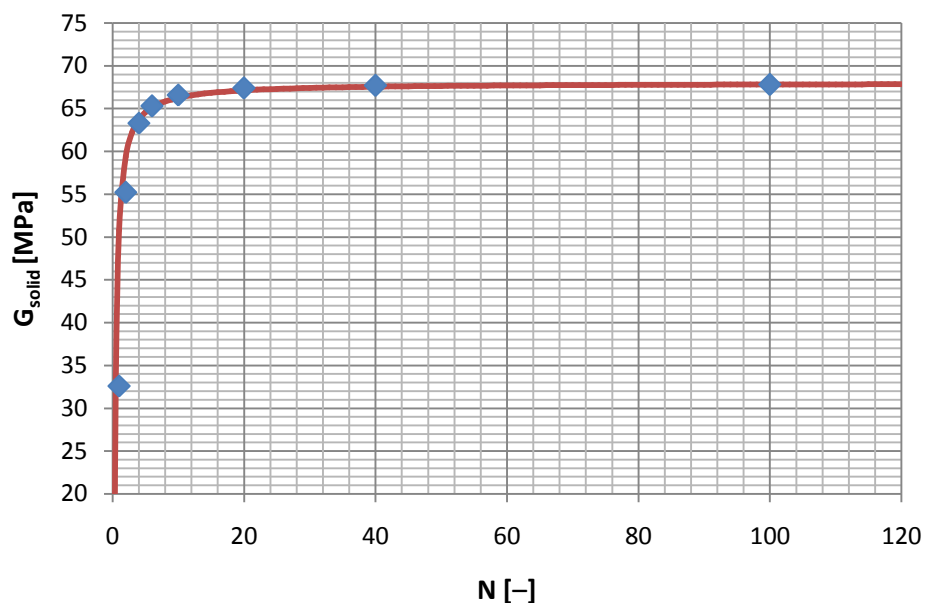
Homogenizací byla postupně nalezena závislost vždy mezi velikostí vzorku diskretní struktury (resp. parametrem N) a modulem pružnosti v tahu E_{solid} (Obrázek 7.4), Poissonovým číslem μ_{solid} (Obrázek 7.5) a modulem pružnosti ve smyku G_{solid} (Obrázek 7.6).



Obrázek 7.4 – Závislost modulu pružnosti E_{solid} na velikosti vzorku diskretní struktury



Obrázek 7.5 – Závislost Poissonova čísla μ_{solid} na velikosti vzorku diskretní struktury



Obrázek 7.6 – Závislost modulu pružnosti ve smyku G_{solid} na velikosti vzorku diskrétní struktury

Závislost materiálových charakteristik kontinua na velikosti vzorku diskrétní struktury vykazovala charakter hyperboly. Z tohoto důvodu byl zvolen následující funkční předpis, který se pro popis materiálových charakteristik kontinua ukázal jako vhodný:

$$f(N) = C_1 + \frac{C_2}{N}, \quad (7.1)$$

kde konstanta C_1 vyjadřovala hodnotu materiálové charakteristiky kontinua pro nekonečně velký vzorek diskrétní struktury a konstanta C_2 zahrnovala vliv počtu Kelvinových buněk vzorku diskrétní struktury.

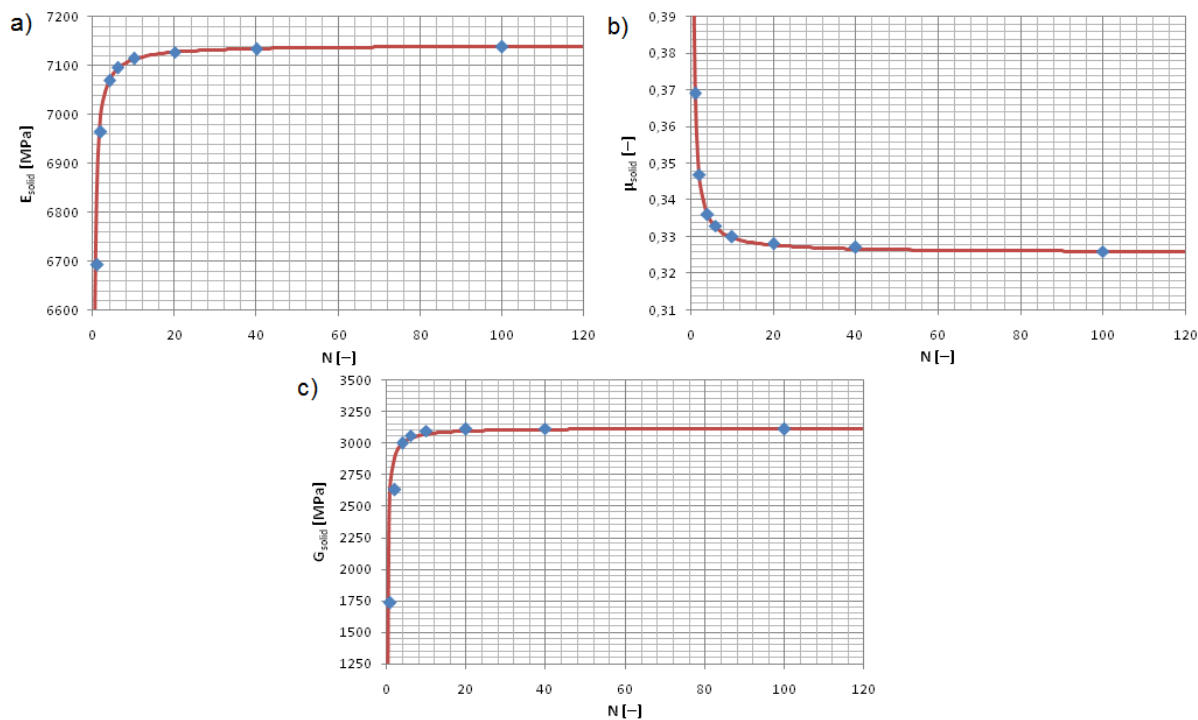
Ukázalo se, že funkce (7.1) nejlépe popisovala průběh závislosti materiálových charakteristik kontinua na velikosti vzorku diskrétní struktury, pokud byly konstanty C_1 a C_2 dohledány z velikosti vzorku diskrétní struktury $4 \times 4 \times 1$ a $100 \times 100 \times 1$.

7.2 NEJTUŽŠÍ A NEJPODDAJNĚJŠÍ VARIANTA DISKRÉTNÍ STRUKTURY

V případě homogenizace diskrétní struktury s *Kelvinovou buňkou* $H0,5-D0,05$ materiálové charakteristiky kontinua pro velké rozměry vzorků diskrétní struktury konvergovaly k určité hodnotě. Z tohoto důvodu bylo snahou nalézt dostatečnou velikost vzorku diskrétní struktury, v jejímž případě by se odpovídající materiálové charakteristiky jen minimálně lišily od konstanty C_1 z předpisu (7.1). Materiálové charakteristiky kontinua by tak mohly být dohledávány homogenizací diskrétní struktury o této velikosti vzorku.

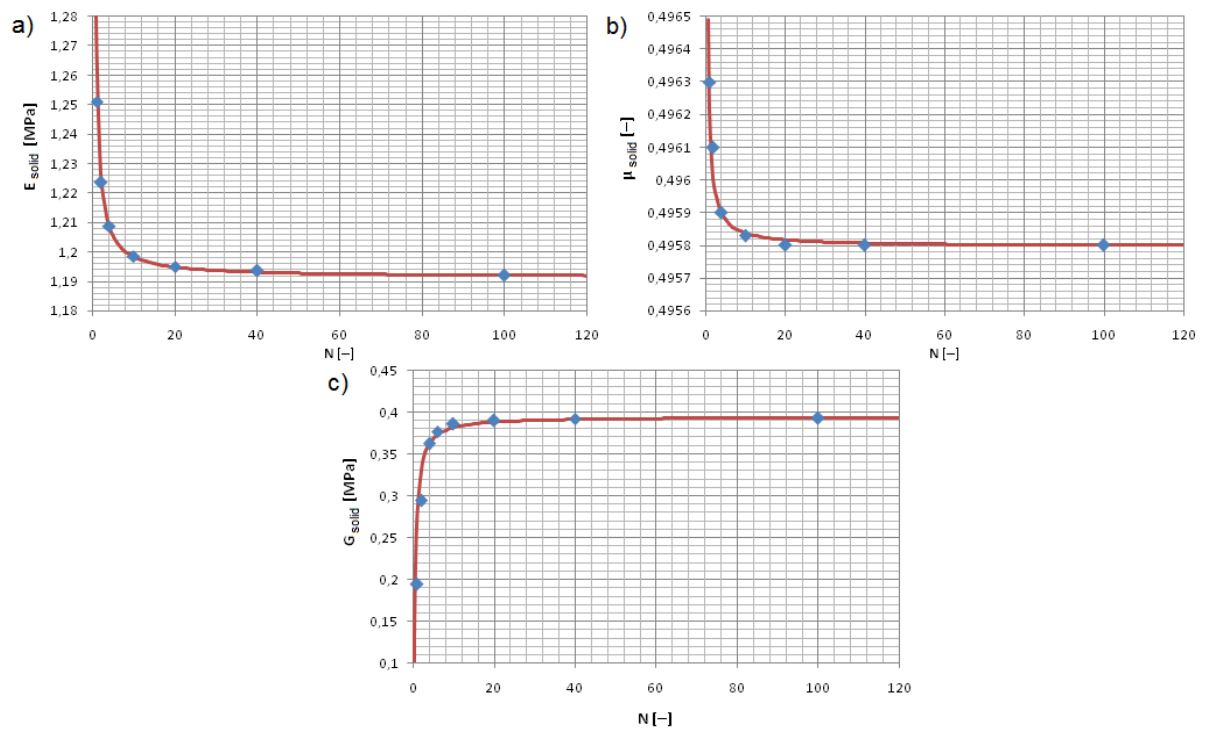
Pokud by případy diskrétní struktury s *Kelvinovou buňkou H0,25–D0,08* (nejtuzší) a *Kelvinovou buňkou H0,75–D0,02* (nejpoddajnější) vykazovaly stejné chování materiálových charakteristik kontinua, lze s velkou pravděpodobností toto chování očekávat také v ostatních případech variant diskrétní struktury. Na Obrázku 7.7 a 7.8 je ukázána závislost materiálových charakteristik kontinua na velikosti vzorku diskrétní struktury:

a) s *Kelvinovou buňkou H0,25–D0,08*



Obrázek 7.7 – Závislost a) modulu pružnosti v tahu E_{solid} b) Poissonova čísla μ_{solid} c) modulu pružnosti ve smyku G_{solid} na velikosti vzorku diskrétní struktury s *Kelvinovou buňkou H0,25–D0,08*

b) s Kelvinovou buňkou H0,75–D0,02



Obrázek 7.8 – Závislost a) modulu pružnosti v tahu E_{solid} b) Poissonova čísla μ_{solid} c) modulu pružnosti ve smyku G_{solid} na velikosti vzorku diskrétní struktury s Kelvinovou buňkou H0,75–D0,02

Při analýze homogenizace diskrétní struktury s nejtuzší a nejpoddajnější Kelvinovou buňkou byla jako dostačující velikost vzorku diskrétní struktury pro hledání odpovídajících materiálových charakteristik kontinua navržena $100 \times 100 \times 1$.

V následujících tabulkách je uvedeno srovnání materiálových charakteristik kontinua odpovídajícího velikosti vzorku diskrétní struktury $100 \times 100 \times 1$ (označení K_{100}) a teoreticky nekonečně velkého vzorku diskrétní struktury (konstanta C_1). Srovnání bylo provedeno jak v případě diskrétní struktury s nejvyšší tuhostí (Tabulka 7.1), tak v případě s nejnižší tuhostí (Tabulka 7.2).

Tabulka 7.1 – Porovnání materiálových charakteristik kontinua odpovídajícího diskrétní struktury s nejtuzší Kelvinovou buňkou a konstanty C_1

	K_{100}	Konstanta C_1
E_{solid} [MPa]	7139	7141,9
μ_{solid} [-]	0,326	0,3256
G_{solid} [MPa]	3113	3117,7

Tabulka 7.2 – Porovnání materiálových charakteristik kontinua odpovídajícího diskretní struktuře s nejpoddajnější Kelvinovou buňkou a konstanty C_1

	K ₁₀₀	Konstanta C_1
E_{solid} [MPa]	1,192	1,1913
μ_{solid} [-]	0,4958	0,49579
G_{solid} [MPa]	0,3935	0,39479

Porovnáním materiálových charakteristik kontinua odpovídajícího velikosti vzorku diskretní struktury 100×100×1 a konstanty C_1 z předpisu (7.1) bylo zjištěno, že jsou téměř shodné. S ohledem na tuto skutečnost byly ostatní varianty diskretní struktury řešeny na vzorku velikosti 100×100×1.

7.3 VÝSLEDKY HOMOGENIZACE VŠECH VARIANT DISKRÉTNÍ STRUKTURY

V této kapitole jsou prezentovány a analyzovány výsledné materiálové charakteristiky kontinua v závislosti na charakteristických rozměrech Kelvinovy buňky pro všechny varianty diskretní struktury.

V Tabulce 7.3 je ukázána tato závislost pro modul pružnosti v tahu E_{solid} . Jak je z této závislosti patrné, hodnota materiálové charakteristiky E_{solid} roste s menší velikostí buňky H a s větším průměrem trámečku D. Naopak s větší velikostí buňky H a menším průměrem trámečku D klesá.

Tabulka 7.3 – Závislost modulu pružnosti v tahu E_{solid} na charakteristických rozměrech Kelvinovy buňky všech variant diskretní struktury

		Průměr trámečku D [mm]		
		0,02	0,05	0,08
Velikost Kelvinovy buňky H [mm]	0,25	84,8	1932	7139
	0,5	5,906	192,3	963,1
	0,75	1,192	42,68	242,3

Závislost Poissonova čísla μ_{solid} na charakteristických rozměrech Kelvinovy buňky je v Tabulce 7.4. Poissonovo číslo μ_{solid} se chová tak, že roste s rostoucí velikostí Kelvinovy buňky a s menším průměrem trámečku D. Oproti tomu klesá v případě menší velikosti Kelvinovy buňky H a většího průměru trámečku D.

Tabulka 7.4 – Závislost Poissonova čísla μ_{solid} na charakteristických rozměrech Kelvinovy buňky všech variant diskrétní struktury

		Průměr trámečku D [mm]		
		0,02	0,05	0,08
Velikost Kelvinovy buňky H [mm]	0,25	0,467	0,379	0,326
	0,5	0,4908	0,452	0,406
	0,75	0,4958	0,476	0,447

Chování modulu pružnosti ve smyku G_{solid} v závislosti na charakteristických rozměrech Kelvinovy buňky (Tabulka 7.5) je analogické s případem modulu pružnosti v tahu E_{solid} .

Tabulka 7.5 – Závislost modulu pružnosti ve smyku G_{solid} na charakteristických rozměrech Kelvinovy buňky všech variant diskrétní struktury

		Průměr trámečku D [mm]		
		0,02	0,05	0,08
Velikost Kelvinovy buňky H [mm]	0,25	29,22	765,3	3113
	0,5	1,964	67,8	365
	0,75	0,3935	14,51	86,1

Odpovídající materiálové charakteristiky kontinua obecně závisejí na tuhosti Kelvinovy buňky diskrétní struktury. Hodnoty modulu pružnosti v tahu E_{solid} a ve smyku G_{solid} rostou s rostoucí tuhostí Kelvinovy buňky, Poissonovo číslo μ_{solid} s tuhostí Kelvinovy buňky klesá. Naopak s klesající tuhostí Kelvinovy buňky modul pružnosti v tahu E_{solid} a ve smyku G_{solid} klesají a Poissonovo číslo μ_{solid} roste.

7.4 ZOBECNĚNÍ ZÁVISLOSTI MATERIÁLOVÝCH CHARAKTERISTIK KONTINUA NA CHARAKTERISTICKÝCH ROZMĚRECH KELVINOVY BUŇKY

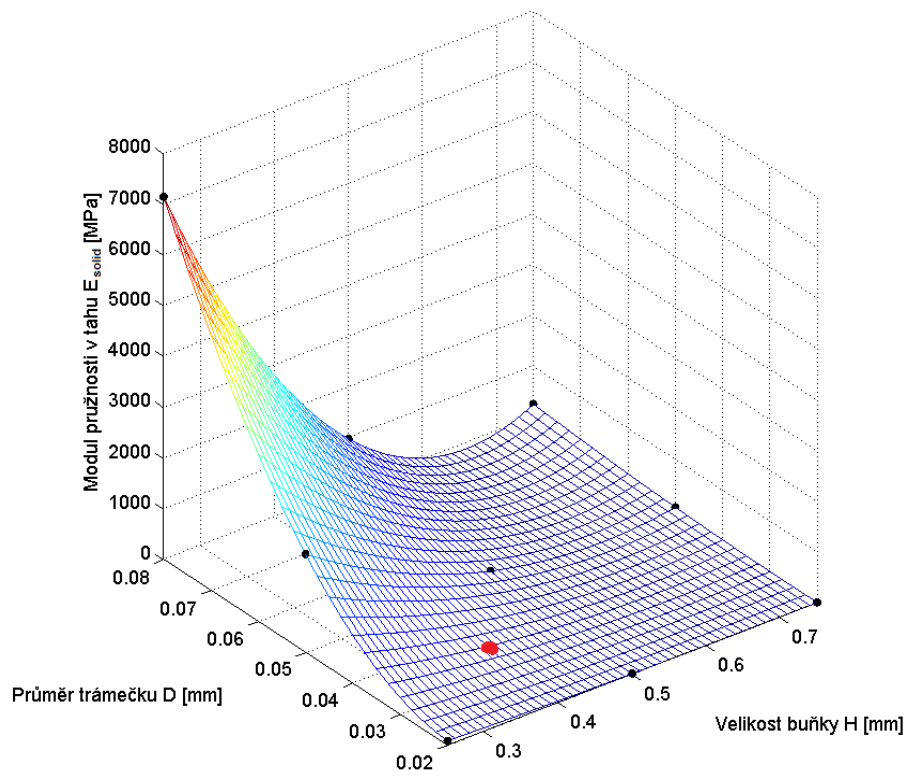
Získané výsledky materiálových charakteristik kontinua byly závislé na dvou parametrech, na výšce Kelvinovy buňky H a na průměru trámečku D . Každou z materiálových charakteristik kontinua tak bylo možné interpretovat jako devět prostorových bodů závislých na charakteristických rozměrech Kelvinovy buňky.

Bylo snahou tyto body vhodně proložit prostorovou polynomickou funkcí, která by obecným způsobem popisovala závislost mezi charakteristickými rozměry Kelvinovy buňky a materiálovými charakteristikami kontinua. Protože bylo dosaženo devíti bodů v případě každé materiálové charakteristiky kontinua, nabízela se varianta interpolace polynomickou funkcí vycházející ze součinu dvou parabol. Předpis této polynomické funkce měl tvar:

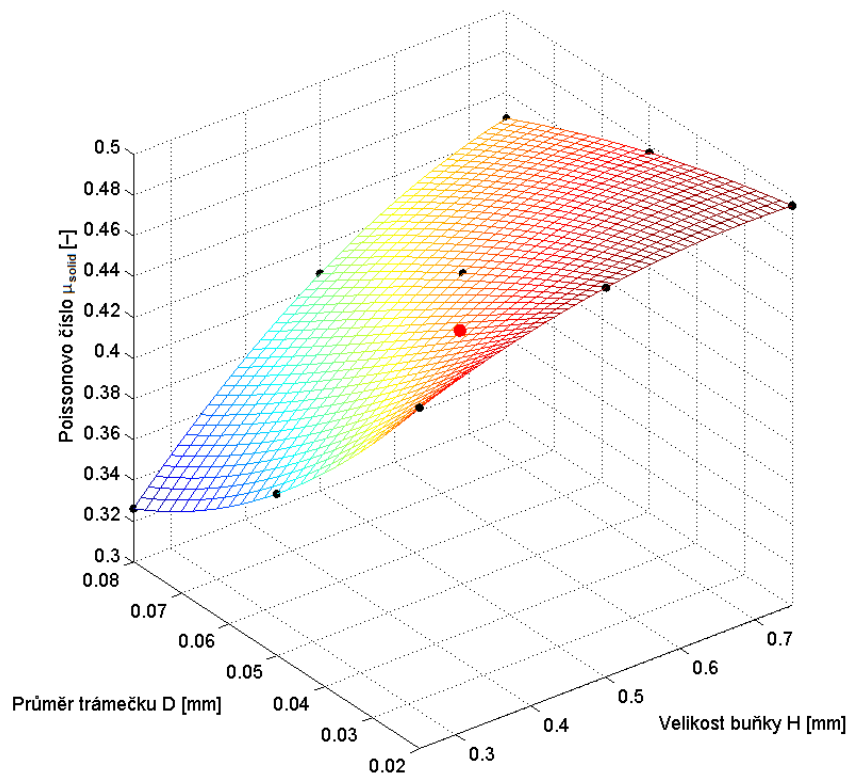
$$f(H, D) = B_1 + B_2D + B_3D^2 + B_4H + B_5HD + B_6HD^2 + B_7H^2 + B_8H^2D + B_9H^2D^2 \quad (7.2)$$

Dosažením příslušných hodnot z Tabulek 7.3, 7.4 a 7.5 do rovnice (7.2) byla pro každou z materiálových charakteristik kontinua získána soustava devíti lineárních rovnic s neznámými konstantami B_i pro $i = 1, 2, \dots, 9$. Tyto soustavy byly vyřešeny pomocí programu Matlab. Zpětným dosazením neznámých konstant do rovnice (7.2) byly takto získány tři obecné předpisy polynomických funkcí popisující závislost materiálových charakteristik kontinua na charakteristických rozměrech Kelvinovy buňky.

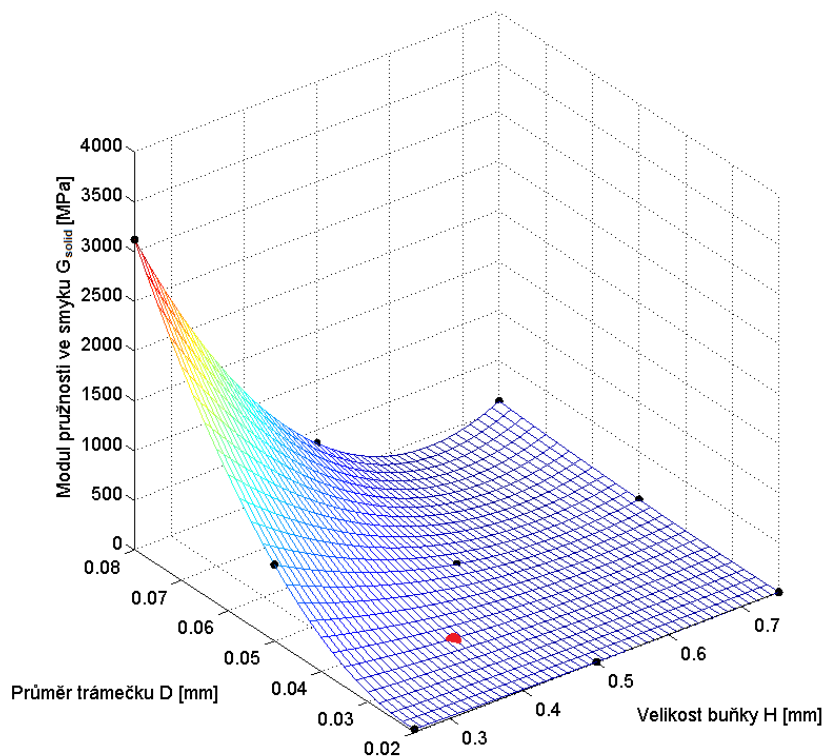
Tyto závislosti byly také v programu Matlab vykresleny. Na Obrázku 7.9 je závislost modulu pružnosti v tahu E_{solid} na charakteristických rozměrech Kelvinovy buňky. Analogicky na Obrázku 7.10 je tato závislost pro Poissonovo číslo μ_{solid} a na Obrázku 7.11 pro modul pružnosti ve smyku G_{solid} . Černě jsou označeny body (materiálové charakteristiky kontinua), které byly interpolovány prostorovou polynomickou funkcí (7.2).



Obrázek 7.9 – Interpolace modulu pružnosti v tahu E_{solid} polynomicickou funkcí (7.2)



Obrázek 7.10 – Interpolace Poissonova čísla μ_{solid} polynomicickou funkcí (7.2)



Obrázek 7.11 – Interpolace modulu pružnosti ve smyku G_{solid} polynomicou funkcí (7.2)

OVĚŘENÍ PŘESNOSTI POPISU ZÁVISLOSTI MATERIÁLOVÝCH CHARAKTERISTIK KONTINUA NA CHARAKTERISTICKÝCH ROZMĚRECH KELVINOVY BUŇKY POMOCÍ POLYNOMICKÉ FUNKCE

Závislost materiálových charakteristik kontinua na charakteristických rozměrech Kelvinovy buňky pomocí polynomické funkce (7.2) byla ověřena na diskretní struktuře odlišných parametrů od původních devíti variant. Byla vytvořena diskretní struktura s *Kelvinovou buňkou* $H0,4-D0,035$, jejíž homogenizací byly získány odpovídající materiálové charakteristiky kontinua. Na Obrázcích 7.9, 7.10 a 7.11 jsou materiálové charakteristiky kontinua odpovídající této variantě diskretní struktury vyznačeny červeným bodem.

Tyto hodnoty byly srovnány s hodnotami polynomické funkce obdržené dosazením charakteristických rozměrů ověřovací Kelvinovy buňky (Tabulka 7.6).

Tabulka 7.6 – Srovnání materiálových charakteristik kontinua odpovídajícího diskretní struktuře s Kelvinovou buňkou $H0,4-D0,035$ s hodnotami polynomické funkce

	Materiálové charakteristiky kontinua	Interpolace polynomicou funkcí
E_{solid} [MPa]	118,2	186,4
μ_{solid} [-]	0,461	0,4555
G_{solid} [MPa]	41,1	59,8

Porovnáním hodnot materiálových charakteristik kontinua a hodnot polynomické funkce bylo zjištěno, že jsou výrazně odlišné. Z hlediska přesnosti popisu závislosti materiálových charakteristik kontinua na charakteristických rozměrech Kelvinovy buňky se předpis polynomické funkce (7.2) ukázal jako nevhodný. Homogenizací diskrétní struktury s dalšími variantami charakteristických rozměrů Kelvinovy buňky by bylo získáno více hodnot materiálových charakteristik kontinua. Data by tak mohla být interpolována polynomickými funkcemi vyšších řádů, což by vedlo ke zpřesnění popisu vlivu charakteristických rozměrů Kelvinovy buňky na materiálové charakteristiky kontinua.

ZÁVĚR

Práce se zabývala homogenizací pěnové struktury s otevřenou pórovitostí pomocí Kelvinovy buňky. Význam homogenizace pěnové struktury spočíval v převedení výpočtového modelu diskrétní struktury na výpočtový model kontinua s odpovídajícími materiálovými charakteristikami. Dále byla provedena analýza vlivu charakteristických rozměrů Kelvinovy buňky na materiálové charakteristiky kontinua. Veškeré výpočtové modelování bylo realizováno pomocí metody konečných prvků.

V programu ANSYS byl vytvořen výpočtový model pěnové struktury s otevřenou pórovitostí, jehož základní geometrii tvořil model Kelvinovy buňky. Na základě experimentálně zjištěných dat [2] byla geometrie Kelvinovy buňky popsána dvěma parametry, velikostí buňky H a průměrem trámečku D . Byly zvoleny tři velikosti od každého z těchto parametrů, čímž vznikla kombinace devíti různých variant diskrétní struktury. Zároveň byl vytvořen výpočtový model kontinua, u kterého byly dohledávány odpovídající materiálové charakteristiky, tj. modul pružnosti v tahu E_{solid} , Poissonovo číslo μ_{solid} a modul pružnosti ve smyku G_{solid} . Analýzou závislosti materiálových charakteristik kontinua na velikosti vzorku diskrétní struktury s nejužší a nejpoddajnější Kelvinovou buňkou bylo zjištěno, že při homogenizaci vzorku diskrétní struktury $100 \times 100 \times 1$ a větších se materiálové charakteristiky kontinua mění jen minimálně. Z tohoto důvodu byly ostatní varianty diskrétní struktury homogenizovány na velikosti vzorku $100 \times 100 \times 1$ a odpovídající materiálové charakteristiky kontinua považovány za výsledné.

Homogenizací všech variant diskrétní struktury bylo získáno devět hodnot v případě každé materiálové charakteristiky kontinua závislých na charakteristických rozměrech Kelvinovy buňky. Ve všech třech případech byla obdržená data interpolována polynomickou funkcí, jejíž přepis představoval součin dvou parabol (7.2). K nalezení předpisů polynomických funkcí byl použit program Matlab.

Vhodnost popisu závislosti materiálových charakteristik kontinua na geometrii Kelvinovy buňky polynomickou funkcí (7.2) byla ověřena na diskrétní struktuře odlišné od variant původně zvolených. Porovnáním hodnot materiálových charakteristik kontinua získaných homogenizací ověřovací diskrétní struktury s hodnotami polynomické funkce bylo zjištěno, že se výrazně liší. Za účelem zpřesnění popisu zmiňovaných závislostí by bylo nutné zvolit další kombinace charakteristických rozměrů Kelvinovy buňky. Následně provést homogenizaci diskrétních struktur s těmito buňkami a získané hodnoty materiálových charakteristik kontinua proložit polynomickými funkcemi vyšších řádů. Takto by bylo docíleno přesnějšího popisu chování materiálových charakteristik kontinua.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] SCHEFFLER, Michael a Paolo COLOMBO. *Cellularceramics: structure, manufacturing, properties and applications*. Weinheim: Wiley-VCH, 2005. s. 4-10. ISBN 978-3-527-31320-4.
- [2] BERTOLLA, L., I. DLOUHÝ a A.R. BOCCACCINI. Preparation and characterization of Bioglass®-based scaffolds reinforced by poly-vinyl alcohol/microfibrillated cellulose composite coating. *Journal of the European Ceramic Society*. 2014, vol. 34.
- [3] BREZNY, Rasto a J. David Green. Mechanical behavior of cellular ceramics. In *Materials science and technology. Journal of the American Ceramic Society*. 1990, vol. 11, s. 463-516.
- [4] Open-cell metal foam. In: *Wikipedia The Free Encyclopedia* [online]. 2001 WikimediaFoundation. [9.1.2008]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Metal_foam#/media/File:Metal_Foam_in_Scanning_Electron_Microscope,_magnification_10x.GIF
- [5] Keramické a kompozitní materiály. *Fakulta strojní západočeské univerzity v Plzni* [online]. [cit. 2015-05-25]. Dostupné z: <http://tzs.kmm.zcu.cz/keramika2.pdf>
- [6] Porézní a celulární keramika. *Vysoká škola chemicko-technologická* [online]. 2004 [cit. 2015-05-25]. Dostupné z: http://old.vscht.cz/sil/keramika/Ceramic_Technology/SM-Lect-11-C.pdf
- [7] ŠENK, V. *Keramické porézní materiály - příprava, struktura a vlastnosti*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 43 s. Vedoucí diplomové práce prof. RNDr. Jaroslav Cihlář, CSc.
- [8] STUART, R. André, GAUCKLER, J. Ludwig, TERVOORT, Elena. Processing Route to macroporous ceramics: A review. *Journal of the American Ceramic Society*. 2006. vol. 89, no. 6, s. 1771-1789.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

$B_1 - B_9$		konstanty polynomické funkce (7.2)
C_1, C_2		konstanty funkčního předpisu (7.1)
D	[mm]	průměr trámečku Kelvinovy buňky
E_{foam}	[MPa]	modul pružnosti v tahu materiálu diskrétní struktury
E_{solid}	[MPa]	modul pružnosti v tahu materiálu kontinua
G_{solid}	[MPa]	modul pružnosti ve smyku materiálu kontinua
H	[mm]	velikost Kelvinovy buňky
K_{100}		kontinuum odpovídající velikosti vzorku diskrétní struktury 100×100×1
N	[-]	počet Kelvinových buněk na stranu vzorku diskrétní struktury
μ_{foam}	[-]	Poissonovo číslo materiálu diskrétní struktury
μ_{solid}	[-]	Poissonovo číslo materiálu kontinua

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 3.1 – Pěnová struktura s otevřenou pórovitostí [4].....	13
Obrázek 3.2 – Relativní četnost buňky a) různé velikosti b) různého průměru trámečku [2] .	15
Obrázek 5.1 – Výpočtový model Kelvinovy buňky	17
Obrázek 5.2 – Využití rovinné deformace z důvodu zjednodušení řešení	18
Obrázek 5.3 – Vzorek diskrétní struktury 10×10×1	19
Obrázek 5.4 – Vzorek kontinua odpovídající diskrétní struktuře 10×10×1	20
Obrázek 5.5 – Model okrajových podmínek diskrétní struktury při zatížení tahem–tlakem...	21
Obrázek 5.6 – Model okrajových podmínek diskrétní struktury při zatížení smykem	22
Obrázek 5.7 – Model okrajových podmínek kontinua pro zatížení tahem–tlakem	22
Obrázek 5.8 – Model okrajových podmínek kontinua pro smykové zatížení	23
Obrázek 6.1 – Schéma algoritmu řešení.....	24
Obrázek 7.1 – Srovnání posuvu diskrétní struktury a kontinua v ose x (tah–tlak).....	25
Obrázek 7.2 – Srovnání posuvu diskrétní struktury a kontinua v ose y (tah–tlak).....	26
Obrázek 7.3 – Srovnání posuvu diskrétní struktury a kontinua v ose x (smyk)	26
Obrázek 7.4 – Závislost modulu pružnosti E_{solid} na velikosti vzorku diskrétní struktury.....	27
Obrázek 7.5 – Závislost Poissonova čísla μ_{solid} na velikosti vzorku diskrétní struktury	27
Obrázek 7.6 – Závislost modulu pružnosti ve smyku G_{solid} na velikosti vzorku diskrétní struktury	28
Obrázek 7.7 – Závislost a) modulu pružnosti v tahu E_{solid} b) Poissonova čísla μ_{solid} c) modulu pružnosti ve smyku G_{solid} na velikosti vzorku diskrétní struktury s Kelvinovou buňkou H0,25–D0,08.....	29
Obrázek 7.8 – Závislost a) modulu pružnosti v tahu E_{solid} b) Poissonova čísla μ_{solid} c) modulu pružnosti ve smyku G_{solid} na velikosti vzorku diskrétní struktury s Kelvinovou buňkou H0,75–D0,02.....	30
Obrázek 7.9 – Interpolace modulu pružnosti v tahu E_{solid} polynomicke funkcí (7.2).....	34
Obrázek 7.10 – Interpolace Poissonova čísla μ_{solid} polynomicke funkcí (7.2)	34
Obrázek 7.11 – Interpolace modulu pružnosti ve smyku G_{solid} polynomicke funkcí (7.2)	35

SEZNAM TABULEK

Tabulka 5.1 – Volba charakteristických rozměrů Kelvinovy buňky na základě experimentálně zjištěných dat [2]	18
Tabulka 7.1 – Porovnání materiálových charakteristik kontinua odpovídajícího diskrétní struktuře s nejtužší Kelvinovou buňkou a konstanty C_1	30
Tabulka 7.2 – Porovnání materiálových charakteristik kontinua odpovídajícího diskrétní struktuře s nejpoddajnější Kelvinovou buňkou a konstanty C_1	31
Tabulka 7.3 – Závislost modulu pružnosti v tahu E_{solid} na charakteristických rozměrech Kelvinovy buňky všech variant diskrétní struktury.....	31
Tabulka 7.4 – Závislost Poissonova čísla μ_{solid} na charakteristických rozměrech Kelvinovy buňky všech variant diskrétní struktury	32
Tabulka 7.5 – Závislost modulu pružnosti ve smyku G_{solid} na charakteristických rozměrech Kelvinovy buňky všech variant diskrétní struktury.....	32
Tabulka 7.6 – Srovnání materiálových charakteristik kontinua odpovídajícího diskrétní struktuře s Kelvinovou buňkou H0,4–D0,035 s hodnotami polynomické funkce	35

SEZNAM PŘÍLOH

Přílohy na CD:

[Příloha 1]

Elektronická verze bakalářské práce