



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV STAVEBNÍ MECHANIKY

INSTITUTE OF STRUCTURAL MECHANICS

ANALÝZA POLE NAPĚTÍ BETONOVÝCH TĚLES VYZTUŽENÝCH 3D TIŠTĚNOU VÝZTUŽÍ

STRESS FIELD ANALYSIS OF CONCRETE SAMPLE REINFORCED WITH 3D PRINTED REINFORCEMENT

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Samuel Mikle

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Miarka, Ph.D.

BRNO 2026

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav stavební mechaniky
Student: **Bc. Samuel Mikle**
Vedoucí práce: **Ing. Petr Miarka, Ph.D.**
Akademický rok: 2025/26
Studijní program: N0732A260023 Stavební inženýrství – pozemní stavby

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

Analýza pole napětí betonových těles vyztužených 3D tištěnou výztuží

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Rozvoj aditivní technologie snížil cenu tištěných komponent na tolik, že je lze použít jako výztuž do cementových kompozitů. Oproti tradiční ocelové výztuži má 3D tištěná výztuž možnost tvarové optimalizace, u které lze zohlednit různé druhy zatížení. Využitím 3D tisku a pokročilých numerických simulací lze navrhnout tvar, který povede ke zlepšení únavových vlastností cementových kompozitů.

Cíle a výstupy diplomové práce:

Pro analýzu pole napětí bude sestaven numerický model v MKP softwaru ANSYS, který zohlední různé poměry vyztužení 3D tištěnou plastovou výztuhou. Numerická data pak budou použita k úpravě predikce pro stanovení únavové životnosti těchto těles.

Požadované cíle práce lze shrnout do těchto bodů:

1) - výkresová dokumentace a model 3D tištěné výtuže; 2) - sestavení 3D vypočtového modelu v MKP softwaru ANSYS; 3) - analýza pole napětí pro různé poměry vyztužení; 4) - porovnání experimentálních a numerických dat; 5) - úprava predikce únavové životnosti dle MKP výsledků.

Seznam doporučené literatury a podklady:

[1] Logan D.L., A First Course in the Finite Element Method, 6th Edition (2015) ISBN: 978-1-305-63511-1

[2] Katzer J, Szatkiewicz T. Effect of 3D Printed Spatial Reinforcement on Flexural Characteristics of Conventional Mortar. Materials, 13(14), (2020) 3133,

[3] Xu Y., Zhang H., Gan Y., Šavija B., Cementitious composites reinforced with 3D printed functionally graded polymeric lattice structures: Experiments and modelling, Additive Manufacturing, 39, (2021), 101887,

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku.

V Brně, dne 18. 3. 2025

L. S.

prof. Ing. David Lehký, Ph.D.
vedoucí ústavu

Ing. Petr Miarka, Ph.D.
vedoucí práce

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA, dr. h. c.
děkan

ABSTRAKT

Diplomová práca sa zaoberá analýzou napäťového poľa betónových prvkov vystužených polymérnou výstužou vyrobenou pomocou 3D tlače. Cieľom práce je experimentálne a numericky posúdiť vplyv geometrie a výšky polymérnej výstuže na rozloženie napätí a vznik trhlín pri ohybovom namáhaní. Experimentálna časť zahŕňa trojbodové ohybové skúšky betónových vzoriek, ktoré sú doplnené numerickou analýzou metódou konečných prvkov v prostredí ANSYS APDL. Výsledky poukazujú na významný vplyv polymérnej výstuže na správanie betónového prvku a potvrdzujú potenciál využitia 3D tlače pri návrhu inovatívnych betónových konštrukcií.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

Únava betónu, polymérna výstuž, aditívna výroba, ohybové namáhanie, napäťové pole, metóda konečných prvkov

ABSTRACT

This diploma thesis focuses on the analysis of the stress field in concrete elements reinforced with polymer reinforcement produced by 3D printing. The objective of the study is to experimentally and numerically evaluate the effect of reinforcement geometry and height on stress distribution and crack formation under bending. The experimental program includes three-point bending tests of concrete specimens, complemented by numerical analysis using the finite element method in the ANSYS APDL environment. The results highlight the significant influence of polymer reinforcement on the mechanical behavior of concrete elements and confirm the potential of 3D printed reinforcement for innovative concrete structures.

KEY WORDS

Concrete fatigue, polymer reinforcement, additive manufacturing , bending loading, stress field, finite element method

MIKLE, Samuel. *Analýza pole napětí betonových těles vyztužených 3D tištěnou výztuží*. Brno, 2026. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavební mechaniky. Vedoucí Ing. Petr Miarka, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Analýza pole napětí betonových těles vyztužených 3D tištěnou výztuží* zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 16. 1. 2026

Bc. Samuel Míkle

autor

POĎAKOVANIE

Vznik tejto práce by nebol možný bez podpory viacerých ľudí a inštitúcií. Predovšetkým by som rád vyjadril poďakovanie Ing. Petrovi Miarkovi, Ph.D., ktorý mi počas vedenia práce poskytoval odborné usmernenie, konštruktívne pripomienky a cenné skúsenosti, vďaka ktorým bolo možné túto tému systematicky rozvíjať. Moje poďakovanie patrí aj Ústavu fyziky materiálov AV ČR, v. v. i., za spoluprácu a sprístupnenie experimentálnych podkladov, ktoré tvorili neoddeliteľnú súčasť riešenia práce. Na záver by som chcel poďakovať svojej rodine za dlhodobú podporu, pochopenie a motiváciu počas celého obdobia štúdia.

Obsah

1. Úvod.....	10
2. Ciel práce	11
3. Aditívne technológie pre výrobu dielov z plastov	12
3.1. Aditívne technológie.....	12
3.1.1. Powder bed fusion (PBF).....	13
3.1.2. Material extrusion (ME).....	16
3.1.3. Material jetting (MJ)	18
3.2. Princíp 3D tlače	19
4. Materiály	21
4.1. Metamateriály	21
4.2. Polymérne materiály	22
4.2.1. Polylactic acid (PLA)	23
4.2.2. Akrylonitril–butadién–styrén (ABS).....	23
4.2.3. High impact Polystyrene (HIPS).....	24
4.2.4. Polyethylene terephthalate glycol-modified (PETG).....	24
4.3. Porovnanie	26
4.3.1. Ťahová skúška.....	26
4.3.2. Ohybová skúška	28
5. Únava materiálov	29
5.1. Základné princípy	30
5.2. Únava betónu.....	32
5.2.1. Wöhlerova krivka.....	34
5.3. Únava plastov	36
5.4. Kombinácia únavy.....	36
6. Numerický model.....	38
6.1. Geometrický model	38
6.2. Geometrický model výstuh.....	38
6.3. Diskretizácia	40
6.3.1. Sieť.....	40
6.3.2. Poissonov súčiniteľ	43
6.4. Okrajové podmienky	46
6.5. Zaťaženie	48
7. Analýza polí deformácií a napätí pre rôzne výšky.....	51
7.1. Pole deformácií.....	51

7.2.	Polia napätí pre 3D tlačené výstuhy	53
7.3.	Napät'ové polia pre maltovú matricu	57
7.3.1.	Bočný a spodný pohľad na maltovú matricu	58
7.3.2.	Rezné roviny	60
8.	Experimentálne dáta	63
8.1.	Vplyv orientácie filamentov na správanie vzoriek pri ohybovej skúške	63
8.2.	Vzorky	65
8.3.	Výsledky experimentálnej skúšky	66
9.	Vyhodnotenie poškodenia experimentálnych vzoriek	71
10.	Úprava predikcie životnosti pri únave	77
10.1.	Výstuha s výškou $h = 5$ mm	79
10.2.	Výstuha s výškou $h = 10$ mm	80
10.3.	Výstuha s výškou $h = 15$ mm	81
10.4.	Výstuha s výškou $h = 20$ mm	82
11.	Vyhodnotenie výsledkov	83
12.	Záver	85
	Citácie	87
	Zoznam obrázkov	95
	Zoznam tabuliek	97
	Zoznam symbolov a skratiek	98
	Zoznam príloh	100

1. Úvod

Aditívna výroba, často označovaná ako 3D tlač, predstavuje v súčasnosti dynamicky sa rozvíjajúcu oblasť výrobných technológií, ktorá nachádza široké uplatnenie v strojárstve, stavebníctve aj v oblasti výskumu a vývoja nových materiálových riešení. Jej hlavnou výhodou je možnosť výroby tvarovo zložitých a vnútorné štruktúrovaných prvkov, ktorých geometria a funkčné vlastnosti sú len ťažko dosiahnuteľné tradičnými výrobnými postupmi. V posledných rokoch sa preto aditívna výroba čoraz častejšie využíva aj na návrh architektovaných štruktúr a mechanických metamateriálov, ktorých výsledné správanie je dané predovšetkým vnútornou geometriou a nie iba chemickým zložením materiálu.

Jednou z perspektívnych oblastí využitia aditívnej výroby je návrh polymérnych výstuží pre cementové kompozity. V porovnaní s klasickou oceľovou výstužou umožňujú polymérne a architektované výstužné prvky modifikovať napät'ové pole v ťahovej oblasti betónu, ovplyvňovať iniciáciu a šírenie trhlín a potenciálne zlepšovať správanie prvkov pri ohybovom a únavovom namáhaní. Najmä pri cyklickom zaťažení predstavuje interakcia medzi krehkou cementovou matricou a duktilnejšou polymérnou výstužou komplexný problém, ktorý si vyžaduje kombináciu experimentálneho a numerického prístupu.

Významným faktorom pri návrhu polymérnych výstuží vyrábaných technológiou Fused Filament Fabrication je anizotropia mechanických vlastností, ktorá vyplýva zo smerového ukladania materiálu a z kvality medzivrstvového spojenia. Táto anizotropia má zásadný vplyv na rozloženie napätí, deformácie a mechanizmus porušenia výstužných prvkov, a preto musí byť zohľadnená nielen pri experimentálnom testovaní, ale aj pri numerickom modelovaní.

Diplomová práca sa zameriava na štúdium správania betónových (resp. maltových) telies vystužených 3D tlačenou polymérnou výstužou s hexagonálnou (HEX) architektúrou. Pozornosť je venovaná najmä vplyvu geometrie výstuže a jej výšky na rozloženie napät'ových polí v ohybom namáhanom prvku, ako aj na únavové správanie celého kompozitného systému. Kombináciou numerickej analýzy pomocou metódy konečných prvkov a vyhodnotením experimentálnych dát je možné získať komplexný pohľad na mechanizmus spolupôsobenia polymérnej výstuže a cementovej matrice.

2. Ciel práce

Cieľom diplomovej práce je analyzovať vplyv 3D tlačenej polymérnej výstuže s hexagonálnou (HEX) architektúrou na rozloženie napät'ových polí, deformácie a únavové správanie ohybom namáhaných cementových kompozitných prvkov.

Hlavným cieľom práce bolo navrhnúť a vytvoriť geometrický model polymérnej výstuže s hexagonálnym vzorom a rôznou výškou výstuh, následne vytvoriť numerický model vzoriek na bázy malty vystuženou práve touto aditívnou technológiou a za pomoci MKP analyzovať rozloženie napätí pre jednotlivé varianty výstuh.

Ďalším cieľom bolo vyhodnotenie únavovej skúšky na spomínaných vzorkách a následné vyhodnotenie životnosti z numerického modelu.

Výsledkom práce je komplexné posúdenie vhodnosti 3D tlačenej polymérnej výstuže ako alternatívneho výstužného prvku v cementových kompozitoch, ako aj identifikácia kľúčových parametrov, ktoré ovplyvňujú jej mechanické a únavové správanie.

3. Aditívne technológie pre výrobu dielov z plastov

Aditívna výroba (additive manufacturing, AM) , ktorá je v posledných rokoch viac známa ako 3D tlač napreduje veľmi rýchlim tempom vo všetkých priemysloch. Od medicíny cez umenie a výrobu šperkov až po stavebníctvo a architektúru. V stavebnom a strojárskom priemysle sa používajú metamateriály, priemyselné komponenty až po dopravný priemysel [1].

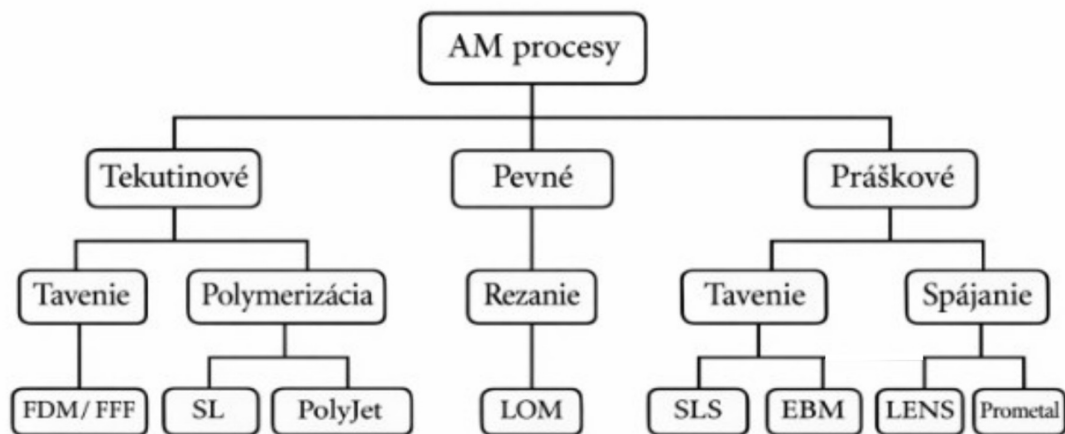
3.1. Aditívne technológie

Aditívna výroba , často označovaná aj ako 3D tlač, predstavuje skupinu výrobných procesov, pri ktorých sa trojrozmerný objekt vytvára postupným pridávaním materiálu vo vrstvách na základe digitálneho modelu, čím vieme dosiahnuť väčšiu geometrickú voľnosť, rýchlu výrobu tvarovo zložitých častí. Základné princípy a terminológia AM sú štandardizované v norme ISO/ASTM 52900 [2; 3].

Postup pri AM je vo veľa prípadoch rovnaký: 1) vytvorenie 3D CAD modelu 2) konvertovanie do potrebného formátu na 3D tlač 3) rozdelenie modelu na vrstvy a generovanie dráh podľa danej tlačiarne a 4) samostatnú výrobu, ktorá zahŕňa tepelné spracovanie, odstránenie podpôr a povrchové úpravy [4].

3D tlačené štruktúry výstuže používajú ako architektované výstužné prvky v cementových kompozitoch. Tieto polymérne výstuže môžu meniť mechanizmus prenosu napätí, ovplyvňovať iniciáciu alebo šírenie trhlin. Ich spolupôsobením sa môže zlepšiť správanie v ohybe alebo únave.

V tejto práci je AM vnímaná ako nástroj, ktorý nám umožňuje navrhnuť výstuž s kontrolovateľnou geometriou (šesťuholníková štruktúra) a následne analyzovať, ako táto geometria mení napäťové pole a mechanizmus porušenia pri únave a trojbodovom ohybe v betóne a v polyméri. V kombinácii s numerickou analýzou môže viesť ku návrhu efektívnejších výstuží pre cementové kompozity[5].



Obr. 3.1 : Rozdelenie aditívnej výroby [6]

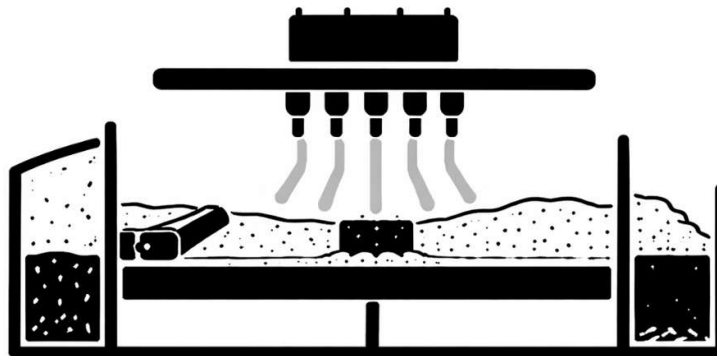
Na Obr. 3.1 je schematická klasifikácia aditívnych výrobných procesov podľa skupenstva spracovávaného materiálu. Aditívne výrobné technológie sú rozdelené na tekutinové, pevné a práškové procesy, ktoré sú ďalej členené podľa dominantného fyzikálneho mechanizmu spracovania materiálu (tavenie, polymerizácia, rezanie alebo spájanie) a konkrétnych technologických metód [6].

3.1.1. Powder bed fusion (PBF)

Pri tomto spôsobe aditívnej výroby, sa používa materiál v práškovej forme. Na platformu sa naniesie prášok vo veľmi tenkej vrstve a za pomoci laserového vysielača sa taví podľa sklenej teploty daného materiálu. Materiál je v týchto miestach tavený, čím sa vyplní prierez prvku, po dokončení každej vrstvy sa plošina znižuje a cyklus sa opakuje ďalej [2]. Pre polyméri sú v PBF dva druhy technológie, ktoré sa používajú : Selective laser sintering (SLS) a Multi jet fusion (MJF)[7]. Pri tejto výrobe nám dané vrstvy vytvárajú podporu, takže počas výroby netreba modelovať výstupy na tlač. Výhodu to má hlavne pri návrhu komplexných geometrických prvkoch a štruktúr.

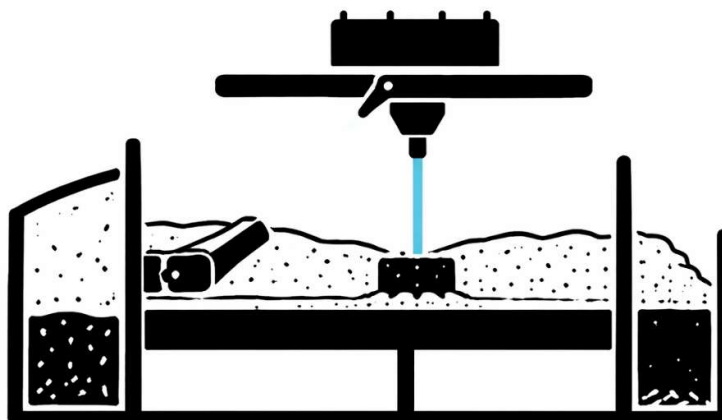
PBF majú dobrú rovnomernú presnosť a vytvárajú materiály, ktoré majú relatívne homogénne mechanické vlastnosti v porovnaní s ostatnou aditívnou výrobou. Nevýhodou sú vysoké náklady na výrobu, nároky na manipuláciu s práškovým materiálom a zmena vlastností prášku pri opakovanom použití. PBF sa používa hlavne v sériovej výrobe plastových dielov a v prvkoch kde je požadovaná veľmi vysoká geometrická presnosť [8].

Multi jet fusion (MJF) je najmodernejšia AM, ktorá patrí do PBF. Je určená predovšetkým na výrobu funkčných polymérnych dielov. Na rozdiel od ostatných druhov PBF sa pri MJF nepoužíva priamo laserový lúč na priame tavenie prášku, ale pracuje na princípe selektívneho nanášania fúzných a detailovacích činidiel na danú práškovú vrstvu. Na rozdiel od ostatných sa najskôr naniesie celá plocha a následne je vystavená tepelnému žiareniu, kde dochádza k spájaniu materiálov len v oblastiach, na ktorých je nanesené činidlo. Tavením celej plochy naraz nám táto metóda vedie k oveľa vyššej produktivite a kratším výrobným časom v porovnaní s ostatnými. Diely vyrobené metódou MJF vykazujú vysokú hustotu, lepšie mechanické vlastnosti a jemnejší povrch. Metóda MJF sa používa hlavne v automobilovom priemysle a presne funkčných technických dieloch [9].



Obr. 3.2 Multi jet fusion [6]

Selective laser sintering (SLS) prvok sa vyrába selektívnym laserovým lúčom, ktorý taví presné miesto styku s polymérnym práškom. Proces prebieha tak, že na pracovnú plochu je nanosená tenká vrstva prášku, ktorú laserový lúč lokálne zahrieva a speká v miestach zodpovedajúcich prierezu dielu. Po dokončení jednej vrstvy sa pracovná plošina zníži a na ňu sa naniesie ďalšia vrstva prášku, pričom celý cyklus sa opakuje až do vytvorenia kompletného dielu. Metóda SLS sa používa hlavne pre výrobu funkčných technických dielov, zdravotníckych výrobkov a pre prototypy kde je požadovaný estetický vzhľad [7].



Obr. 3.3: Selective laser sintering [6]

Z pohľadu využitia 3D tlačných polymérnych výstuží v betónových alebo maltových telesách majú technológie PBF, konkrétne SLS a MJF, niekoľko významných výhod, ale aj obmedzení. Medzi hlavné prínosy PBF patrí možnosť výroby geometricky veľmi zložitých architektovaných štruktúr (napr. bunkových alebo metamateriálových výstuží) bez potreby podpier, čo je výhodné najmä pri návrhu nepravidelných alebo priestorových výstužných prvkov. Vďaka tomu možno presne definovať topológiu výstuže a jej lokálne tuhosti.

Na druhej strane sú polymérne materiály spracovávané technológiami SLS a MJF obmedzené predovšetkým na polyamidové prášky, ktoré vykazujú iné mechanické správanie než polyméry bežne používané vo FFF technológii (napr. PETG). Okrem toho sú PBF technológie charakteristické vyššími výrobnými nákladmi, náročnou manipuláciou s práškom a obmedzenou dostupnosťou materiálových variantov, čo môže byť limitujúce pri experimentálnom výskume a pri rýchlej modifikácii návrhu výstuže.

V kontexte výstuže ukladanej do cementovej matrice zohráva významnú úlohu aj rozhranie polymér–betón, kde je dôležitá povrchová textúra výstuže a schopnosť prenášať napätie prostredníctvom mechanického zaklinenia alebo adhézie. Hoci PBF technológie umožňujú dosiahnuť relatívne homogénne vlastnosti materiálu, ich uplatnenie pri polymérnych výstužiach v betóne je v porovnaní s technológiou FFF zatiaľ menej rozšírené. Z týchto dôvodov je pre účely tejto práce ako vhodnejšia technológia zvolená FFF, ktorá poskytuje širšiu materiálovú variabilitu, jednoduchšiu výrobu

experimentálnych vzoriek a možnosť cielene ovplyvňovať anizotropiu a geometriu výstuže.

3.1.2. Material extrusion (ME)

Technológie založené na princípe material extrusion (ME) predstavujú skupinu aditívnych výrobných procesov, pri ktorých je materiál kontinuálne vytlačávaný cez trysku a ukladá po definovanej dráhe do jednotlivých vrstiev. Tvar výsledného dielu je určený riadeným pohybom trysky alebo stavebnej platformy podľa dát z digitálneho modelu. ME patrí medzi najrozšírenejšie kategórie aditívnej výroby najmä v oblasti polymérnych materiálov, a to vďaka svojej technologickej jednoduchosti, dostupnosti zariadení a širokej škále spracovateľných termoplastov [2; 10].

Z hľadiska vstupného materiálu môže ME pracovať s filamentom, granulátom alebo pastovitým materiálom, pričom konkrétna implementácia technológie určuje výsledné vlastnosti dielu a oblasti použitia. Typickým znakom ME procesov je vrstvená štruktúra výtlaku, ktorá má zásadný vplyv na mechanické správanie dielov, najmä na vznik anizotropie vlastností v závislosti od smeru ukladania materiálu a kvality spojenia medzi jednotlivými vrstvami. V oblasti výskumu a prototypovania sa material extrusion uplatňuje najmä tam, kde je potrebná rýchla zmena geometrie, nízke výrobné náklady a flexibilita návrhu [10].

Fused Filament Fabrication (FFF) je najrozšírenejšou a najviac preskúmanou technológiou v rámci kategórie material extrusion. Pri tejto metóde je ako vstupný materiál použitý termoplastický filament, ktorý je kontinuálne posúvaný do vyhrievanej trysky, kde sa taví a následne ukladá do vrstiev na stavebnú platformu. Postupným ukladáním jednotlivých vrstiev vzniká trojrozmerný diel definovaný digitálnym modelom. V odbornej literatúre je technológia FFF často označovaná ako generický pojem ekvivalentný historickému názvu FDM, pričom termín FFF je preferovaný v akademickom prostredí a normalizovanej terminológii.

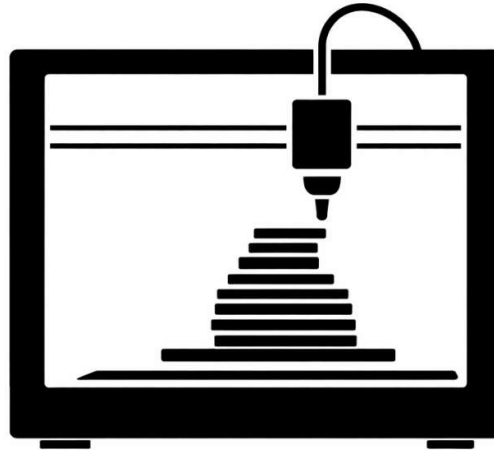
Z technologického hľadiska je FFF charakteristická diskretným ukladáním jednotlivých dráh extrudovaného materiálu (tzv. roads), ktoré sa v rámci jednej vrstvy spájajú laterálnym zvarom a medzi vrstvami vertikálnym zvarom. Výsledné mechanické vlastnosti dielu sú preto výrazne ovplyvnené kvalitou tohto medzivrstvového a

medzidráhového spojenia. Vytváranie pevného rozhrania je riadené najmä procesmi tepelnej difúzie a previazania polymérnych reťazcov v čase, keď je materiál nad teplotou sklovitého prechodu. Nedostatočné tepelné podmienky alebo nevhodné procesné parametre môžu viesť k vzniku pórov, oslabených rozhraní a výrazného rozptylu mechanických vlastností [11].

Jedným z hlavných dôsledkov vrstveného charakteru technológie FFF je anizotropia mechanických vlastností, pričom tuhosť a pevnosť v smere ukladania filamentu sa spravidla líšia od vlastností v smere kolmom na vrstvy. Tento jav je v kontexte numerického modelovania a analýzy napäťových polí mimoriadne dôležitý, pretože si vyžaduje použitie ortotropných alebo anizotropných materiálových modelov namiesto zjednodušeného izotropného prístupu. Zároveň práve možnosť kontrolovať smer ukladania materiálu predstavuje výhodu, keďže návrhom orientácie filamentov možno cielene ovplyvniť rozloženie napätí v konštrukcii.

Z pohľadu aplikácií je FFF mimoriadne vhodná technológia na výrobu experimentálnych a funkčných prvkov, pri ktorých je rozhodujúca geometria, vnútorná štruktúra a možnosť rýchlej modifikácie návrhu. V porovnaní s práškovými PBF technológiami umožňuje FFF spracovanie širšej škály polymérov, vrátane materiálov ako PLA, ABS, PETG alebo TPU, pričom zmena materiálu alebo geometrie výstuže nevyžaduje zásadné zásahy do výrobného procesu. Táto flexibilita je kľúčová najmä pri výskumných úlohách, kde sa analyzuje vplyv tvaru výstuže, jej výšky alebo topológie na vznik a distribúciu napäťového poľa [12].

V kontexte tejto diplomovej práce je technológia FFF zvolená ako hlavná výrobná metóda polymérnej výstuže, pretože umožňuje presnú kontrolu geometrie architektovanej výstuže, jednoduchú prípravu vzoriek a dobrú reprodukovateľnosť experimentov. Kombinácia FFF výroby, experimentálneho testovania v ohybe a numerickej analýzy tak vytvára vhodný rámec na štúdium interakcie medzi betónovou maticou a 3D tlačenou polymérnou výstužou.



Obr. 3.4 Fused filament fabrication [6]

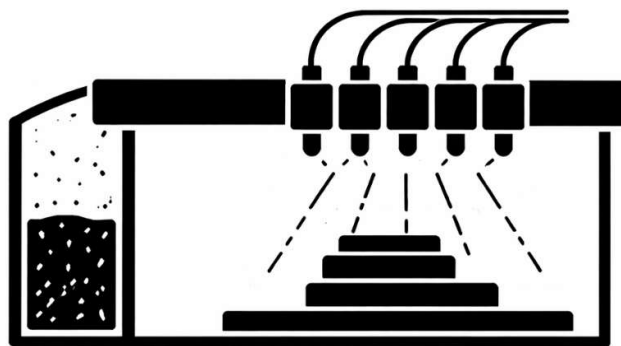
3.1.3. Material jetting (MJ)

Material Jetting (MJ) je aditívna výrobná technológia založená na selektívnom nanášaní kvapiek kvapalného fotopolymérneho materiálu na stavebnú platformu, pričom každá nanesená vrstva je okamžite vytvrdzovaná pomocou ultrafialového žiarenia. Proces je svojím princípom podobný atramentovej tlači, avšak namiesto atramentu sú využívané špeciálne fotopolymérne živice určené na rýchlu polymerizáciu. Vďaka tomuto spôsobu nanášania materiálu je možné dosiahnuť veľmi vysoké rozlíšenie tlače, jemné detaily a kvalitnú povrchovú úpravu výsledných dielov [2].

Jednou z hlavných výhod technológie MJ je možnosť viacmateriálovej tlače v rámci jednej vrstvy, čo umožňuje kombinovať materiály s odlišnými mechanickými alebo optickými vlastnosťami v jednom výrobku. Táto vlastnosť nachádza uplatnenie najmä pri výrobe funkčných prototypov, modelov s gradientnými vlastnosťami alebo dielov vyžadujúcich kombináciu tuhých a pružných oblastí. Okrem toho dosahujú diely vyrobené technológiou MJ vysokú rozmerovú presnosť a minimálnu drsnosť povrchu, čo často eliminuje potrebu dodatočného obrábania [13].

Na druhej strane je použitie technológie MJ limitované predovšetkým materiálom, keďže spracovávané fotopolyméry často nevykazujú dlhodobú mechanickú stabilitu porovnateľnú s termoplastmi. Materiály môžu byť citlivé na UV žiarenie, teplotu a vlhkosť, čo obmedzuje ich použitie v nosných alebo dlhodobo zaťažených aplikáciách.

Z týchto dôvodov sa technológia MJ uplatňuje predovšetkým v oblasti prototypovania, dizajnu, medicíny a vizualizačných modelov, zatiaľ čo pre konštrukčné aplikácie, pri ktorých je rozhodujúce mechanické správanie a únava materiálu, sa častejšie využívajú iné aditívne technológie, ako je FFF alebo PBF [7].



Obr. 3.5 Material jetting [6]

3.2. Princíp 3D tlače

Technológia FFF bola v tejto práci zvolená ako hlavná metóda výroby polymérnej výstuže z dôvodu jej vysokej flexibilitnosti, dostupnosti a schopnosti presne kontrolovať vnútornú geometriu a smerové usporiadanie materiálu. FFF umožňuje cielene ovplyvňovať orientáciu filamentov, hustotu výplne a tvar architektovanej štruktúry, čo je kľúčové pri štúdiu vplyvu geometrie a materiálovej anizotropie na rozloženie napätových polí v ohybom namáhaných betónových telesách.

V porovnaní s inými aditívnymi technológiami ponúka FFF širšiu materiálovú variabilitu a umožňuje spracovanie polymérov, ako je PETG, ktoré kombinujú dostatočnú pevnosť s vyššou deformovateľnosťou. Práve táto vlastnosť je výhodná pri návrhu výstuže, ktorej úlohou nie je len zvýšenie únosnosti, ale aj redistribúcia napätí a stabilizácia šírenia trhlin v cementovej matrici.

Ďalšou významnou výhodou technológie FFF je možnosť jednoduchej a rýchlej modifikácie geometrie výstuže bez zásadných výrobných obmedzení. To umožňuje experimentálne porovnávať rôzne tvary, výšky a vnútorné štruktúry výstuže, ako aj analyzovať najkritickejšie usporiadania materiálu, napríklad orientáciu filamentov kolmo na smer hlavných ťahových napätí. Takýto prístup je mimoriadne vhodný pre numerickú

analýzu napätových polí a pre validáciu výpočtových modelov na základe experimentálnych výsledkov.

Zvolením technológie FFF tak táto práca využíva výrobnú metódu, ktorá umožňuje nielen realizáciu fyzických experimentov, ale aj systematické prepojenie výrobných parametrov, mechanického správania materiálu a numerického modelovania. FFF preto nepredstavuje iba technologický prostriedok výroby vzoriek, ale aj dôležitý nástroj na skúmanie interakcie medzi polymérnou výstužou a betónovou matricou z hľadiska rozloženia napätí a mechanizmov porušenia.

4. Materiály

Táto kapitola sa zameriava na prehľad materiálov používaných v práci, so špeciálnym dôrazom na polymérne materiály a ich uplatnenie v oblasti aditívnej výroby. Vzhľadom na to, že mechanické správanie kompozitných systémov výrazne závisí od vlastností výstuže, je nevyhnutné detailne charakterizovať nielen samotné polyméry, ale aj ich vnútornú štruktúru a spôsob výroby. Osobitná pozornosť je venovaná metamateriálom, ktorých výsledné vlastnosti nevyplývajú primárne z chemického zloženia, ale z architektúry ich vnútornej geometrie.

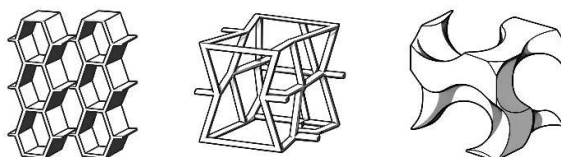
V ďalších podkapitolách sú najskôr predstavené mechanické metamateriály a ich základné typy, následne sú rozobraté vybrané polymérne materiály vhodné pre technológiu FFF. Dôraz je kladený na materiály PLA, ABS, HIPS a PETG, pričom osobitná pozornosť je venovaná materiálu PETG ako hlavnému skúmanému polyméru v tejto práci. Charakteristika materiálov je zameraná najmä na ich mechanické vlastnosti, správanie pri ťahovom a ohybovom namáhaní a na vplyv výrobných parametrov na výsledné vlastnosti výtlačkov.

4.1. Metamateriály

Metamateriály sú umelo navrhnuté materiály, ktoré nevyplývajú zo žiadneho chemického zloženia, ale z vnútornej geometrickej štruktúry. Používajú sa na manipuláciu a kontrolu fyzikálnych javov, čo sa nedá dosiahnuť žiadnym iným prírodným materiálom. Sú vhodné na rôzne použitia pretože odlišujú svoje vlastnosti od klasickým materiálov. Väčšinou, ale nie pre všetky prípady majú veľmi špecifické vlastnosti, ktorými sú: ultraľahkosť, veľmi nízka hustota, záporný Poissonov koeficient, záporná tuhosť alebo záporná tepelná rozťažnosť. Tieto vlastnosti nám vytvárajú nový spôsob akým tieto materiály možno využiť. Na základe týchto vlastností sa rozdeľujú na mechanické, tepelné, elektromagnetické a akustické [14].

Mechanické metamateriály sa taktiež nazývajú štrukturálne metamateriály, kvôli tomu, že sa práve ich vlastnosti odvíjajú od jeho štruktúry. Mechanické metamateriály sa rozdeľujú na periodické a stochastické [14]. Stochastické (náhodné) metamateriály nemajú dokonale periodickú makroštruktúru, čo znamená, že sa v bunkách náhodne

menia hrúbky, uhli, veľkosti či posuny. Väčšinou je generovaná úplne náhodným procesom. (Monte Carlo, stochastická homogenizácia) Periodické metamateriály majú naopak opakujúce sa jednotlivé bunky v pravidelnom rasti. Ich vlastnosti sa dajú meniť geometriou buniek a relatívnou hustotou. Kvôli opakujúcim sa bunkám sú veľmi jednoduché na modelovanie a majú predvídateľnejšie správanie [15].



Obr. 4.1: Druhy mechanických metamateriálov a) štruktúra na báze hrebeňa b) mriežková štruktúra c) TPSM štruktúra

Ďalej sa podľa tvaru štruktúry rozdeľujú na hrebeňové, vzperové, doskové a trojnásobne minimálne povrchy (TPSM). Štruktúry na báze hrebeňa (Obr. 4.1 a) sú tenké vertikálne steny, ktoré sú duté a tvarované ako šesťuholníkové (HEX), štvorcové alebo trojuholníkové vzory. Podľa tvaru a veľkosti sa môžu líšiť vlastnosti a použitie. Mriežkové štruktúry (Obr. 4.1 b) majú nízky pomer materiálu k objemu a taktiež majú minimálne zakrivenie. Štruktúry TPSM (Obr. 4.1 c) naopak dosahujú veľký pomer materiálu k objemu a vysoké zakrivenie vďaka tomu sa využívajú hlavne na výrobu tkanív [14].

V tejto práci sa ďalej budeme zaujímať iba mechanickým metamateriálom na báze hrebeňa, konkrétne so šesťuholníkovým tvarom (HEX).

4.2. Polymérne materiály

Polymérne materiály predstavujú v súčasnosti jednu z najvýznamnejších skupín materiálov využívaných v aditívnej výrobe, najmä v technológii FFF. Ich široké uplatnenie vyplýva z priaznivej kombinácie mechanických vlastností, spracovateľnosti a možnosti prispôbovania výsledných vlastností prostredníctvom zmien materiálového zloženia a technologických parametrov tlače. V porovnaní s tradičnými konštrukčnými materiálmi vykazujú polyméry výraznejšiu závislosť mechanického správania od výrobného procesu, vnútornej štruktúry a orientácie jednotlivých vrstiev.

Nasledujúce podkapitoly sa zameriavajú na charakteristiku vybraných polymérnych materiálov bežne používaných v aditívnej výrobe, konkrétne materiálov PLA, ABS, HIPS a PETG. Jednotlivé materiály sú hodnotené z hľadiska ich chemického zloženia, mechanických vlastností, spracovateľnosti a vhodnosti pre použitie ako polymérna výstuž v betónových telesách. Osobitná pozornosť je venovaná materiálu PETG, ktorý je v tejto práci použitý ako hlavný skúmaný materiál a ktorého vlastnosti tvoria základ pre experimentálne aj numerické analýzy.

4.2.1. Polylactic acid (PLA)

PLA patrí medzi najbežnejšie dostupné materiály pri aditívnej technológii najmä pre jeho dobrú tlačiiteľnosť a stabilitu. Jedná sa o biologicky rozložiteľný materiál práve kvôli jeho organickému zloženiu. Často sa jedná o výrobok z monoméru kyseliny mliečnej, fermentačných produktov cukrovej suroviny [16]. Počas životnosti PLA sa menia jej mechanické vlastnosti, kvôli tepelným, oxidačným alebo fotodegradačným procesom počas životnosti. Polyméri podliehajú hydrolíznej degradácii v dôsledku vlhkosti, pretože molekuly vody difundujú do PLA a spôsobujú štiepenie primárnych reťazcov. Pre zlepšenie mechanických vlastností a zníženiu ceny produktu sa často do matice PLA pridávajú plnivá, ktoré sú tiež na organickej báze pre zachovanie rozložiteľnosti. Jedno z častých plnív je vaječná škrupina alebo šupky pohánky a cibule [17].

Mechanické vlastnosti PLA veľmi závisia od nastavení tlače (orientácia, raster, teplota) a medzi vrstvom spojenia. Fyzikálne vlastnosti sa dajú prispôsobiť úpravou materiálu. Pre polyméri je teplota skleného prechodu 60-70 a bod topenia je 170-180, práve kvôli tomu pri nich nedochádza k strate plasticity a húževnatosti [18].

4.2.2. Akrylonitril–butadién–styrén (ABS)

ABS je termoplastický materiál, ktorý sa skladá z troch monomérov: akrylonitril, butadién a styrén. Akrylonitril má za úlohu zvyšovať odolnosť, tvrdosť a pevnosť. Butadién je elastická zložka, ktorá zvyšuje nárazuvzdornosť a húževnatosť a styrén prispieva na zlepšovanie spracovateľnosti a pevnosti [19]. Má vysokú chemickú odolnosť a veľmi dobrú mechanickú pevnosť a odolnosť. Na rozdiel od PLA je oveľa odolnejší na teplo, ale pri vysokej teplote vypúšťa škodlivé výpary. Pri práci s ním je dôležité byť vo vetranom priestore. Kvôli vyššej odolnosti na teploty je práca s ním o niečo zložitejšia

a sťažuje to výrobu menších prvkov. Pre túto nevýhodu sa využíva hlavne v experimentoch, ktoré požadujú vysokú odolnosť na nárazy alebo vysoké teploty [20].

4.2.3. High impact Polystyrene (HIPS)

HIPS je typ polymérneho materiálu, ktorý sa skladá z dvoch častí. Voľná polystyrénová časť, ktorá dáva materiálu tvarovú stabilitu, tuhosť a pevnosť. Taktiež umožňuje lepšie spracovanie a prenáša hlavné mechanické zaťaženia. Gumové častice absorbujú energiu pri náraze, zabráňujú šíreniu trhlín a v celkovom zložení s polystyrénom umožňujú plastickú deformáciu namiesto krehkého lomu [21].

4.2.4. Polyethylene terephthalate glycol-modified (PETG)

Polyetyléntereftalát (PET) predstavuje jeden najrozšírenejších plastových materiálov na celosvetovej úrovni. Jeho uplatnenie nájdeme takmer v každej oblasti od obalových materiálov (fľaše, potravinové obaly) až po textilný priemysel vo forme syntetických látok.

PETG predstavuje modifikovaný PET materiál, pričom „G“ poukazuje na prítomnosť glykolovej zložky začlenenej do polymérneho reťazca počas polymerizačného procesu. Táto chemická modifikácia vedie k zmenám kryštalickej štruktúry polyméru, čo má za následok zvýšenú optickú čírosť, vyššiu húževnatosť a zníženú krehkosť materiálu v porovnaní s konvenčným PET. Významnou vlastnosťou PETG je vysoká odolnosť proti nárazu, ktorá výrazne prevyšuje základnú formu PET a rozširuje možnosti jeho technického využitia [22]. Z chemického hľadiska je PETG klasifikovaný ako kopolymér poly etyléntereftalátu a 1,4-cyklohexyléndimetyléntereftalátu. V oblasti aditívnej výroby tento materiál kombinuje mechanickú pevnosť, húževnatosť a relatívne vyššiu tepelnú stabilitu typickú pre materiál ABS so spracovateľskými vlastnosťami a jednoduchosťou tlače charakteristickou pre PLA [23][24]. PETG sa vyznačuje výbornou adhéziou medzi jednotlivými vrstvami, nízkou mierou zmrštenia a relatívne malou náchylnosťou na deformácie typu warping, čo prispieva k dobrej rozmerovej stabilite výtlačkov. Z hľadiska technologického procesu 3D tlače sa však v praxi ukazuje, že PETG nepatrí medzi úplne najjednoduchšie materiály na spracovanie. Dosiahnutie optimálnej kvality výtlačkov si spravidla vyžaduje precízne nastavenie tlačových parametrov, najmä teploty trysky, rýchlosti tlače a intenzity chladenia. V porovnaní s materiálom PLA je preto často nevyhnutná zvýšená miera experimentovania, aby sa eliminovali nežiaduce javy, ako sú

nadmerná vláknitosť, zhoršená kvalita povrchu alebo problémy s príľnavosťou výtlaku k podložke.

Experimentálne dáta k mechanickým vlastnostiam materiálu PETG použité v tejto práci boli prevzaté z publikácie [25] od Thomas Romeijn, Michael Behrens, Gavin Paul, Dongbin Wei. Experiment bol robený na 3 druhoch vzoriek E1, E2, E3 (Obr. 4.2), kde E1 má rovnobežne tlačené vlákna, E2 má kolmo tlačené vlákna a E3 je kolmý na rovinu vrstiev.



Obr. 4.2: Testované vzorky [25]

Testy prebiehali na 8 vzorkách z každého druhu. Experimentálne merania (označené ako E1–E3) poskytli závislosti ťahovej sily od vertikálneho posunu získané pomocou univerzálneho ťahového zariadenia, ako aj pozdĺžne a priečne posuny bodov na povrchu vzoriek zaznamenané metódou digitálnej obrazovej korelácie (DIC). Jednotlivé výsledky boli zosúladené vzhľadom na bod porušenia vzorky, ktorý slúžil ako referenčný bod. Napätie a pomerná deformácia boli vypočítané v súlade s normou ASTM D3039. Lineárna regresia bola aplikovaná v intervale pomernej deformácie 0,002 až 0,004 s cieľom stanoviť Youngov modul pre jednotlivé vzorky. Hodnoty Youngovho modulu získané z piatich skúšobných vzoriek boli následne spriemerované v závislosti od smeru materiálu. Súčasťou vyhodnotenia bola aj stanovená hodnota koeficientu variácie (CoV), ktorá charakterizuje rozptyl nameraných dátových bodov okolo ich priemernej hodnoty. Poissonove čísla ν_{ij} popisujú väzbu priečných deformácií jednotlivých smeroch ortotropného 3D-tlačeného PETG, pričom ich rozdielne hodnoty odrážajú anizotropiu spôsobenú smerom ukladania filamentov a kvalitou medzivrstvového spojenia [25].

Tabuľka 1: Youngov modul pre experimenty E1, E2, E3 [25]

Konštanta	Youngov modul (Mpa)	CoV (%)
E ₁	1898.7	2.98
E ₂	1272.4	28.07
E ₃	1894.8	3.07

Tabuľka 2: Poissonov súčiniteľ pre experimenty E1, E2, E3 [25]

Konštanta	Poissonov s.	CoV (%)
ν_{12}	0.401	4.6
ν_{23}	0.373	23.77
ν_{13}	0.461	11.91

4.3. Porovnanie

Jedným z kľúčových aspektov AM technológie FFF je skutočnosť, že výsledný materiál nie je homogénny ani izotropný, ale vykazuje výraznú smerovú závislosť mechanických vlastností. Táto anizotropia vyplýva priamo z princípu výroby, kde je materiál ukladán vo forme samostatných extrudovaných dráh a vrstiev. Mechanické správanie výtlačku je preto riadené nielen vlastnosťami samotného polyméru, ale aj orientáciou filamentov, kvalitou zvárania medzi susednými dráhami a pevnosťou medzivrstvového spoja.

Pri numerickom modelovaní 3D tlačenej polymérnej výstuže vyrobenej technológiou FFF je z tohto dôvodu nevyhnutné uvažovať ortotropný materiálový model, v ktorom sú mechanické vlastnosti definované samostatne v jednotlivých hlavných smeroch. Typicky sa rozlišuje smer ukladania filamentu, smer kolmo na filamenty v rovine vrstvy a smer kolmý na rovinu vrstiev. Takýto prístup umožňuje vernejšie zachytiť rozdielnú tuhosť a deformáciu výstuže v závislosti od zaťažovacieho smeru, čo je zvlášť dôležité pri analýze kompozitných systémov, v ktorých polymérna výstuž spolupracuje s krehkou cementovou maticou.

Experimentálne dáta k mechanickým vlastnostiam materiálu PETG použité v tejto práci boli prevzaté z publikácie [26] od Shkundalova Olena, Arvydas Rikmund a Viktor Gribniak a [27] od Alberto Saldaña-Robles, Alexis Sánchez-Angeles, Antonio de J. Balvanti-García, Diego A. Núñez-Altamirano a Gustavo Capilla-González.

4.3.1. Ťahová skúška

Ťahová skúška predstavuje základnú metódu charakterizácie mechanických vlastností polymérnych materiálov vyrábaných technológiou FFF. Vzhľadom na vrstvený charakter

výroby je správanie materiálu v ťahu výrazne ovplyvnené orientáciou filamentov, hustotou výplne a kvalitou medzi vrstvomého spoja. Tieto vplyvy sa pri materiáloch spracovaných technológiou FFF prejavujú výraznejšou anizotropiou v porovnaní s konvenčnými technológiami spracovania polymérov. Experimentálne údaje prevzaté z publikácií [26] a [27] ukazujú, že mechanické vlastnosti materiálu PETG sa môžu v závislosti od výrobnjej konfigurácie pohybovať v širokom rozsahu. V publikácii [26] boli namerané priemerné hodnoty pevnosti v ťahu približne 13,9 MPa a Youngovho modulu 1,5 GPa, pričom tieto hodnoty predstavujú základnú charakteristiku materiálu pri štandardnej konfigurácii tlače.

Tabuľka 3: Prehľad mechanických vlastností daných polymérov získaných z ťahovej skúšky [26]

Materiál	Pevnosť v ťahu [MPa]	Modul pružnosti E [GPa]
PLA	37,74	2,71
ABS	13,53	5,75
PETG	13,85	1,55
HIPS	5,85	1,54

Výsledky uvedené vyššie (Tabuľka 3) predstavujú základné porovnanie mechanických vlastností polymérnych materiálov vyrábaných technológiou FFF pri jednotnej konfigurácii tlače. Najvyššiu pevnosť a tuhosť vykazuje materiál PLA, čo poukazuje na jeho tuhý, avšak krehkejší charakter. Materiály ABS a PETG dosahujú porovnateľné hodnoty pevnosti v ťahu, pričom PETG vykazuje nižší modul pružnosti, čo naznačuje vyššiu deformovateľnosť. Materiál HIPS dosahuje najnižšie hodnoty pevnosti a tuhosti, čo obmedzuje jeho použitie v konštrukčne namáhaných aplikáciách. Hodnoty predstavujú referenčnú charakteristiku materiálov bez zohľadnenia vplyvu.

Tabuľka 4: Rozsah mechanických vlastností materiálov PLA, ABS a PETG stanovených ťahovou skúškou pri rôznych kombináciách parametrov technológie FFF [27]

Materiál	Pevnosť v ťahu [MPa]	Modul pružnosti E [GPa]
PLA	18 – 62	1,8 – 3,6
ABS	12 – 42	1,2 – 2,5
PETG	4 - 51	0,76 – 2,15

Z porovnania výsledkov uvedených v Tabuľka 4 je zrejmé, že jednotlivé polymérne materiály vyrábané technológiou FFF dosahujú odlišné hodnoty mechanických vlastností aj pri rovnakom type skúšky. Materiál PLA vykazuje vo všeobecnosti vyššiu tuhosť a pevnosť v ťahu, avšak s krehkejším charakterom porušenia. Naopak, ABS a PETG

vykazujú nižší modul pružnosti, pričom PETG sa vyznačuje výraznejšou deformovateľnosťou a širším rozsahom dosiahnuteľných hodnôt pevnosti v závislosti od výrobných parametrov.

Tieto rozdiely potvrdzujú, že mechanické vlastnosti FFF výtlačkov nemožno považovať za univerzálne materiálové konštanty, ale musia byť vždy interpretované v kontexte konkrétneho materiálu a výrobnjej konfigurácie. Z hľadiska návrhu polymérnej výstuže v betóne je preto nevyhnutné uvažovať nielen voľbu materiálu, ale aj jeho orientáciu a vnútornú štruktúru, ktoré spoločne určujú výsledný prenos napätia.

Ďalej, výsledky uvedené v publikácii [27] poukazujú na výrazný vplyv parametrov tlače. Pevnosť v ťahu PETG sa v tomto prípade pohybovala v rozsahu približne 4 až 51 MPa, pričom najvyššie hodnoty boli dosiahnuté pri orientácii výplne 0° a plnej hustote výplne. Pri nevhodnej orientácii výplne (90°) a nízkej hustote výplne došlo k výraznému poklesu pevnosti, čo je možné pripísať zaťažovaniu rozhraní medzi vrstvami namiesto kontinuálneho materiálu.

Pre porovnanie boli v rámci ťahovej skúšky hodnotené aj ďalšie materiály vyrábané technológiou FFF, konkrétne PLA a ABS. Materiál PLA vykazoval najvyššiu pevnosť v ťahu približne 38 MPa a zároveň výrazne vyšší modul pružnosti v porovnaní s PETG, čo poukazuje na jeho vyššiu tuhosť, ale aj krehkejší charakter. Materiál ABS dosahoval pevnosť v ťahu porovnateľnú s PETG, avšak s vyšším modulom pružnosti, čo naznačuje tuhšie, ale menej duktilné správanie.

Z pohľadu použitia polymérnej výstuže v betóne je dôležité konštatovať, že hoci PETG v porovnaní s PLA vykazuje nižšiu tuhosť, jeho výrazne vyššia deformovateľnosť a citlivosť na orientáciu filamentov umožňujú cielene ovplyvňovať prenos ťahových napätí. To je výhodné najmä pri návrhu architektovaných výstuží, kde materiál neslúži len na zvýšenie únosnosti, ale aj na redistribúciu napätového poľa.

4.3.2. Ohybová skúška

Ohybová skúška poskytuje komplexnejší pohľad na správanie polymérnych materiálov, keďže kombinuje účinky ťahových, tlakových a šmykových napätí. V publikácii [27] bola ohybová skúška realizovaná ako štvorkolíkový ohyb podľa normy ASTM D6272, pričom boli hodnotené vplyvy orientácie výplne, hustoty výplne a rýchlosti tlače na mechanické správanie skúšaných vzoriek.

Výsledky pre materiál PETG ukazujú, že maximálne ohybové napätie dosahovalo hodnoty v rozsahu približne 12 až 54 MPa, pričom priemerná hodnota sa pohybovala okolo 35 MPa . Najvyššie ohybové napätia boli dosiahnuté pri orientácii výplne 0° a pri plnej hustote výplne, čo korešponduje aj s výsledkami ťahovej skúšky. Pri tejto konfigurácii sú filamenty orientované priaznivo voči hlavným ťahovým napätiam vznikajúcim v spodných vláknach ohybom namáhaného prvku, čím sa dosahuje efektívny prenos napätia.

Pri orientácii výplne 90° a nízkej hustote výplne došlo k výraznému zníženiu ohybovej pevnosti PETG, pričom porušenie bolo iniciované v oblastiach medzivrstvového spoja. Tento jav poukazuje na rozhodujúcu úlohu kvality rozhraní medzi vrstvami pri prenose šmykových a ťahových napätí v ohybe.

Pre porovnanie boli v rámci ohybovej skúšky hodnotené aj materiály PLA a ABS . Materiál PLA vykazoval vyššiu tuhosť a vyššie maximálne ohybové napätia, avšak porušenie prebiehalo náhlejšie a s menšou schopnosťou redistribúcie napätí. Naopak, ABS sa vyznačoval nižšou maximálnou ohybovou pevnosťou, ale mierne duktilnejším správaním v porovnaní s PLA. PETG v tomto porovnaní predstavuje kompromis medzi tuhosťou a deformovateľnosťou, pričom vykazuje schopnosť postupného porušovania a stabilnejšieho priebehu deformácie.

Z hľadiska aplikácie v betónových telesách je správanie materiálu PETG v ohybe mimoriadne významné. Ohybové zaťaženie betónových prvkov vedie k vzniku ťahových napätí v spodnej časti prvku a k rozvoju FPZ. Polymérna výstuž z PETG, najmä pri vhodnej orientácii a geometrii, môže prispieť k zníženiu koncentrácie napätí, k stabilizácii šírenia trhlín a k zvýšeniu duktility kompozitného systému. Výsledky ohybových skúšok tak potvrdzujú vhodnosť PETG ako materiálu pre architektované výstuže vyrábané technológiou FFF [27].

5. Únava materiálov

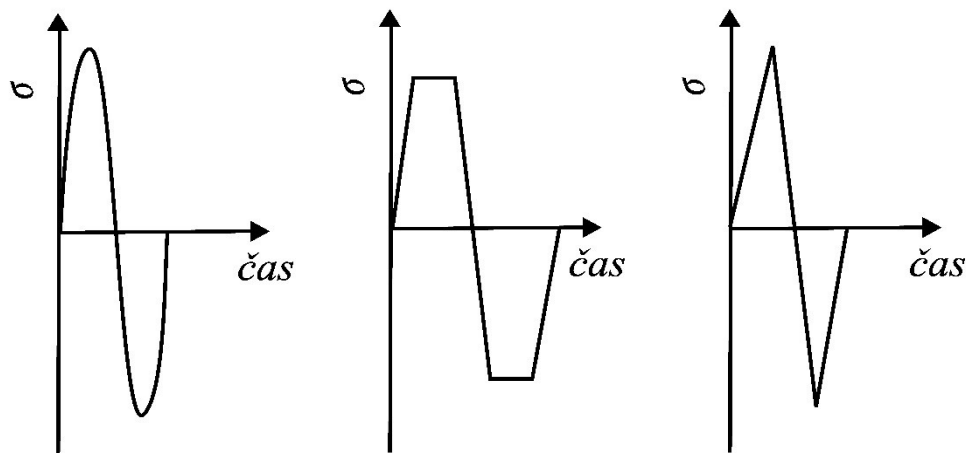
Únava materiálov predstavuje mechanizmus postupného poškodzovania materiálu v dôsledku dlhodobého pôsobenia opakovaných zaťažovacích cyklov. Pri tomto type namáhania dochádza k periodickým zmenám napätového a deformačného stavu v materiáli, čo môže viesť k vzniku a postupnému rozvoju mikrotrhlín, lokalizácii poškodenia a následnému porušeniu konštrukcie aj v prípade, že maximálne dosahované

napätia zostávajú výrazne pod úrovňou krátkodobej statickej pevnosti materiálu. Charakter a priebeh únavového poškodenia je pritom výrazne závislý od typu materiálu, jeho mikroštruktúry, spôsobu prenosu napätia a interakcie jednotlivých fáz v prípade kompozitných systémov. Únavové porušenie je preto typické svojou zdanlivo nenápadnou iniciáciou, avšak s potenciálne závažnými dôsledkami pre spoľahlivosť konštrukcie. Proces únavy je úzko spätý so vznikom a postupným rastom mikrotrhlín v materiálovej štruktúre. Tieto poruchy sa v priebehu cyklického zaťaženia postupne kumulujú, spájajú a môžu prerásť do makroskopických trhlín, ktoré vedú k náhlemu zlyhaniu prvku bez výrazných predbežných deformácií. Charakter únavového poškodenia je silne ovplyvnený typom materiálu, amplitúdou zaťaženia, počtom cyklov a prostredím, v ktorom sa konštrukcia nachádza. Cyklické zaťaženie sa vyskytuje v mnohých technických aplikáciách, napríklad vo forme dopravného zaťaženia, vibrácií strojových zariadení, účinkov vetra alebo vlnobitia, prípadne vplyvom periodických prevádzkových zaťažení. Konštrukcie ako mosty, cestné komunikácie, štíhle nosné systémy alebo priemyselné prvky sú preto počas svojej životnosti vystavené veľkému počtu zaťažovacích cyklov. Z uvedených dôvodov patrí hodnotenie únavovej odolnosti medzi dôležité aspekty návrhu a posudzovania nosných konštrukcií [28].

5.1. Základné princípy

Cyklické zaťaženie predstavuje časovo premenlivý priebeh zaťažovacej veličiny, ktorý sa v pravidelných intervaloch opakuje. Tento typ zaťaženia sa vyskytuje v technickej praxi veľmi často a v mnohých prípadoch má dominantnejší vplyv na životnosť konštrukcie než zaťaženie statické. Typickými príkladmi cyklického pôsobenia sú dopravné zaťaženie mostov, dynamické účinky strojov, aerodynamické účinky vetra alebo periodické prevádzkové zaťaženia konštrukcií.

Pri experimentálnom skúmaní únavy materiálov sa skutočné, často náhodné priebehy zaťaženia zvyčajne nahrádzajú idealizovanými periodickými funkciami, ktoré umožňujú lepšiu reprodukovateľnosť výsledkov a porovnanie jednotlivých skúšok. Najčastejšie sa používa sínusový priebeh, ktorý plynule opisuje striedanie maximálneho a minimálneho napätia v čase. Okrem neho sa v únavových skúškach používajú aj trojuholníkové (pílové) alebo obdĺžnikové priebehy zaťaženia, ktoré sa líšia rýchlosťou zmien napätia v rámci jedného cyklu (pozri obr. 1.1) [29].



Obr. 5.1: funkcie zaťažovacích cyklov (zľava): sínusové, obdĺžnikové, trojuholníkové

Základné časové charakteristiky cyklického zaťaženia sú definované pomocou doby kmitu T , ktorá predstavuje najmenší časový interval, po ktorom sa priebeh zaťaženia opakuje, a frekvencie f , vyjadrujúcej počet cyklov za jednotku času. Medzi týmito veličinami platí vzťah: [29]

$$f = \frac{1}{T} \quad (1)$$

Z hľadiska napäťových charakteristík sa cyklické zaťaženie popisuje pomocou horného napätia σ_h , ktoré predstavuje maximálnu hodnotu napätia v cykle, a dolného napätia σ_d , ktoré zodpovedá minimálnej hodnote napätia. Z týchto veličín je možné odvodiť stredné napätie σ_m , ktoré vyjadruje statickú zložku cyklického zaťaženia:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_h + \sigma_d}{2} \quad (2)$$

Dynamická zložka cyklu je charakterizovaná rozdielom medzi horným a dolným napätím. Tento rozdiel sa označuje ako rozsah napätia $\Delta\sigma$:

$$\Delta\sigma = \sigma_h - \sigma_d \quad (3)$$

Polovica rozsahu napätia predstavuje amplitúdu napätia σ_a , ktorá je jednou zo základných veličín používaných pri hodnotení únavovej životnosti:

$$\sigma_a = \frac{\Delta\sigma}{2} \quad (4)$$

Podľa vzťahu medzi horným, dolným a stredným napätím sa cyklické zaťaženie rozdeľuje na symetrické a asymetrické. Symetrický cyklus je charakterizovaný nulovým stredným napätím, čo znamená, že maximálne ťahové a tlakové napätie majú rovnakú veľkosť. V prípade asymetrického cyklu je stredné napätie nenulové a amplitúdy napätí v ťahu a tlaku sú rozdielne.

Miera asymetrie cyklu sa popisuje pomocou súčiniteľa napätia R , definovaného ako pomer dolného a horného napätia:

$$R = \frac{\sigma_d}{\sigma_h} \quad (5)$$

Ďalším často používaným parametrom je súčiniteľ amplitúdy P , ktorý vyjadruje pomer horného napätia k amplitúde napätia:

$$P = \frac{\sigma_h}{\sigma_a} \quad (6)$$

Medzi oboma parametrami existuje vzťah:

$$P = \frac{2}{(1 - R)} \quad (7)$$

Na základe hodnoty týchto parametrov je možné rozlíšiť rôzne typy asymetrického cyklického zaťaženia, ako sú pulzujúce alebo striedavé cykly v ťahu alebo v tlaku, ktoré majú rozdielny vplyv na mechanizmus únavového poškodenia materiálu.

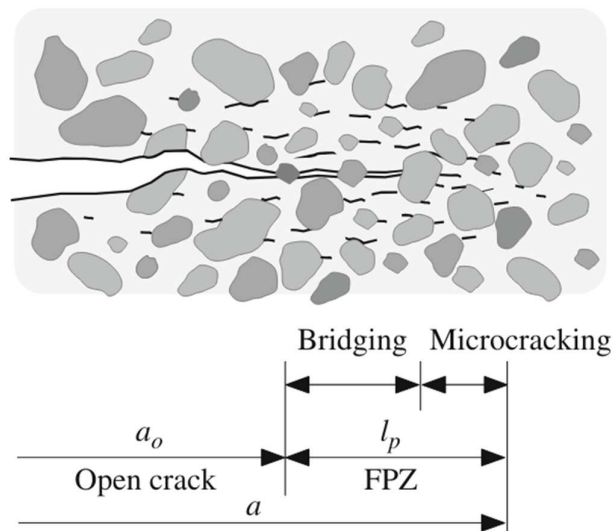
5.2. Únava betónu

Únavové správanie betónových prvkov poukazuje na to, že cyklické zaťaženie samo o sebe spravidla nevedie k okamžitému porušeniu konštrukcie, ale pôsobí ako mechanizmus postupnej degradácie materiálu. Pri opakovanom namáhaní dochádza k akumulácii poškodenia vo forme iniciácie a rastu existujúcich mikrotrhlín, ktoré sa postupne zlučujú a vytvárajú makroskopické trhliny vedúce k poruche prvku. Tieto mikrotrhliny môžu v betóne vzniknúť už v dôsledku výrobných procesov, pôsobenia vlhkosti, teplotných zmien alebo predchádzajúceho mechanického zaťaženia, pričom cyklické namáhanie významne urýchlňuje ich rast a šírenie. Únavové správanie betónových prvkov poukazuje na to, že cyklické zaťaženie samo o sebe spravidla nevedie k okamžitému porušeniu konštrukcie, ale pôsobí ako mechanizmus postupnej degradácie

materiálu. Pri opakovanom namáhaní dochádza k akumulácii poškodenia vo forme iniciácie a rastu existujúcich mikrotrhlín, ktoré sa postupne zlučujú a vytvárajú makroskopické trhliny vedúce k poruche prvku. Tieto mikrotrhliny môžu v betóne vzniknúť už v dôsledku výrobných procesov, pôsobenia vlhkosti, teplotných zmien alebo predchádzajúceho mechanického zaťaženia, pričom cyklické namáhanie významne urýchľuje ich rast a šírenie.

Opakované pôsobenie zaťaženia spôsobuje redistribúciu napätí v okolí existujúcich defektov, čím sa lokálne zvyšuje intenzita napät'ového poľa a podporuje subkritický rast trhlín aj pri úrovniach napätia výrazne nižších ako je statická pevnosť betónu. Z hľadiska únavy tak porušenie betónu nepredstavuje náhly jav, ale výsledok dlhodobého procesu kumulácie poškodenia, ktorý je silne závislý od amplitúdy zaťaženia, počtu cyklov a napät'ového rozsahu.

Numerické modelovanie únavového porušovania betónu je stále výpočtovo náročné, najmä v dôsledku výskytu vysokých gradientov napätia a singularít v oblasti špičky trhliny. Aby bolo možné únavové poškodenie realisticky popísať, musia numerické modely správne zachytiť nielen samotný vznik trhlín, ale aj ich postupné šírenie v priebehu cyklického namáhania. V okolí špičky trhliny vzniká oblasť s intenzívnou mikroštruktúrnou degradáciou, kde sa mikrotrhliny postupne aktivujú, rastú a navzájom interagujú. Táto oblasť sa označuje ako zóna procesu lomu (fracture process zone – FPZ) a zohráva kľúčovú úlohu pri únavovom poškodení betónu, keďže práve v nej dochádza k iniciácii a stabilnému rastu trhlín pred ich makroskopickým rozšírením[30].

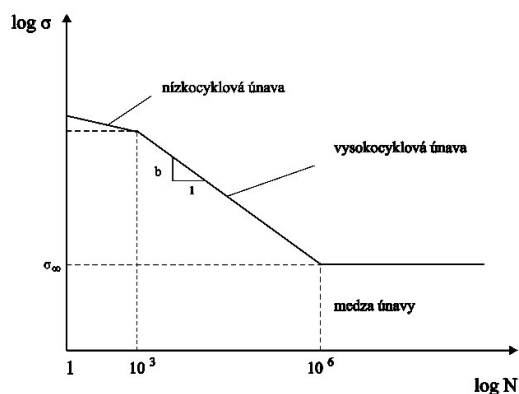


Obr. 5.2: Zóna lomového procesu [31]

FPZ (Obr. 5.2) je daná ako nelineárna zóna s iným objemom, kde sa vytvárajú viaceré mikrotrhliny, ktoré postupom času vytvoria mikrotrhlinu v špičke. Veľkosť je priamo úmerná nelineárnosti betónu. Na vývoj a postup FPZ veľa faktorov, ako napríklad hustota mikrotrhlín, veľkosť agregátu, energia lomu, rýchlosť a spôsob zaťaženia. Pri väčšom počte mikrotrhlín sa hustota mikrotrhliny v FPZ zväčšuje exponenciálne [32].

5.2.1. Wöhlerova krivka

Wöhlerova krivka (Obr. 5.3), často označovaná aj ako S–N krivka (stress–number of cycles), predstavuje základný nástroj na opis únavového správania materiálov pri cyklickom zaťažení. Bola zavedená v druhej polovici 19. storočia nemeckým inžinierom Augustom Wöhlerom na základe experimentálnych pozorovaní porušenia kovových prvkov vystavených opakovanému namáhaniu. Základnou myšlienkou Wöhlerovej krivky je vyjadrenie vzťahu medzi úrovňou aplikovaného napätia a počtom zaťažovacích cyklov, ktoré materiál vydrží do porušenia [33].



Obr. 5.3: Wöhlerova krivka

Kde N_i udáva počet cyklov pri porušení vzorky a σ_i udáva veľkosť napätia pri porušení.

Prvým krokom k matematickému popisu Wöhlerovej krivky je zavedenie vhodnej charakteristiky cyklického napätia, najčastejšie amplitúdy napätia σ_a alebo rozsahu napätia $\Delta\sigma$. Experimentálne pozorovania ukázali, že v oblasti vysokocyklovej únavy má závislosť medzi napätím a počtom cyklov do porušenia približne lineárny charakter v logaritmických súradniciach. Na základe tohto poznatku Basquin už v roku 1910 navrhol mocninovú aproximáciu, ktorá umožňuje analyticky vyjadriť tvar Wöhlerovej krivky.

Basquinov model popisuje závislosť medzi amplitúdou cyklického napätia σ_a a počtom zaťažovacích cyklov N , ktoré materiál vydrží do porušenia. Túto závislosť vyjadruje pomocou empirického mocninového vzťahu : [34]

$$\sigma(N) = aN^b \quad (8)$$

Kde a je koeficient únavovej pevnosti jedného cyklu, b je exponent únavovej pevnosti a N je počet zaťažovacích cyklov

Zavedením Basquinovho mocninového modelu je možné túto empirickú závislosť vyjadriť analytickou formou, ktorá umožňuje matematické spracovanie experimentálnych dát, regresnú analýzu a objektívne porovnanie únavových vlastností jednotlivých skúmaných variantov. Parametre a a b získané z regresie zároveň poskytujú kompaktnú charakteristiku únavového správania materiálu, pričom exponent b priamo vyjadruje citlivosť materiálu na cyklické zaťaženie [35].

Basquinov model tak predstavuje účinný nástroj na kvantitatívne vyhodnotenie Wöhlerových kriviek a tvorí základ pre analýzu únavovej životnosti vzoriek skúmaných

v tejto práci. V ďalších kapitolách je tento prístup využitý na spracovanie experimentálnych výsledkov trojbodovej ohybovej skúšky a na porovnanie vplyvu geometrie polymérnej výstuže na únavové správanie analyzovaných vzoriek.

5.3. Únava plastov

Ako aj pri betóne v plastoch dochádza k únave materiálu v dôsledku cyklického zaťažovania k zlyhaniu pri oveľa nižšom namáhaní ako pre prípady staticky mechanického zaťažovania. Pre únavové správanie a poškodenie je dôležité posúdenie nových materiálov pre rôzne aplikácie s cieľom určiť ich dlhodobú spoľahlivosť a trvanlivosť. Tak isto ako pri betóne pre polyméri sa únavové skúšky vykonávajú ako opakované zaťaženie a odtáženie na tlak, ťah, ohyb alebo kombináciu týchto napätí. Polyméri sa testujú hlavne na dva typy únavových skúšok: vysoko cyklové skúšky s kontrolovaným zaťažením a nízko cyklové skúšky s kontrolovaným napätím [1]. Pri únavovom zaťažení sa indukovaná plastická deformácia v každom únavovom cykle prameňa na energiu tepelnú, ktorá sa nedokáže prenášať ďalej v prvku kvôli nízkej tepelnej vodivosti polymérov. Toto teplo v prvku sa ukladá v materiály a týmto procesom dochádza k prehriatiu a následnej strate tuhosti, čo vedie k zvýšenej deformácii alebo úplnej poruche prvku. Ak v tomto procese dosiahne teplo teplotu skleného prechodu v aplikácii mechanické vlastnosti sa veľmi rýchlo zhoršujú.

Z tohto dôvodu je v konštrukčných aplikáciách vystavených dlhodobému alebo cyklickému zaťaženiu výhodné používať polymérne materiály s vyššou teplotou skleného prechodu. Vyššia hodnota teploty skleného prechodu spravidla prispieva k stabilnejším mechanickým vlastnostiam materiálu a k vyššej odolnosti voči únavovému poškodeniu. Mechanická porucha pri polyméroch je druhým typom pri cyklickom zaťažovaní. Dochádza ku koncentrácii napätia v rizikových miestach kde vzniká únavová porucha. Pri 3D tlačených polyméroch sú väčšinou vnútorné otvory práve tieto zóny kde sa koncentruje napätie. Tieto zóny vznikajú spôsobom tlače kvôli guľatému tvaru extrudovaných vlákien [36].

5.4. Kombinácia únavy

V kompozitnom systéme pozostávajúcom z maltovej matrice a polymérnej výstuže dochádza pri cyklickom zaťažovaní k výrazne komplexnejšiemu únavovému správaniu než pri homogénnych materiáloch. Tento jav je dôsledkom rozdielnych mechanických

vlastností jednotlivých zložiek, ich odlišnej citlivosti na amplitúdu a frekvenciu zaťaženia, ako aj rozdielnych mechanizmov akumulácie poškodenia. Betónová matrica sa pri cyklickom namáhaní správa prevažne krehko, pričom dochádza k postupnej iniciácii a šíreniu mikrotrhlín, zatiaľ čo polymérna výstuž vykazuje viskoelastické až viskoplastické správanie s významnou mierou disipácie energie [37; 38].

Pri opakovanom ohybovom namáhaní sa ťahové napätia cyklicky prenášajú medzi polymérnou výstužou a betónovou matricou. Kľúčovú úlohu v tomto procese zohráva rozhranie medzi oboma materiálmi, ktoré predstavuje miesto so zvýšenou koncentráciou napätia a zároveň zónu potenciálneho poškodenia. V dôsledku rozdielnych modulov pružnosti, Poissonových koeficientov a rozdielneho únavového správania dochádza v oblasti rozhrania k lokálnym posunom, zmenám adhézných väzieb a postupnej degradácii schopnosti prenášať zaťaženie [38].

Únavové poškodenie v takomto kompozitnom systéme sa preto neobmedzuje výlučne na jeden materiál, ale prebieha súčasne v betónovej matrici, v polymérnej výstuži aj na ich vzájomnom rozhraní. V betóne sa poškodenie prejavuje akumuláciou mikrotrhlín, zatiaľ čo v polymérnej výstuži môže dochádzať k postupnej degradácii tuhosti alebo lokálnemu plastickému pretváraniu. Rozhranie pritom pôsobí ako iniciátor porušenia, ktorý významne ovplyvňuje trajektóriu šírenia trhlín a celkovú únavovú životnosť systému [39].

Z pohľadu mechanizmu porušenia je významný aj vznik a vývoj FPZ v oblasti ťahovej zóny betónu. Prítomnosť polymérnej výstuže mení lokálne napäťovo-deformačné pomery v tejto oblasti, čo môže viesť k redistribúcii napätí, spomaleniu rastu trhlín, ale zároveň aj k vzniku lokálnych koncentrácií napätia v závislosti od geometrie výstuže a kvality rozhrania. Únavové poškodenie sa tak prejavuje ako výsledok interakcie medzi geometriou výstuže, materiálovými vlastnosťami a priebehom cyklického zaťaženia. [40]

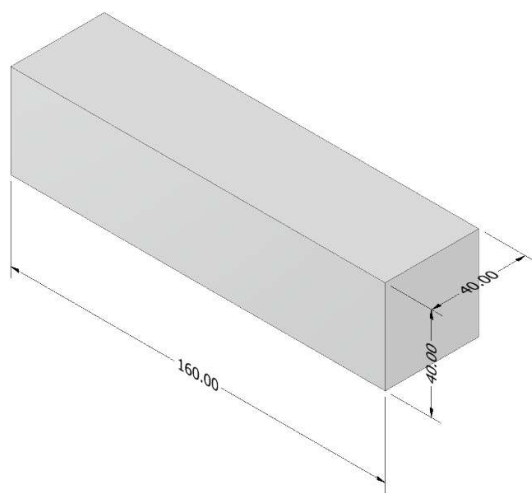
Z hľadiska návrhu a numerického modelovania je preto nevyhnutné uvažovať únavu systému ako lokálne riadený proces, pri ktorom rozhodujúcu úlohu zohrávajú kritické oblasti rozhrania. Tento prístup umožňuje lepšie identifikovať miesta iniciácie poškodenia a poskytuje základ pre predikciu únavovej životnosti kompozitných prvkov vystužených architektovanými polymérnymi štruktúrami. Štúdium kombinácie únavy v takýchto systémoch je preto kľúčové pre optimalizáciu geometrie výstuží a pre návrh konštrukčných prvkov s vyššou dlhodobou spoľahlivosťou pri cyklickom namáhaní.

6. Numerický model

Pre modelovanie bola použitá metóda konečných prvkov (MKP) v programe Ansys. Táto metóda nám dovoľuje podrobnú analýzu polí napätí a polí pretvorenia [41]. Kvôli symetrii prvku bolo možné za pomoci okrajových podmienok rozdeliť model na štvrtiny. V tomto odseku je ďalej popísaný numerický model so zaťažením a okrajovými podmienkami.

6.1. Geometrický model

Jedná sa o teleso v tvare kvádra s rozmermi $40 \times 40 \times 160$ mm, ktoré bolo kvôli jednoduchým rozmerom vytvorené priamo v ASNYSE.

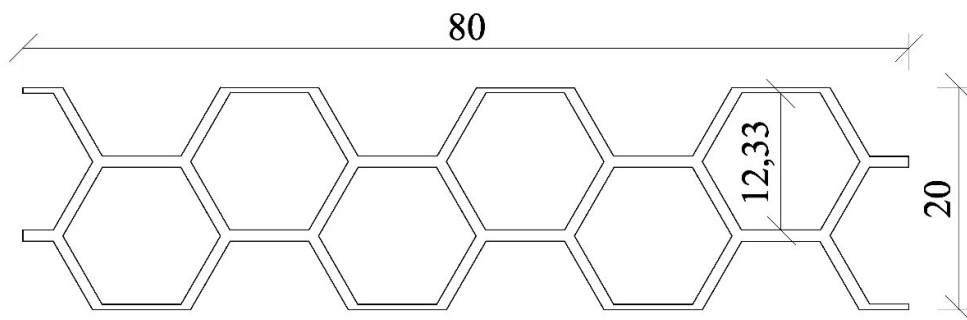


Obr. 6.1: 3D model celého maltového prvku v rozpone podpier

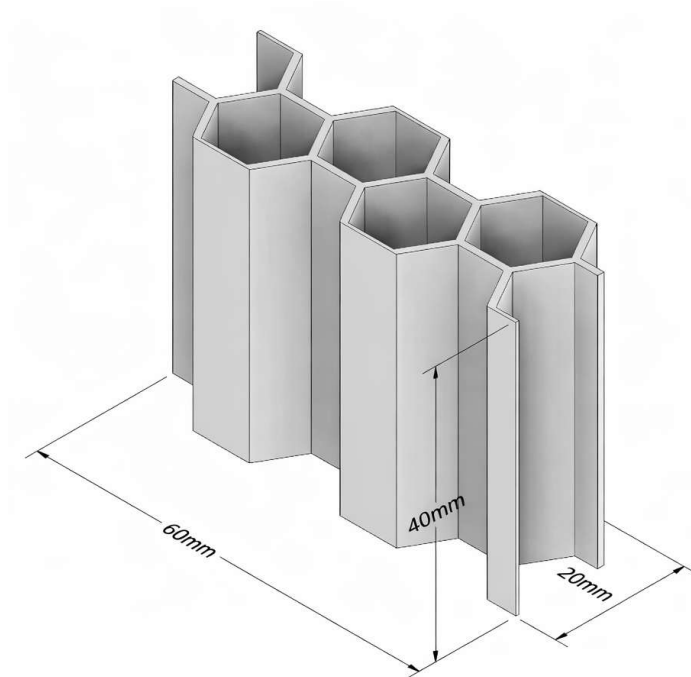
6.2. Geometrický model výstuh

Model výstuh bol najskôr vytvorený ako 2D v CAD systéme. Z pôdorysného pohľadu sú to hexagóny s vonkajším rozmerom 12,33mm pre opísanú kružnicu. Vnútorne rozmery výstuhy majú 1 mm a obvodové majú 0,5mm. (Obr. 6.2). Kvôli spomínanej symetrii a možnému zjednodušeniu modelu bola výstuha rozdelená na štvrtinu s celkovou dĺžkou 80mm a šírkou 20 mm. Následne z neho bolo v programe INVENTOR vytvorené teleso

na celú výšku prvku 40 mm a dĺžku 60 mm (kvôli uloženiu na podperách) (Obr. 6.3) , kde sa ďalej už priamo v ANSYSE upravovala výška výstuh podľa potreby. Jedná sa o tvar pre reverzné momentové zaťaženie v tvare trojuholníka pre trojbodový ohyb.



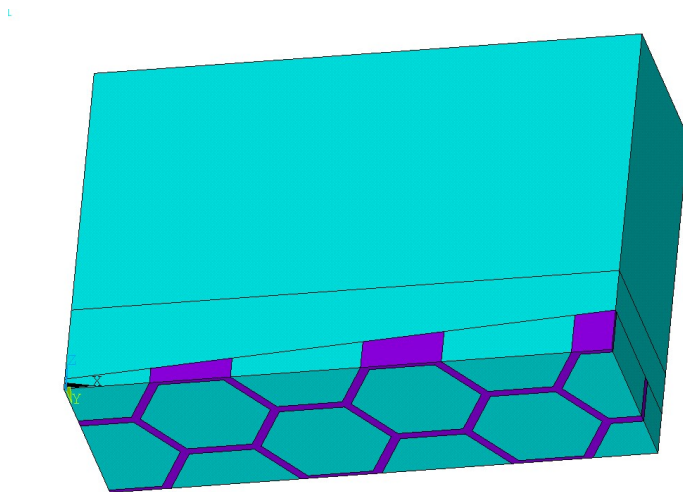
Obr. 6.2: 2D model výstuh DWG



Obr. 6.3 : 3D model IGS 1/4 prvku

6.3. Diskretizácia

Polia napätí a deformácií boli počítané v numerickom programe (ANSYS APDL) pomocou metódy MKP, práve kvôli tomu musel byť geometrický model rozdelený do 15 samostatných objemov (Obr. 6.4), aby vôbec mohlo dôjsť k rozdeleniu siete a výpočtu.



Obr. 6.4: Rozdelenie modelu do objemov

Model bol diskretizovaný neštruktúrovanou objemovou sieťou z tetraedrických prvkov druhého rádu typu SOLID187 [42]. Tento typ prvkov bol zvolený vzhľadom na zložitú geometriu štruktúry a potrebu presnejšieho popisu deformácií.

V modeli boli uvažované dva izotropné lineárne elastické materiály:

- materiál maltového telesa s modulom pružnosti $E = 30$ GPa, Poissonovým číslom $\nu = 0,2$ a hustotou $\rho = 2100$ kg/m³
- materiál PETG s modulom pružnosti $E = 2,5$ GPa, Poissonovým číslom $\nu = 0,35$ a hustotou $\rho = 1200$ kg/m³.

6.3.1. Sieť

Geometria modelu je v rámci metódy konečných prvkov nahradená diskretným súborom konečných elementov, ktorých veľkosť a priestorové rozloženie určujú schopnosť modelu zachytiť skutočný napäťovo-deformačný stav. Zvláštny dôraz je preto kladený na vhodnú voľbu charakteristickej veľkosti elementov, ktorá musí rešpektovať zložitosť geometrie a výskyt lokálnych koncentrácií napätia.

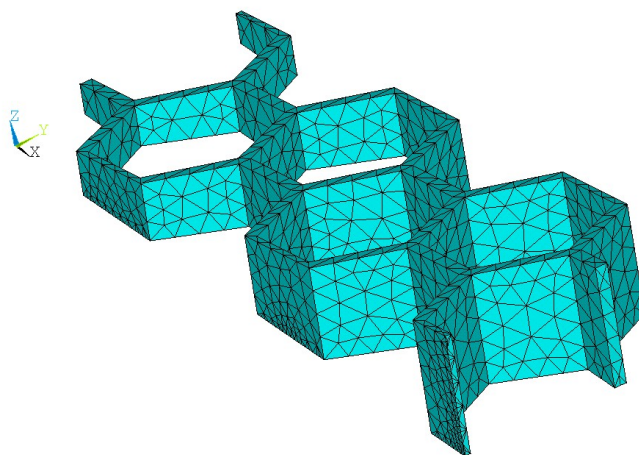
Zvolená veľkosť elementov bola navrhnutá ako kompromis medzi požiadavkou na dostatočnú presnosť riešenia a výpočtovou efektívnosťou analýzy. Jemnejšia sieť v modelovanej časti výstuh (Obr. 6.5) umožňuje detailnejší popis gradientov napätia, najmä v kritických oblastiach modelu, avšak zároveň vedie k výraznému nárastu počtu konečných elementov a tým aj k zvýšeniu výpočtovej náročnosti. Pre túto časť s hrúbkou steny bola nastavená sieť s maximálnou veľkosťou 0,5 mm. Veľkosť sa následne zvyšovala smerom k vrchnej časti prvku na maximálnu veľkosť 2 mm (Obr. 6.6). Počet elementov použitých v modeli tak predstavuje dôležitý parameter charakterizujúci mieru diskretizácie a celkovú kvalitu numerického riešenia.

Tabuľka 5: Parametre siete pre rôzne výšky výstuhy

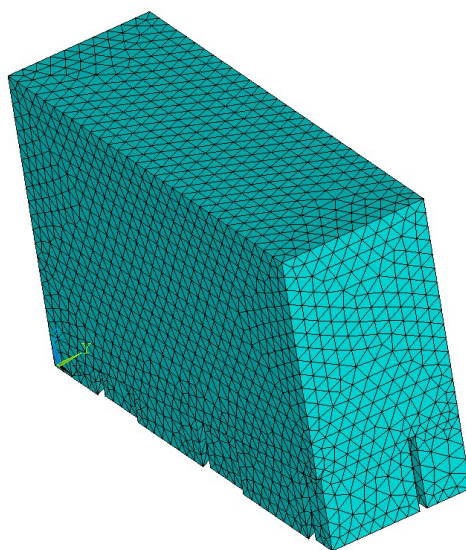
Výška [mm]	Elementy	Uzly	Stupne voľnosti
5	51256	74169	218179
10	52873	76539	225076
15	52659	76286	224289
20	53105	76439	225067

Tabuľka 5 uvádza základné charakteristiky diskretizácie numerického modelu pre jednotlivé varianty analyzovanej geometrie definované rôznou hodnotou výšky. Pre každú konfiguráciu je uvedený celkový počet konečných prvkov, počet uzlov a zodpovedajúci počet stupňov voľnosti. Z výsledkov je zrejmé, že so zmenou výšky modelu dochádza len k miernym zmenám v počte prvkov, uzlov a stupňov voľnosti.

Relatívne malé rozdiely medzi jednotlivými variantmi naznačujú, že zvolená stratégia tvorby siete a charakteristická veľkosť elementov zabezpečujú porovnateľnú úroveň diskretizácie pre všetky analyzované geometrie. Vďaka tomu je možné považovať jednotlivé numerické modely za vzájomne porovnateľné z hľadiska presnosti aj výpočtovej náročnosti, pričom vplyv zmeny geometrického parametra výšky na hustotu siete je minimálny.



Obr. 6.5: Rozdelenie siete na výstuhe



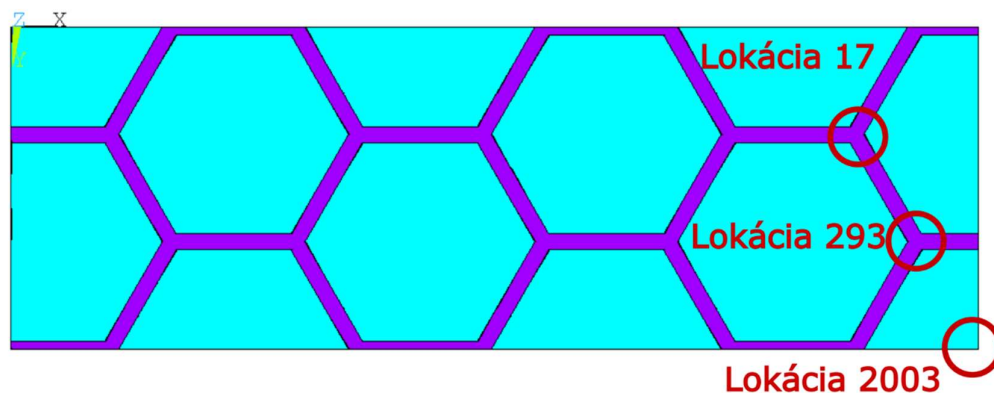
Obr. 6.6: Rozdelenie siete v maltovej zmesi

6.3.2. Poissonov súčiniteľ

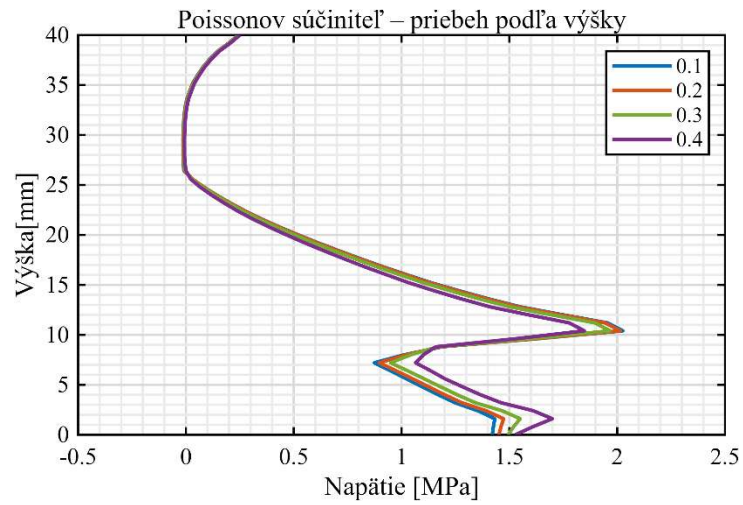
Stanovenie Poissonovho súčiniteľa pre analyzovaný materiál predstavuje z hľadiska experimentálneho aj numerického hodnotenia výrazne náročnú úlohu (pozri podkapitolu 4.2.4). Dôvodom je najmä anizotropný charakter materiálu, citlivosť merania na okrajové podmienky a výrazný vplyv smeru zaťaženia a orientácie vnútornej štruktúry. Z týchto dôvodov nie je možné považovať experimentálne určené hodnoty Poissonovho súčiniteľa za jednoznačné a univerzálne platné materiálové konštanty.

Z tohto dôvodu bolo v práci zvolené porovnávacie hodnotenie založené na analýze odchýlok výsledkov, ktoré umožňuje posúdiť citlivosť modelu na zmeny Poissonovho súčiniteľa bez potreby jeho presného určenia. Takýto prístup poskytuje robustnejší pohľad na vplyv tejto materiálovej charakteristiky na výsledný napäťovo-deformačný stav a zároveň znižuje mieru neistoty spojenú s jej experimentálnym stanovením.

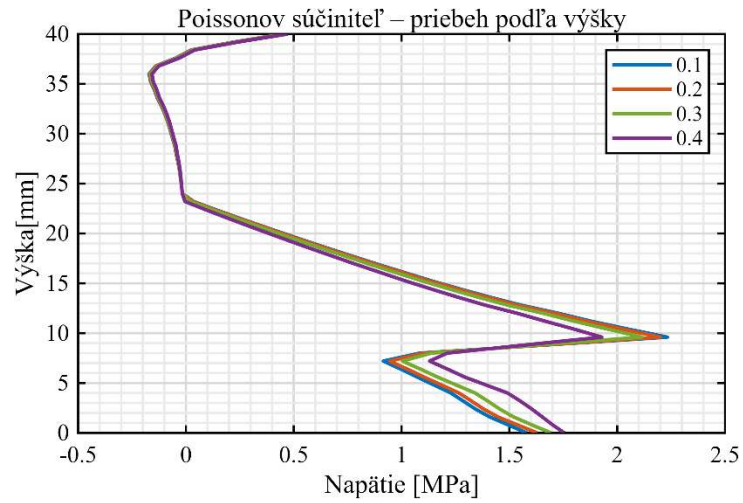
Posúdenie bolo robené v 3 lokáciách 17, 293 a 2003 (Obr. 6.7) Pre vzorku s výškou výstuhy 10 mm. Výsledky boli porovnávané v 2 bodoch. 1. bod bol vždy na spodnej strane prvku, 2. bod bol vo výške spojenia medzi výstuhou a maltou. Testovanie prebiehalo zmenou poissonovho súčiniteľa pre polymérnu výstuž (0,1; 0,2; 0,3; 0,4).



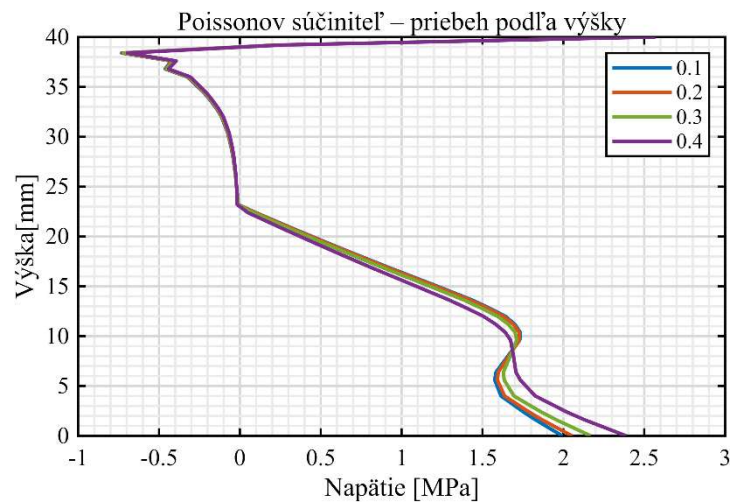
Obr. 6.7: Lokácie priebehu Poissonoveho čísla



Obr. 6.8: Napätie pre rôzne poissonove súčinitele v lokácii 1 (17)



Obr. 6.9: Napätie pre rôzne poissonove súčinitele v lokácii 2 (293)



Obr. 6.10: Napätie pre rôzne poissonove súčinitele v lokácii 3 (2003)

Tabuľka 6: Závislosť maximálneho prvého hlavného napätia pre rôzne Poissonove súčinitele

Výška [mm]	0,1	0,2	0,3	0,4	CoV [%]
Lokácia 1					
0	1,42	1,45	1,49	1,53	3,19
10	2,03	2,02	1,97	1,85	4,16
Lokácia 2					
0	1,491888	1,629048	1,692527	1,75	6,92
10	2,052186	2,027719	1,958136	1,80	5,51
Lokácia 3					
0	1,99	2,05	2,17	2,39	8,24
10	1,73	1,73	1,70	1,64	2,49

Tabuľka 6 prezentuje experimentálne namerané hodnoty sledovanej veličiny v troch lokáciách vzorky (Lokácia 1 až 3) pre dve výškové úrovne (0 mm a 10 mm). Pre každú kombináciu lokácie a výšky sú uvedené štyri hodnoty zodpovedajúce rôznym Poissonovým koeficientom (0,1; 0,2; 0,3 a 0,4). Na základe týchto hodnôt bol vypočítaný koeficient variability (CoV), ktorý vyjadruje relatívnu mieru rozptylu dát v percentách.

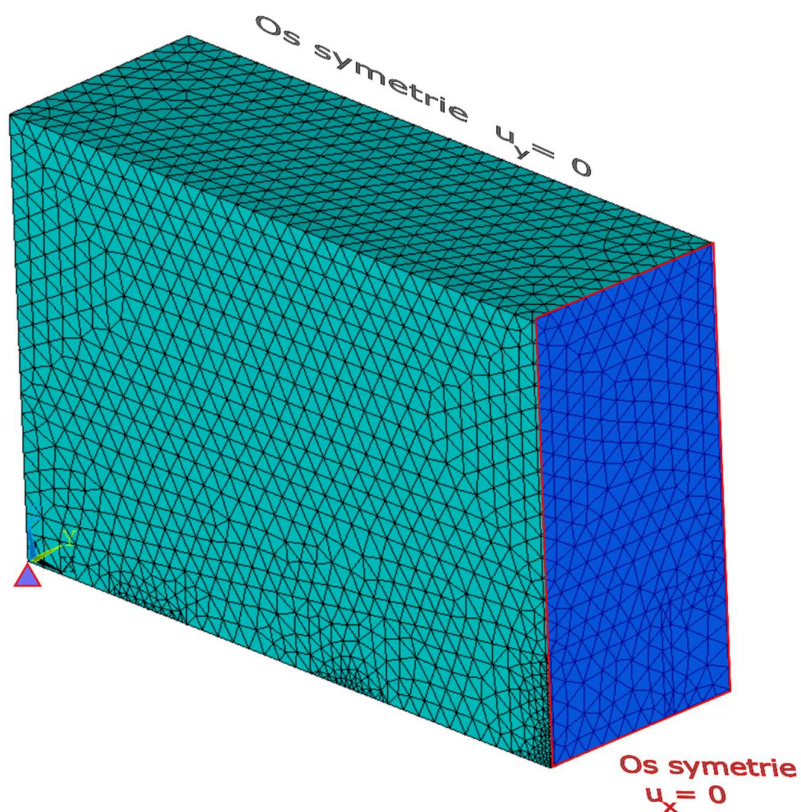
Z výsledkov vyplýva, že lokácia 1 vykazuje nízku mieru variability, pričom hodnota CoV sa pohybuje od 3,19 % pri výške 0 mm do 4,16 % pri výške 10 mm, čo indikuje dobrú homogenitu nameraných údajov. Lokácia 2 dosahuje o niečo vyššie hodnoty variability; pri výške 0 mm dosahuje CoV 6,92 %, zatiaľ čo pri výške 10 mm je variabilita mierne nižšia (5,51 %). Najvyššia variabilita bola zaznamenaná v lokácii 3 pri výške 0 mm, kde CoV dosiahol 8,24 %, čo poukazuje na zvýšený rozptyl hodnôt v tejto oblasti. Naopak, pri tej istej lokácii vo výške 10 mm bola zistená najnižšia hodnota CoV (2,49 %) zo všetkých analyzovaných prípadov. V lokácii 3 (Obr. 6.10) mohlo dôjsť k numerickej chybe na základe zadania okrajových podmienok.

Celkovo sa hodnoty koeficientu variability pohybujú v intervale 2,49 % až 8,24 %, čo predstavuje nízku až strednú mieru variability výsledkov. Keďže analyzované údaje nepochádzajú z fyzických experimentov, ale z parametrického testovania vplyvu Poissonovho čísla v numerickom modeli, zistené rozdiely neodrážajú experimentálnu nepresnosť, ale citlivosť modelu na zvolenú hodnotu tohto materiálového parametra. Výsledky naznačujú, že uvažovaná hodnota Poissonovho čísla $\nu = 0,35$ vedie k stabilnému správaniu modelu a nezvyšuje výrazne rozptyl sledovaných výstupných veličín naprieč jednotlivými lokáciami a výškovými úrovňami.

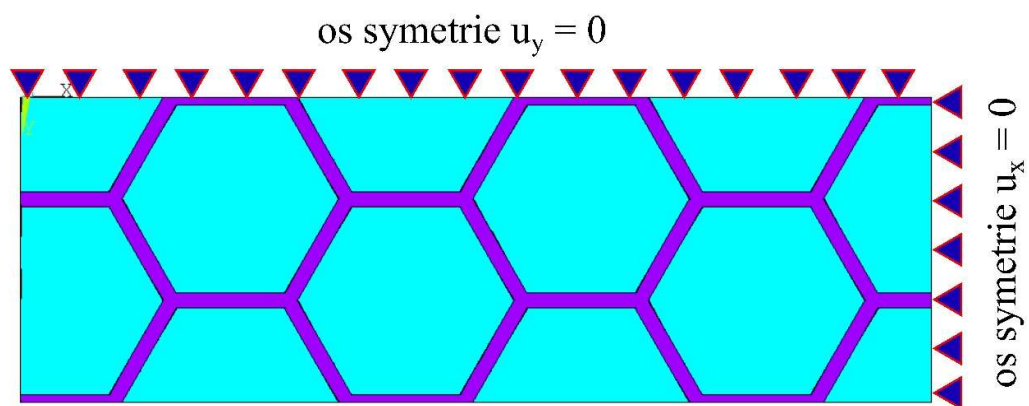
6.4. Okrajové podmienky

Kvôli symetrii bolo pre zjednodušenie výpočtu možné rozdeliť prvok na jednu štvrtinu, kde bolo potrebné zvoliť vhodné okrajové podmienky pre vytvorenie reálneho prípadu. V častiach roviny symetrie bolo zabránené pohybom v danom smere (Obr. 6.11) to znamená u_x a $u_y = 0$.

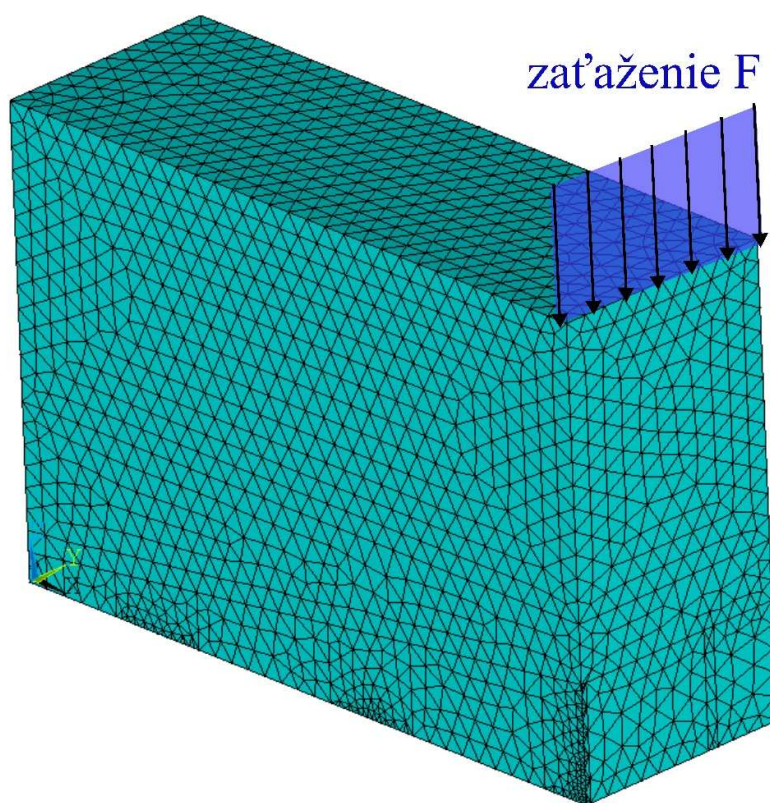
Následne bolo potrebné na danej štvrtine určiť presné okrajové podmienky a zaťaženie pre správne počítanie. Modelovanie bolo robené v programe ANSYS. Na (Obr. 6.12) je možné vidieť okrajové podmienky a zaťažovacie stavy na prvku. Prvok je zaťažený líniovým tlakom v smere Z v polovici rozpätia. Z vonkajšej strany prvku bolo odobraných 20 mm pre presnejší modelovanie. Na okraji je líniová podpora, ktorá zabráňuje pohybu v osi Z. Na čelnej strane je kvôli symetrii zabránene pohybu v smere X a na zadnej strane prvku je zabránené pohybu v osi Y.



Obr. 6.11: Okrajové podmienky a osi symetrie axonometrický pohľad



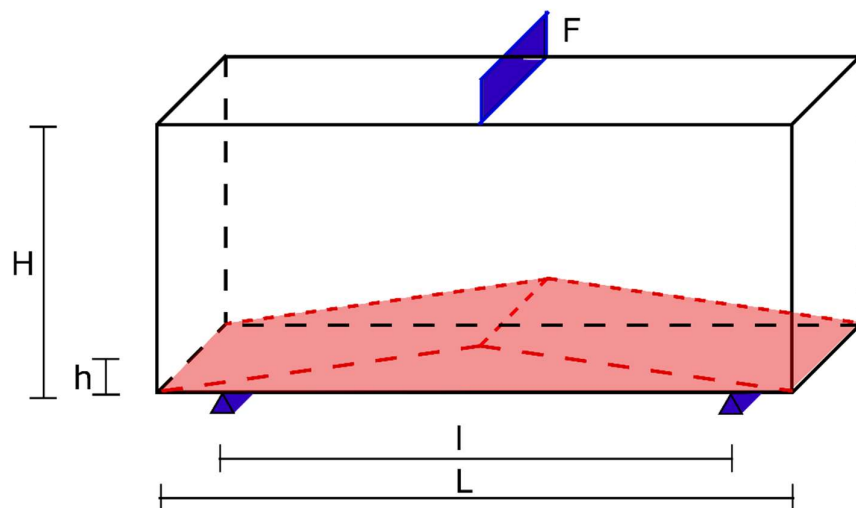
Obr. 6.12: Osy symetrie dolný pohľad



Obr. 6.13: Zaťaženie

6.5. Zaťaženie

Priebeh experimentu trojbodovej ohybovej skúšky (Obr. 6.14) bol navrhnutý s cieľom analyzovať správanie vzoriek pri ohybovom namáhaní na a sledovať vývoj poškodenia trhlín v priebehu zaťažovania. Pozornosť bola venovaná hlavne zmene výšky výstuže.



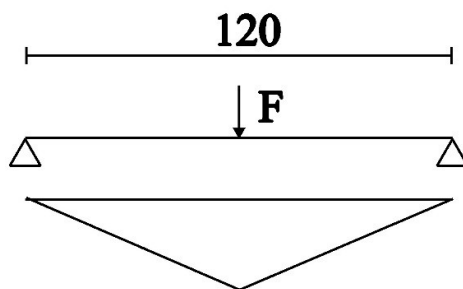
Obr. 6.14: Schéma trojbodovej ohybovej skúšky

Kde H je výška prvku, h je meniac sa výška výstuhy (5 mm, 10 mm, 15 mm a 20 mm), L je dĺžka prvku, l je rozpon podpôr a F je maximálne zaťaženie.

Maximálna sila F , bola znižovaná o 10 % pre každú vzorku z danou výškou výstuže až pokiaľ neprišlo na stanovenú medzu únavy, ktorá bola dopredu dohodnutá na 2×10^6 počtu zaťažovacích cyklov. Ako je pre dlhodobú únavu odporúčané v [43].

Zvolený rozsah výšok výstuže umožňuje analyzovať vplyv jej polohy a objemu na prenos ohybového zaťaženia, rozloženie napätí a vývoj porušenia v maltovej matici. Zmena výšky výstuže sa bezprostredne prejavuje v miere zapojenia polymérneho prvku do ťahovej zóny pri ohybovom namáhaní, a tým aj v schopnosti vzorky odolávať iniciácii a šíreniu trhlín. Takto navrhnutý experimentálny program vytvára predpoklady na porovnanie jednotlivých konfigurácií vzoriek a umožňuje kvantifikovať vplyv výšky

polymérnej výstuže na ohybovú únosnosť, tuhosť a únavové správanie kompozitného systému pri cyklickom zaťažení [44][45].



Obr. 6.15: Priebeh momentov pre trojbodový ohyb na telese z rozpätím 120 mm

Na základe schémy trojbodovej ohybovej skúšky znázornenej na Obr. 6.15 je možné priebeh vnútorných síl v skúšanom prvku opísať aj pomocou jednoduchého analytického modelu nosníka prostým uloženého na dvoch podperách so sústredeným zaťažením v strede rozpätia. Takýto ideálny prípad umožňuje priamu aplikáciu klasického ručného výpočtu ohybového napätia, ktorý slúži ako základná referenčná aproximácia napät'ového stavu v priereze.

Pri trojbodovom ohybe vzniká v nosníku lineárny priebeh ohybového momentu s maximálnou hodnotou v strede rozpätia. Maximálny ohybový moment M je možné vyjadriť vzťahom:

$$M = \frac{F * l}{4} \quad (9)$$

kde F je pôsobiaca sila a l je rozpon medzi podperami. Zodpovedajúce maximálne normálové napätie v extrémnych vláknach prierezu je potom možné určiť pomocou známeho vzťahu:

$$\sigma = \frac{M}{W} \quad (10)$$

Keďže analyzovaný prvok je kompozitný pri ručnom výpočte nie je možné uvažovať prierez ako homogénny. Rozdielna tuhosť materiálov spôsobuje, že pri rovnakom zakrivení prierezu prenášajú jednotlivé zložky odlišnú časť vnútorných síl. Na zohľadnenie rozdielnych modulov pružnosti sa preto používa metóda transformovaného

prierezu, pri ktorej sa jedna zložka prepočíta na ekvivalentný materiál druhej zložky pomocou modulového pomeru: [46]

$$n = \frac{E_{PETG}}{E_c} \quad (11)$$

kde E_p je modul pružnosti polymérnej výstuže a E_c modul pružnosti maltovej matrice. Transformácia spočíva v tom, že plochy polymérnej časti sa v ručnom výpočte nahradia ekvivalentnou plochou a moment zotrvačnosti sa nahradí transformovaným momentom zotrvačnosti k neutrálnej osi: [46]

$$A'_{PETG} = n * A_{PETG} \quad (12)$$

$$I'_{PETG} = n * I_{PETG} \quad (13)$$

Následne je z prepočítanej plochy možné určiť polohu neutrálnej osi vzorcom: [46]

$$y_n = \frac{A_c * y_c + A'_{PETG} * y_{PETG}}{A_c + A_{PETG}} \quad (14)$$

Moment zotrvačnosti transformovaného prierezu sa vypočíta ako súčet príspevkov matrice a transformovanej výstuže s využitím Steinerovej vety: [46]

$$I = I_c + A_c * (y_c - y_n)^2 + I'_{PETG} + A'_{PETG} * (y_{PETG} - y_n)^2 \quad (15)$$

Z takto vypočítaného I Je možné priamo odvodiť priečny modul prierezu: [46]

$$W = \frac{I}{y_{max}} \quad (16)$$

Je však potrebné zdôrazniť, že uvedený ručný výpočet vychádza z predpokladu homogénneho materiálového správania a neberie do úvahy prítomnosť polymérnej výstuže ani rozdielne mechanické vlastnosti jednotlivých zložiek kompozitného systému. V reálnom skúšanom prvku dochádza k lokálnej redistribúcii napätí v dôsledku rozdielnych modulov pružnosti malty a 3D tlačenej polymérnej výstuže, ako aj vplyvom geometrickej členitosti hexagonálnej štruktúry [47].

7. Analýza polí deformácií a napätí pre rôzne výšky

Analýza polí deformácií a napätí predstavuje neoddeliteľnú súčasť numerického hodnotenia mechanického správania konštrukcií vystavených zaťaženiu. Pomocou metódy konečných prvkov je možné získať detailný priestorový obraz rozloženia napätí a deformácií v analyzovanom telese, čo umožňuje identifikovať kritické oblasti s koncentráciou napätia a sledovať mechanizmy iniciácie a rozvoja porušenia [41].

Numerická analýza umožňuje komplexné hodnotenie priestorového rozloženia napät'ového poľa v trojrozmernom modeli a prispieva k hlbšiemu pochopeniu mechanizmov poškodenia vedúcich k zlyhaniu analyzovaných vzoriek. Vzhľadom na zložitú geometriu skúmaného telesa, ktorá je charakteristická lokálnymi koncentraciami napätia, ako aj na charakter trojbodovej ohybovej skúšky, pri ktorej sa ohybové napätie prenáša zo stredu rozpätia smerom k podperám, je využitie numerického prístupu nevyhnutné pre detailný popis napät'ovo-deformačného stavu.

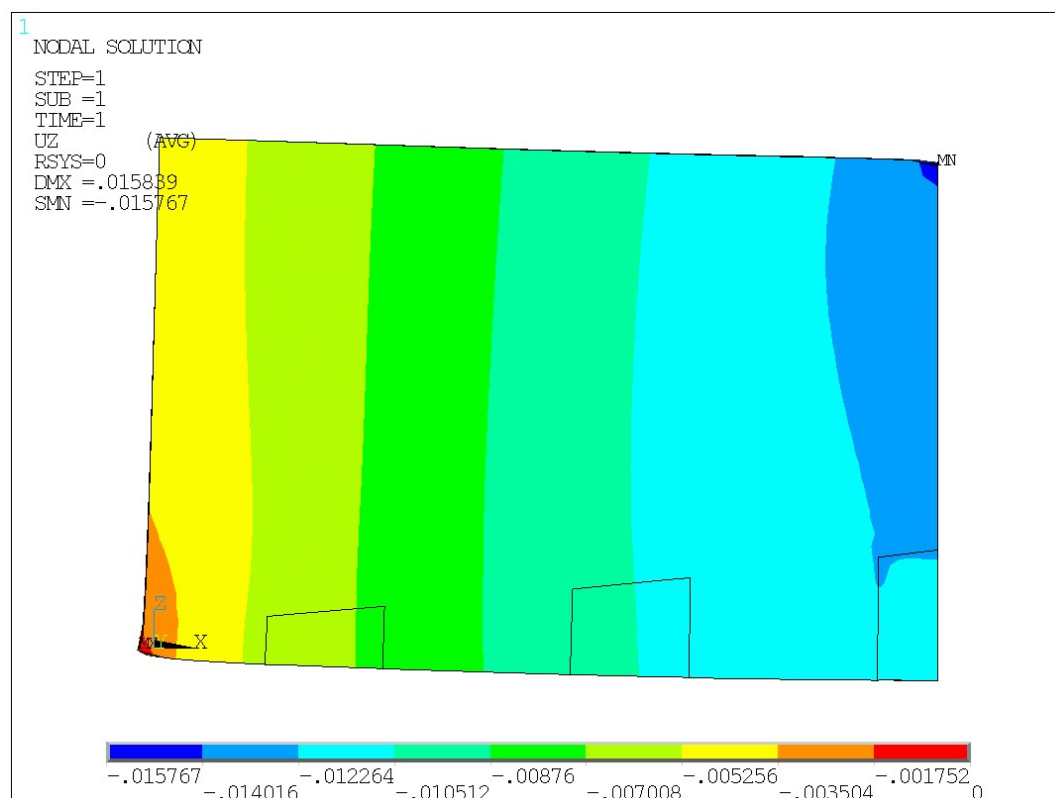
Použitý numerický model zároveň umožňuje samostatnú analýzu napät'ových podmienok v 3D tlačenej polymérnej výstuži (podkapitola 7.2) a v maltovej matrici (podkapitola 7.3), čím sa vytvára predpoklad na dôkladné posúdenie vzájomného pôsobenia jednotlivých materiálových zložiek kompozitného systému. Takýto prístup umožňuje identifikovať dominantné mechanizmy porušenia, ich lokalizáciu a závislosť od geometrických parametrov výstuže.

V ďalšej časti kapitoly sú analyzované polia napätí pre jednotlivé varianty výšky polymérnej výstuže, pričom výsledky sú prezentované vo forme grafických výstupov zobrazujúcich rozloženie hlavných napätí v konštrukcii. Tieto výsledky poskytujú podklad pre porovnanie jednotlivých konfigurácií a pre interpretáciu vplyvu výšky výstuže na redistribúciu napätí a iniciáciu porušenia.

7.1. Pole deformácií

Analýza polí deformácií predstavuje dôležitý validačný nástroj numerického modelu, najmä z hľadiska overenia správneho smeru zaťaženia a mechanickej odozvy konštrukcie. Rozloženie a tvar deformácií umožňujú vizuálne posúdiť, či správanie modelu zodpovedá očakávanému fyzikálnemu správaniu pri zvolenom type namáhania, a slúžia na identifikáciu prípadných chýb v definícii okrajových podmienok alebo

zaťaženia. Správny priebeh deformácií je preto základným predpokladom pre spoľahlivú interpretáciu následne analyzovaných napät'ových polí [41].



Obr. 7.1: Deformácie vzorky $h = 5$ mm

Na obrázku je znázornené pole vertikálnych posunov u_z získané z numerickej analýzy v programe ANSYS pre zaťaženie vzorky v konfigurácii trojbodového ohybu. Zobrazený deformovaný tvar vykazuje typický ohybový charakter s maximálnymi zápornými hodnotami posunu v oblasti stredu rozpätia, čo zodpovedá očakávanému fyzikálnemu správaniu prvku pri tomto type namáhania. Minimálna hodnota vertikálneho posunu dosahuje približne $-0,016$ mm, zatiaľ čo v oblasti podpier sú posuny výrazne obmedzené vplyvom aplikovaných okrajových podmienok.

Rozloženie deformácií potvrdzuje správne definovanie smeru zaťaženia a okrajových podmienok numerického modelu. Plynulý priebeh posunov bez lokálnych diskontinuit naznačuje stabilnú numerickú odozvu a primeranú kvalitu siete konečných prvkov. Pole deformácií tak slúži ako validačný krok numerického modelu a vytvára spoľahlivý základ pre následnú analýzu napät'ových polí a lokalizáciu koncentrácií napätia v konštrukcii.

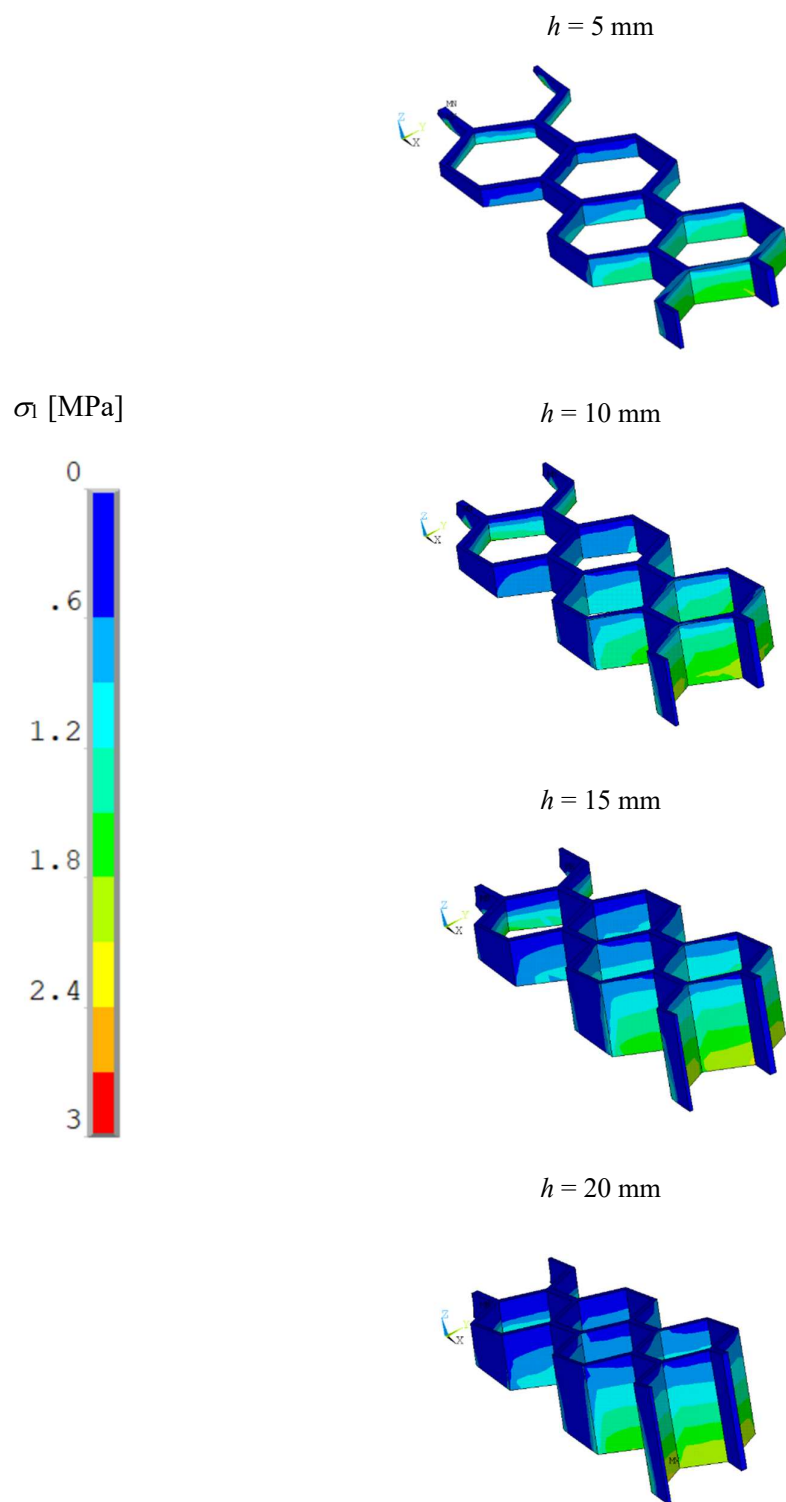
7.2. Polia napätí pre 3D tlačenej výstuhy

Táto podkapitola je zameraná na analýzu polí napätí v oblasti 3D tlačenej polymérnej výstuže so zvláštnym dôrazom na vyhodnotenie prvého hlavného napätia σ_1 . Prvé hlavné napätie predstavuje rozhodujúcu veličinu z hľadiska vzniku trhlín a porušenia v materiáloch s obmedzenou pevnosťou v ťahu, a preto jeho priestorové rozloženie poskytuje zásadnú informáciu o mechanizmoch poškodenia polymérnej výstuže pri ohybovom namáhaní[41][48].

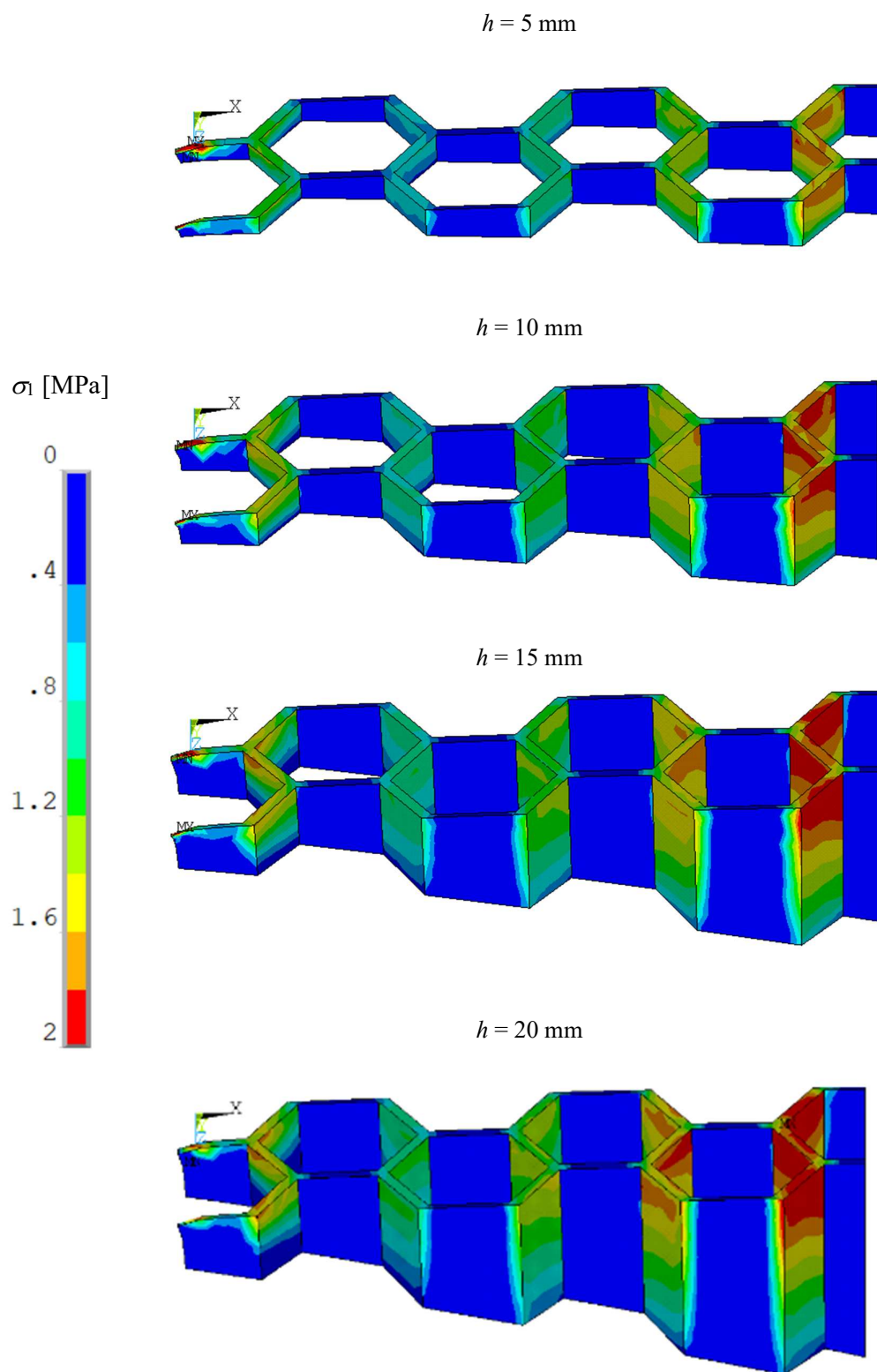
Numerická analýza umožňuje detailne sledovať rozloženie prvých hlavných napätí v jednotlivých častiach výstuže a posúdiť ich závislosť od výšky výstuže a jej polohy v priereze nosníka. Zmena výšky polymérnej výstuže ovplyvňuje jej zapojenie do ťahovej zóny pri ohybe, čo sa priamo premieta do úrovne a lokalizácie maximálnych hodnôt napätia σ_1 . Tieto rozdiely sú rozhodujúce pri hodnotení efektivity výstuže z hľadiska prenosu ťahových napätí a stability napätového poľa [41].

Výsledky prezentované v tejto časti slúžia ako podklad pre porovnanie jednotlivých konfigurácií výšky výstuže a pre interpretáciu rozdielov v mechanickom správaní vzoriek pozorovaných v experimente. Analýza polí prvého hlavného napätia zároveň umožňuje identifikovať kritické oblasti v polymérnej výstuži, v ktorých môže dochádzať k iniciácii únavového poškodenia alebo lokálneho porušenia pri cyklickom zaťažení [48].

V nasledujúcej časti sú prezentované výsledky numerickej analýzy polí napätí v 3D tlačenej polymérnej výstuži pre rôzne výšky výstuže $h = 5, 10, 15$ a 20 mm. Cieľom porovnania je posúdiť vplyv zmeny výšky výstuže na rozloženie prvého hlavného napätia a identifikovať rozdiely v miere zapojenia výstuže do prenosu ťahových napätí pri ohybovom namáhaní. Zmena geometrie výstuže priamo ovplyvňuje jej polohu vzhľadom na neutrálnu os prierezu, čo sa prejavuje v rozdielnom napätovom stave a lokalizácii maximálnych hodnôt napätia.



Obr. 7.2: Prvé hlavné napätia σ_1 v polymérnych výstužiacich s rôznymi veľkosťami



Obr. 7.3: Lokalizácia prvého hlavného napätia σ_1 v polymérnych výstužiach s rôznymi veľkosťami

Z porovnania jednotlivých variantov je zrejmé, že so zvyšujúcou sa výškou výstuže dochádza k zmene rozloženia prvého hlavného napätia v polymérnom prvku. Pri nižších hodnotách výšky výstuže je napätie rozložené rovnomernejšie, pričom maximálne hodnoty sú nižšie a rozptýlené na väčšej ploche. Naopak, pri vyšších výškach výstuže dochádza k výraznejšej koncentrácii napätia v kritických oblastiach výstuže, čo súvisí s jej väčším zapojením do ťahovej zóny pri ohybovom namáhaní.

Pri výške výstuže $h = 5$ mm je prvé hlavné napätie σ_1 v polymérnej výstuži rozložené relatívne rovnomerne po jej objeme. Maximálne hodnoty napätia sa vyskytujú predovšetkým v oblasti strednej časti rozpätia, kde je ohybový moment najvyšší, avšak ich veľkosť zostáva na porovnateľne nižšej úrovni. Pri zvýšení výšky výstuže na $h = 10$ mm dochádza k citeľnej zmene napäťového poľa v polymérnej výstuži. Maximálne hodnoty prvého hlavného napätia sú výraznejšie lokalizované a koncentrujú sa v spodnej časti výstuže, ktorá je viac zapojená do ťahovej zóny pri ohybovom namáhaní. Pri výške výstuže $h = 15$ mm je zapojenie polymérneho prvku do prenosu ťahových napätí ešte výraznejšie. Polia prvého hlavného napätia vykazujú vyššie maximálne hodnoty σ_1 . Pri najvyššej uvažovanej výške výstuže $h = 20$ mm sú maximálne hodnoty prvého hlavného napätia výrazne koncentrované v obmedzených oblastiach výstuže, predovšetkým v spodnej časti prierezu v blízkosti strednej oblasti rozpätia. Z porovnania všetkých variantov je zrejmé, že výška polymérnej výstuže významne ovplyvňuje nielen úroveň maximálneho prvého hlavného napätia, ale aj jeho priestorové rozloženie. Zatiaľ čo nižšie výšky výstuže vedú k rovnomernejšiemu a menej koncentrovanému napäťovému poľu, vyššie výšky spôsobujú výraznejšie zapojenie výstuže.

Na Obr. 7.3 je znázornená lokalizácia prvého hlavného napätia σ_1 v polymérnych výstužiach pre jednotlivé výšky výstuže h . Zobrazenie je úmyselne obmedzené na hodnoty do 2 MPa, aby bolo možné prehľadne identifikovať oblasti so zvýšenou koncentráciou ťahových napätí a jednoznačne lokalizovať potenciálne miesta iniciácie únavového poškodenia. Najvyššie hodnoty σ_1 sa sústreďujú v stykoch jednotlivých ramien hexagonálnej geometrie, najmä v oblastiach prechodu medzi výstužou a maltovou matricou v ťahovej zóne spodných vlákien. So zvyšujúcou sa výškou výstuže dochádza k postupnému nárastu rozsahu oblastí s vyšším napätím, čo poukazuje na výraznejšie zapojenie polymérnej výstuže do prenosu ohybového zaťaženia, ale zároveň na rast rizika lokálnej koncentrácie napätia v kritických miestach geometrie.

7.3. Napät'ové polia pre maltovú maticu

Analýza napät'ových polí v maltovej matici je zameraná na identifikáciu kritických oblastí krehkej fázy kompozitného systému, v ktorých môže dochádzať k iniciácii a šíreniu trhlín pri ohybovom namáhaní. Keďže malta vykazuje výrazne nižšiu pevnosť v ťahu než v tlaku, rozhodujúcou veličinou pre hodnotenie jej porušovania je prvé hlavné napätie σ_1 . V tejto podkapitole je pozornosť venovaná predovšetkým vyhodnoteniu tohoto v maltovej matici, ktoré je všeobecne považované za vhodnú veličinu na opis porušovania krehkých materiálov v ťahu. Analýza priestorového rozloženia napätia σ_1 umožňuje identifikovať oblasti s koncentráciou ťahových napätí, ktoré sú potenciálnymi miestami iniciácie trhlín, najmä v oblasti spodných vlákien prierezu namáhaného ohybom a v okolí rozhrania medzi maltou a polymérnou výstužou. Numerický model umožňuje detailne sledovať vplyv geometrie polymérnej výstuže, najmä jej výšky, na redistribúciu napätí v maltovej matici. Zmeny v rozložení napät'ového poľa poukazujú na mieru spolupráce medzi výstužou a maticou a umožňujú posúdiť efektivitu výstuže z hľadiska znižovania koncentrácií napätia v krehkej fáze. Výsledky tejto analýzy poskytujú dôležitý podklad pre interpretáciu experimentálnych pozorovaní, ako aj pre návrh optimalizovanej geometrie polymérnej výstuže zameranej na stabilizáciu šírenia trhlín a zvýšenie duktility kompozitného systému [48][41].

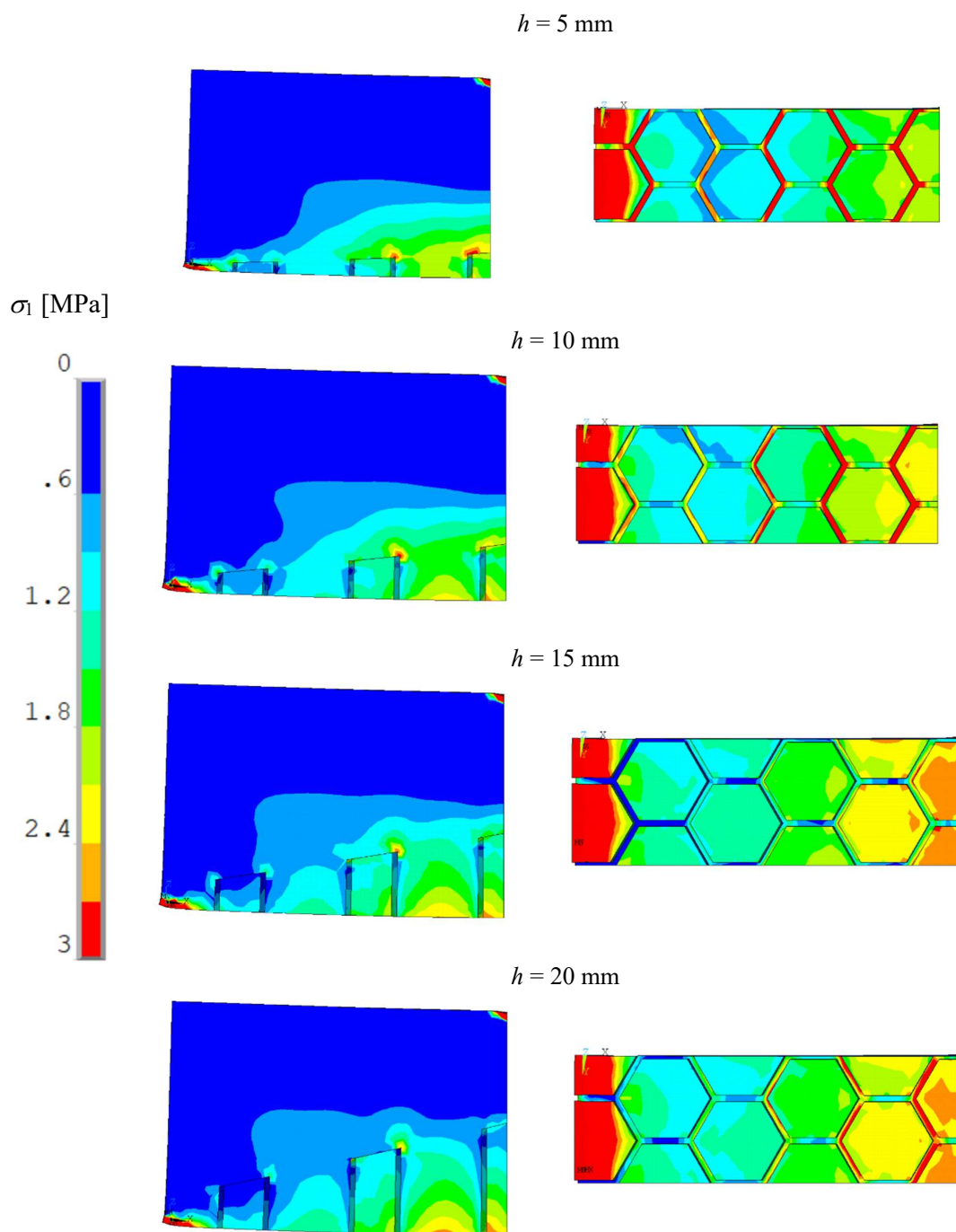
Výsledky sú znázornené v bočnom pohľade, ktorý umožňuje posúdiť rozloženie ťahových a tlakových napätí v smere ohybu, v spodnom pohľade zameranom na oblasť ťahovej zóny a lokalizáciu maximálnych hodnôt prvého hlavného napätia, ako aj prostredníctvom dvoch charakteristických rezov (Obr. 7.4) vedených naprieč skúmaným telesom.



Obr. 7.4: Roviny rezu

7.3.1. Bočný a spodný pohľad na maltovú maticu

Výsledky numerickej analýzy napätového stavu pre jednotlivé varianty výšky polymérnej výstuže. Uvedené hodnoty reprezentujú vyhodnotené maximálne hodnoty prvého hlavného napätia v kritických oblastiach :



Obr. 7.5: Prvé hlavné napätia σ_1 v maltovej matici – bočný a spodný pohľad s rôznymi veľkosťami výstuh

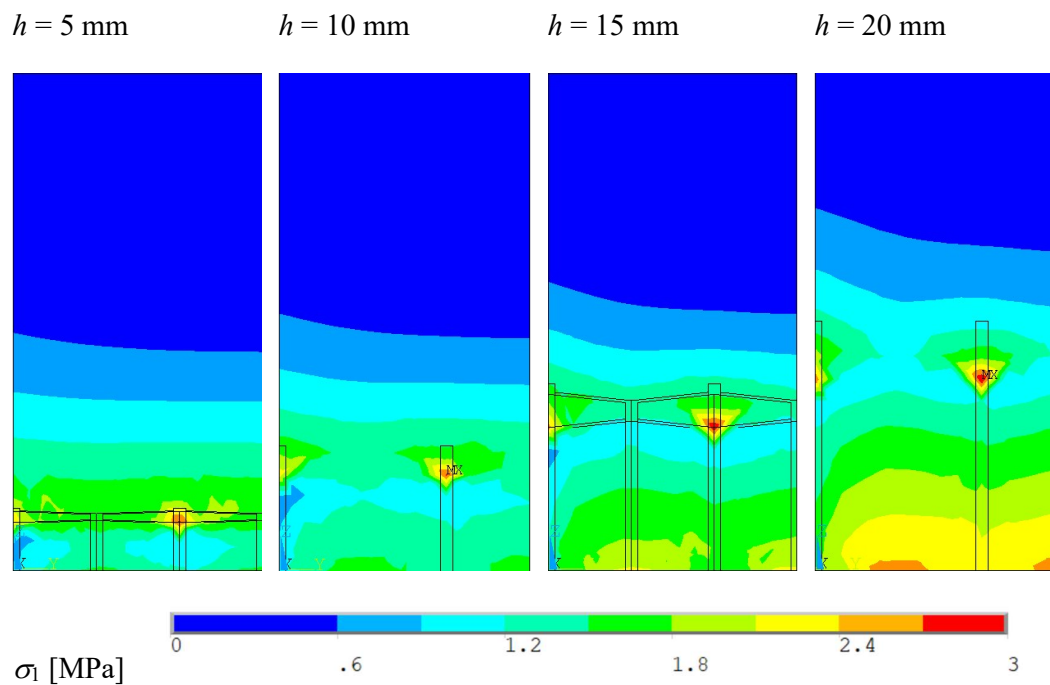
Obr. 7.5 znázorňuje rozloženie prvého hlavného napätia σ_1 v maltovej matici pre jednotlivé varianty výšky polymérnej výstuže $h = 5, 10, 15$ a 20 mm. Výsledky sú prezentované v dvoch zobrazeniach – v bočnom pohľade a v spodnom pohľade – s cieľom komplexne zachytiť priestorové rozloženie ťahových napätí v kritických oblastiach telesa pri ohybovom namáhaní. Prvé hlavné napätie σ_1 je zvolené ako rozhodujúca veličina, keďže v krehkej maltovej matici sú práve ťahové napätia dominantným faktorom pre iniciáciu trhlín a následné šírenie porušenia.

V bočnom pohľade je možné pozorovať, že maximálne hodnoty prvého hlavného napätia σ_1 sa vyskytujú v spodných vláknach maltovej časti v bezprostrednej blízkosti hexagonálnej výstuže. Rozloženie napätí naznačuje, že prítomnosť polymérnej výstuže mení charakter napätového poľa v krehkej matici a vedie k jeho lokálnej redistribúcii. Napätové pole v oblasti HEX vykazuje plynulý prechod bez výrazných náhlych skokov, čo poukazuje na dostatočnú spoluprácu medzi maltou a polymérnou výstužou.

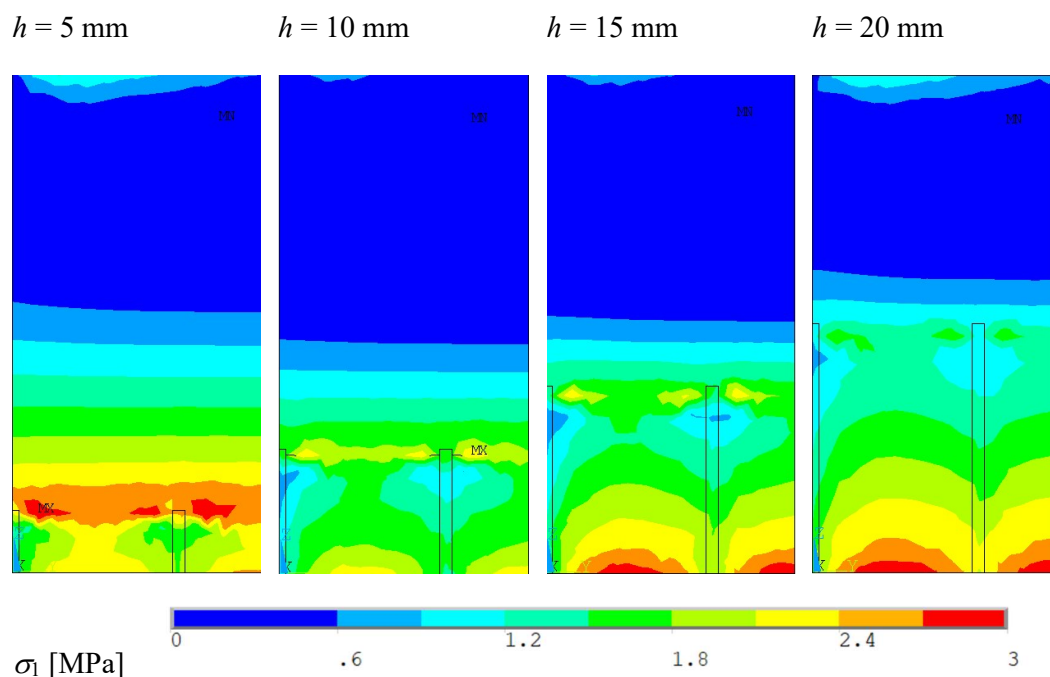
Spodný pohľad umožňuje detailnejšie posúdiť priestorové rozloženie napätia σ_1 v ťahovej zóne. V oblasti spodných vlákien v strede rozpätia je zreteľná lokalizácia zvýšených hodnôt σ_1 , ktoré kopírujú geometrický tvar hexagonálnej výstuže. Tento jav indikuje, že geometria výstuže má priamy vplyv na smerovanie a rozloženie ťahových napätí v maltovej matici. V porovnaní jednotlivých výšok výstuže sa mení intenzita a rozsah tejto lokalizácie, pričom vyššie výšky výstuže vedú k výraznejšiemu zapojeniu hexagonálneho prvku do prenosu ťahových síl. Z hľadiska mechanizmu porušenia je významné, že oblasti zvýšeného prvého hlavného napätia σ_1 v spodných vláknach a v okolí hexagonálnej výstuže predstavujú potenciálne miesta iniciácie trhlín. Zmena výšky výstuže tak neovplyvňuje len celkovú úroveň napätia, ale aj charakter a lokalizáciu napätového poľa v krehkej maltovej matici, čo má priamy vplyv na spôsob a priebeh porušenia pozorovaný v experimentoch.

Na základe týchto výsledkov boli zvolené práve dva rezy Obr. 7.4, ktoré sú podrobnejšie zobrazené a rozobrané v ďalšej podkapitole.

7.3.2. Rezné roviny



Obr. 7.6: Prvé hlavné napätia σ_1 v maltovej matrici – rez lokáciou 1



Obr. 7.7: Prvé hlavné napätia σ_1 v maltovej matrici – rez lokáciou 2

Rezné roviny boli zvolené tak, aby prechádzali strednou časťou vzorky v oblasti maximálneho ohybového momentu a umožnili detailnú analýzu rozloženia prvého hlavného napätia σ_1 v maltovej matrici v bezprostrednom okolí hexagonálnej polymérnej výstuže. Zobrazenie rezov poskytuje doplnkový pohľad na vnútorné napäťové pole, ktoré nie je možné úplne zachytiť z povrchových pohľadov, a umožňuje presnejšie posúdiť interakciu medzi maltovou matricou a výstužou v kritickej ťahovej zóne.

Rez vedený lokáciou 1 poskytuje detailný pohľad na rozloženie prvého hlavného napätia σ_1 v maltovej matrici v priereze prechádzajúcom oblasťou hexagonálnej výstuže. Pre všetky uvažované výšky výstuže $h = 5, 10, 15$ a 20 mm je zreteľné, že zvýšené hodnoty σ_1 sa koncentrujú v spodných vláknach maltovej časti, pričom ich priestorové rozloženie je výrazne ovplyvnené geometriou výstuže. Pri nižšej výške výstuže ($h = 5$ mm) je napäťové pole relatívne rozptýlené a maximálne hodnoty σ_1 sú rozložené na väčšej ploche, čo naznačuje miernejšie zapojenie výstuže do prenosu ťahových síl. So zvyšujúcou sa výškou výstuže dochádza k výraznejšej lokalizácii napätia v okolí spodnej časti hexagonálnej geometrie, čo poukazuje na intenzívnejší prenos napätia medzi matricou a polymérnym prvkom. Rez lokáciou 1 tak názorne dokumentuje vplyv výšky výstuže na redistribúciu ťahových napätí v maltovej matrici v bezprostrednej blízkosti výstuže.

Rez vedený lokáciou 2 dopĺňa predchádzajúcu analýzu a umožňuje posúdiť rozloženie napätia σ_1 v inom charakteristickom priereze prechádzajúcom strednou časťou hexagonálnej výstuže. Toto zobrazenie poskytuje detailnejšiu informáciu o prenose ťahových napätí v smere kolmom na rez lokáciou 1 a umožňuje overiť konzistentnosť napäťového poľa v rôznych rovinách rezu.

Aj v tomto prípade je možné pozorovať, že maximálne hodnoty prvého hlavného napätia σ_1 sa koncentrujú predovšetkým v spodných vláknach maltovej matrice a v oblastiach tesne nad a medzi jednotlivými ramenami hexagonálnej výstuže. So zvyšujúcou sa výškou výstuže dochádza k zvýrazneniu týchto koncentrácií, čo poukazuje na rastúci vplyv výstuže na lokálnu redistribúciu napätí. Rez lokáciou 2 tak potvrdzuje trend pozorovaný v reze lokáciou 1 a zdôrazňuje význam geometrického usporiadania polymérnej výstuže pre napäťový stav v krehkej maltovej fáze.

Porovnanie výsledkov v oboch rezných rovinách ukazuje, že výška hexagonálnej polymérnej výstuže významne ovplyvňuje úroveň aj lokalizáciu prvého hlavného napätia

σ_1 v maltovej matrici. Zatiaľ čo pri menších výškach výstuže je napäťové pole rozložené rovnomernejšie, pri vyšších výškach dochádza k výraznejšej koncentrácii napätí v spodnej časti prierezu a v okolí výstuže. Tieto oblasti predstavujú potenciálne miesta iniciácie trhlín, čo je v súlade s experimentálnymi pozorovaniami porušenia a potvrdzuje význam optimalizácie geometrie polymérnej výstuže z hľadiska obmedzenia koncentrácií napätia v maltovej matrici.

8. Experimentálne dáta

Vo výpočtových a experimentálnych modeloch bol použitý betón s cementovou maltou CEM I 42,5 R. Na výstuže sa používal 3D tlačný PETG. Pri 3D tlači boli namerané hodnoty: teplota trysky 250 °C, teplota podložky 80 °C, tlačilo sa po výškach 0,2mm a šírka extrúzie bola 0,25mm, tlač prebiehala na tlačiarni PRUSA XL tryska s priemerom 0,25 mm po 4 vrstvách.

8.1. Vplyv orientácie filamentov na správanie vzoriek pri ohybovej skúške

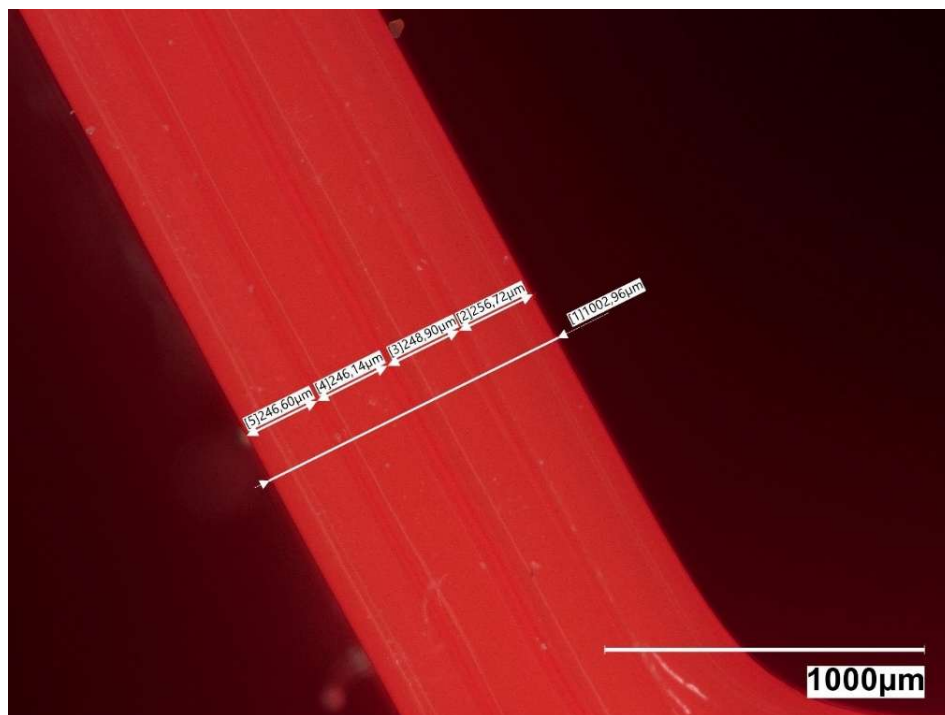
Na základe mikroskopickej analýzy vnútornej štruktúry skúšobných vzoriek je možné konštatovať, že extrudované filamenty sú orientované približne rovnobežne so smerom hlavného ťahového napätia vznikajúceho v spodných vláknoch pri ohybovej skúške. Takéto usporiadanie filamentov zodpovedá orientácii výplne 0°, ako je bežne definovaná v literatúre pre technológiu FFF.

Pri tejto orientácii je ohybové zaťaženie prenášané predovšetkým kontinuálnym materiálom jednotlivých filamentov, čo vedie k efektívnejšiemu prenosu napätia a vyššej mechanickej tuhosti. Vzhľadom na to, že napätia sú vedené pozdĺž filamentov, je výrazne obmedzený vplyv rozhraní medzi filamentmi a jednotlivými vrstvami. Orientácia 0° sa preto vyznačuje vyššou ohybovou tuhosťou a únosnosťou v porovnaní s orientáciami 45° a 90° a porušenie materiálu je spravidla iniciované až pri vyšších úrovniach namáhania.

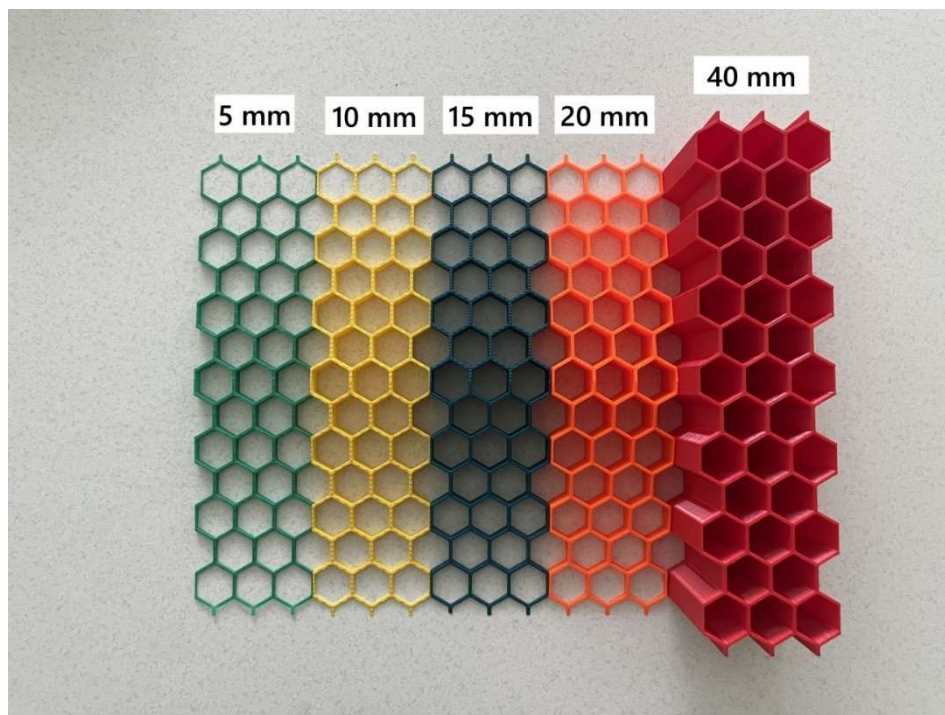
Z hľadiska interpretácie experimentálnych výsledkov táto orientácia reprezentuje mechanicky najvýhodnejší prípad, pri ktorom sa prejavuje maximálny potenciál materiálových vlastností tlačeneho polyméru. Vplyvy anizotropie materiálu a kvality medzivrstvového spojenia sú v tomto prípade potlačené, čo umožňuje analyzovať správanie materiálu pri priaznivom rozložení napätí a slúži ako referenčný stav pre porovnanie s menej priaznivými orientáciami.

Výsledky ohybových skúšok zároveň potvrdzujú, že najvyššia ohybová únosnosť je dosahovaná pri orientácii 0°, pri ktorej sú filamenty orientované rovnobežne so smerom hlavných ťahových napätí. Naopak, mechanicky najmenej priaznivou orientáciou je 90°, zatiaľ čo orientácia 45° predstavuje kompromisný stav s čiastočnou redistribúciou napätí. Orientácia použitá v tomto experimente (Obr. 3.1) tak poskytuje vhodný referenčný

základ pre porovnanie s numerickými simuláciami a pre posúdenie účinnosti navrhovanej polymérnej výstuže.



Obr. 8.1: Mikroskopický pohľad na AM výstuhy



Obr. 8.2: Vytlačené výstuhy rôznych veľkostí

8.2. Vzorky

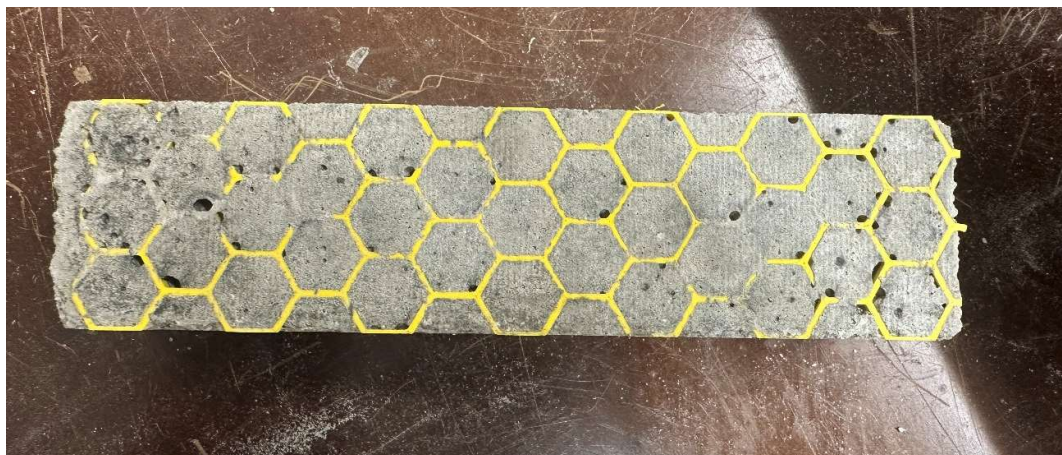
Pre experiment bolo za pomoci FFF vyrobených 6 druhov prvkov. 5 prvkov bolo s výstuhou a 1 prvok bol pre porovnanie bez výstuhy. Výstuhy sa líšili vo výške trojuholníka 5 mm, 10 mm, 15 mm, 20 mm a 40 mm. (pozri Obr. 8.2). Výstuhy boli z materiálu PETG. Z každého druhu bolo vyrobených 15 vzoriek.(Obr. 8.3) Pre všetky vzorky boli prvé tri referenčné pre určenie statickej pevnosti. Zvyšné vzorky boli testované na únavu.



Obr. 8.3: Všetky experimentálne vzorky pred únavovou skúškou

Po vyhotovení polymérnych výstuží technológiou FFF boli tieto prvky presne osadené do pripraveného debnenia, kde bolo zabezpečené ich správne priestorové uloženie a fixácia v požadovanej polohe. Následne bol do debnenia kontinuálne uložená čerstvá malta, ktorá úplne obklopila tlačene výstuže a vytvoril kompozitný systém pozostávajúci z polymérnej výstuže a cementovej matrice. Proces betonáže bol realizovaný s dôrazom na rovnomerné vyplnenie priestoru, minimalizáciu vzniku vzduchových dutín a zabezpečenie dostatočného kontaktu medzi betónom a povrchom polymérnych prvkov(Obr. 8.4). Po zabetónovaní vzoriek prebehlo ich ošetrovanie a zrenie betónu v súlade s príslušnými

technologickými postupmi, aby boli dosiahnuté stabilné a reprodukovateľné materiálové vlastnosti skúšaných telies.



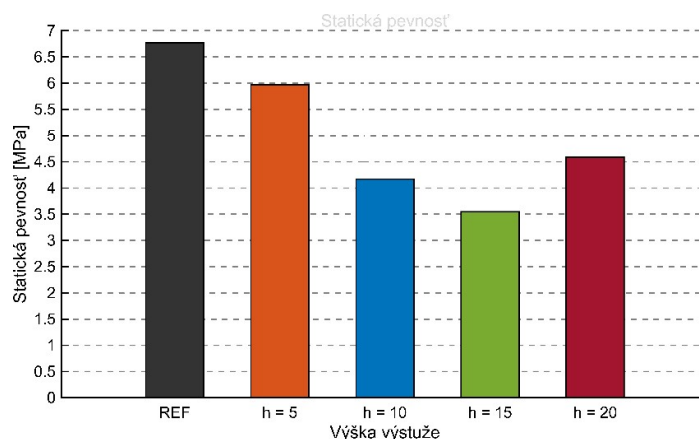
Obr. 8.4: pohľad na spodnú stranu vzorky

8.3. Výsledky experimentálnej skúšky

Experimentálny program bol realizovaný v niekoľkých etapách. V úvodnej fáze boli najskôr vykonané statické skúšky zamerané na stanovenie pevnostných charakteristík referenčných prvkov. Tieto skúšky boli realizované na troch referenčných vzorkách, ktoré slúžili na určenie statickej pevnosti a na definovanie počiatočnej úrovne zaťaženia pre následné únavové skúšky. Výsledky statických skúšok tak poskytli základný referenčný rámec pre návrh experimentálneho zaťažovacieho protokolu a umožnili porovnanie správania referenčných a vystužených vzoriek.

Tabuľka 7: Statické pevnosti pre jednotlivé výstuže

[MPa]	REF	$h = 5$	$h = 10$	$h = 15$	$h = 20$	$h = 40$
S_1	6,79	5,80	3,55	3,45	4,42	4,62
S_2	6,72	6,08	4,49	3,65	4,52	4,22
S_3	6,79	6,03	4,47	3,49	4,83	3,85



Obr. 8.5: Priemer statickej pevnosti pre jednotlivé výstuže

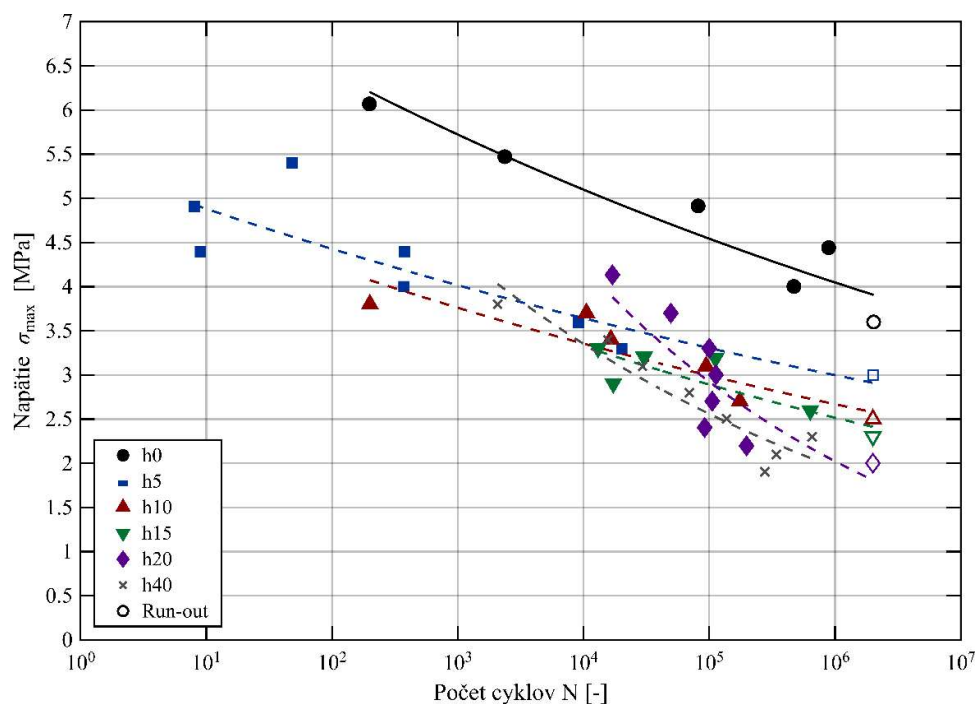
Obr. 8.5 znázorňuje výsledky statickej ohybovej pevnosti skúšaných vzoriek v závislosti od výšky polymérnej výstuže. Na osi y je uvedená maximálna statická pevnosť v MPa, zatiaľ čo na osi x sú jednotlivé varianty vzoriek rozdelené podľa výšky výstuže, vrátane referenčnej vzorky bez výstuže.

Referenčné vzorky dosahujú najvyššiu hodnotu statickej pevnosti, ktorá sa pohybuje približne na úrovni 6,7 MPa. Táto hodnota predstavuje východiskový referenčný stav pre porovnanie správania vystužených vzoriek. Zavedením polymérnej výstuže dochádza vo všeobecnosti k poklesu maximálnej statickej pevnosti, pričom veľkosť tohto poklesu závisí od výšky použitej výstuže. Vzorky s menšou výškou výstuže $h = 5$ mm a $h = 10$ mm vykazujú relatívne vyššie hodnoty statickej pevnosti v porovnaní s ostatnými vystuženými variantmi. S ďalším zvyšovaním výšky výstuže na $h = 15$ mm je pozorovaný výraznejší pokles pevnosti, ktorý dosahuje minimum zo všetkých analyzovaných variantov. Tento trend naznačuje zníženie efektívneho prenosu napätia v kompozitnom systéme pri tejto konfigurácii výstuže. Pri výške výstuže $h = 20$ mm dochádza k opätovnému nárastu statickej pevnosti, čo môže súvisieť s priaznivejším zapojením polymérnej výstuže do ťahovej zóny pri ohybovom namáhaní. Pri najvyššej analyzovanej výške výstuže $h = 40$ mm je statická pevnosť opäť mierne nižšia, avšak stále vyššia než pri variante $h = 15$ mm.

Celkovo graf poukazuje na to, že statická pevnosť vzoriek nie je monotónnou funkciou výšky polymérnej výstuže. Naopak, výsledky naznačujú existenciu optimálneho rozsahu výšky výstuže, pri ktorom dochádza k efektívnejšej spolupráci polymérneho prvku

s betónovou matricou. Získané hodnoty statickej pevnosti slúžili ako základ pre návrh úrovni cyklického zaťaženia v následnom únavovom experimente.

Výsledky boli ďalej spracované vo forme závislosti maximálneho ohybového napätia k počtu zaťažovacích cyklov, z čoho je možné posúdiť únavovú odolnosť skúmaných konfigurácií. Medza únavy bola v rámci experimentu stanovená na úrovni 2×10^6 zaťažovacích cyklov. Vzorky, pri ktorých počas skúšky nedošlo k porušeniu a ktoré dosiahli túto hranicu bez lomu, boli v súlade s bežnou terminológiou označené ako „run-out“ vzorky. Takto definované vzorky sú považované za prvky s prakticky nekonečnou životnosťou v rámci uvažovaného rozsahu cyklického zaťaženia.



Obr. 8.6: S-N krivky pre experimentálnu skúšku

Tabuľka 8: Parametre materiálu a, b, R opisujúce mechanické vlastnosti vzoriek

	a	b	R	$\sigma(N)$
Ref	7,65	-0,043	0,934	6,93
5	5,62	-0,055	0,679	4,08
10	5,30	-0,05	0,807	4,22
15	5,79	-0,06	0,720	3,84
20	18,40	-0,16	0,761	1,93

Obr. 8.6 zobrazuje výsledky únavovej skúšky vo forme závislosti maximálneho ohybového napätia od počtu zaťažovacích cyklov do porušenia. Na osi x je počet cyklov v logaritmickej mierke na osi y je napätie v MPa. Všetky zobrazené skupiny vykazujú typický únavový trend, so zvyšujúcim sa počtom cyklov klesá úroveň napätia.

Experimentálne body jednotlivých skupín boli aproximované pomocou Basquinovho mocninového modelu (pozri Rovnica (8)) , pričom výsledné regresné krivky sú charakterizované parametrami a a b uvedenými v Tabuľka 8. Hodnota parametra a predstavuje úroveň napätia zodpovedajúcu nízkemu počtu cyklov a odráža celkovú únavovú pevnosť materiálu, zatiaľ čo exponent b vyjadruje strmosť S–N krivky a citlivosť vzorky na cyklické zaťaženie. Koeficient determinácie R slúži na posúdenie kvality regresného priblíženia experimentálnych dát.

Referenčné nevystužené vzorky (Ref) vykazujú najvyššiu úroveň únavovej odolnosti, čo sa prejavuje najvyššou hodnotou parametra a a zároveň najmenšou absolútnou hodnotou exponentu b . Tento fakt naznačuje miernejší pokles únosnosti so zvyšujúcim sa počtom cyklov a stabilnejšie únavové správanie v porovnaní s ostatnými variantmi. Vysoká hodnota koeficientu determinácie R potvrdzuje dobrú zhodu experimentálnych dát s použitým regresným modelom.

Vzorky s polymérnou výstužou vykazujú v porovnaní s referenčnými vzorkami nižšie hodnoty parametra a , čo zodpovedá nižšej úrovni maximálnych napätí dosiahnutých pri rovnakom počte cyklov. Exponent b sa pri týchto vzorkách pohybuje v intervale od približne $-0,05$ do $-0,16$, pričom vyššie absolútne hodnoty exponentu indikujú výraznejšiu citlivosť na cyklické namáhanie. Najvýraznejší pokles únosnosti so zvyšujúcim sa počtom cyklov vykazujú vzorky s výškou výstuže 20 mm, čo sa prejavuje najvyššou absolútnou hodnotou exponentu $b = -0,16$.

Hodnota σ uvedená v Tabuľka 8 predstavuje odhad maximálneho ohybového napätia zodpovedajúceho vopred definovanej hranici únavovej životnosti, pričom rozdiely medzi jednotlivými variantmi poukazujú na výrazný vplyv geometrie polymérnej výstuže na únavové správanie analyzovaných vzoriek. Získané výsledky potvrdzujú, že zmena výšky polymérnej výstuže ovplyvňuje nielen statickú pevnosť, ale aj rýchlosť degradácie únosnosti pri cyklickom zaťažení.

Variant s výškou polymérnej výstuže $h = 40$ mm nebol zahrnutý do detailnej predikcie únavovej životnosti, keďže jeho správanie sa výrazne odlišovalo od ostatných

analyzovaných konfigurácií a neposkytovalo reprezentatívne ani spoľahlivé údaje pre porovnanie s numerickým modelom. Z grafu S–N kriviek je zrejmé, že vzorky s výškou výstuže $h = 40$ mm vykazujú výrazne nižšiu únavovú odolnosť v porovnaní s ostatnými variantmi, a to aj pri relatívne nízkych počtoch zaťažovacích cyklov. Rozptyl experimentálnych bodov je v tomto prípade výrazne vyšší, pričom regresná krivka má strmší sklon, čo indikuje zvýšenú citlivosť systému na cyklické zaťaženie a nestabilné únavové správanie. Z mechanického hľadiska je tento jav možné pripísať neprimerane veľkému zapojeniu polymérnej výstuže do ťahovej zóny prierezu, čo vedie k nadmernej koncentrácii napätí na rozhraní medzi maltovou matricou a polymérnym prvkom. Namiesto priaznivej redistribúcie napätí výstuž v tomto prípade pôsobí ako zdroj lokalizovaných koncentrácií napätia.

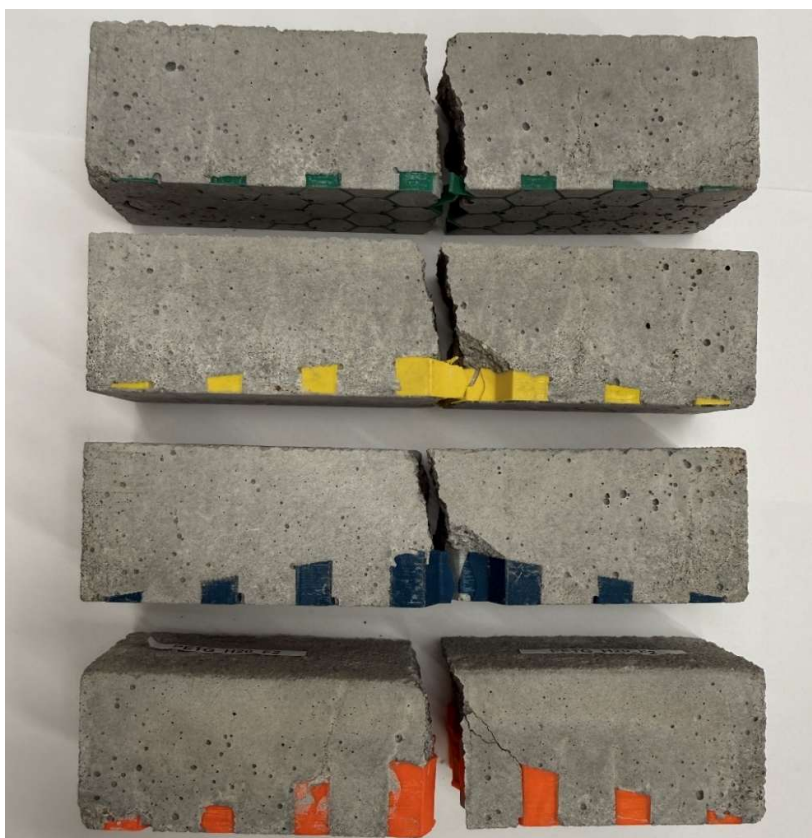
Ďalším faktorom je skutočnosť, že správanie vzoriek s výškou výstuže $h = 40$ mm už prestáva byť porovnateľné s referenčným prvkom aj s ostatnými vystuženými variantmi. Táto konfigurácia predstavuje odlišný mechanizmus prenosu zaťaženia, pri ktorom dominuje lokálne pôsobenie výstuže namiesto globálnej spolupráce kompozitného systému. Z hľadiska validácie numerického modelu by preto zahrnutie tohto variantu mohlo viesť k skresleniu porovnania medzi experimentálnymi a numerickými dátami.

Na základe uvedených skutočností bol variant s výškou výstuže $h = 40$ mm vyhodnotený ako mechanicky nevhodný a z hľadiska únavovej odolnosti neefektívny, a preto nebol zahrnutý do ďalšej predikcie životnosti ani do detailného porovnania s numerickými výsledkami.

9. Vyhodnotenie poškodenia experimentálnych vzoriek

Cieľom tejto kapitoly je porovnať výsledky numerickej analýzy s experimentálnymi údajmi získanými z mechanických skúšok a posúdiť mieru zhody medzi predikciou modelu a reálnym správaním skúšaných vzoriek. Porovnanie numerického a experimentálneho prístupu predstavuje kľúčový krok validácie výpočtového modelu a umožňuje overiť, do akej miery je zvolený materiálový model, geometrická reprezentácia a okrajové podmienky schopné realisticky popísať správanie analyzovaného kompozitného systému. Porovnanie je zamerané na lokalizáciu oblastí identifikovaných pomocou prvých hlavných napätí σ_1 (zobrazených na 3D modeli s výsledkami Obr. 7.2 ,Obr. 7.5 ,Obr. 7.6 a Obr. 7.7), ktoré sú z hľadiska vzniku trhlín v krehkej maltovej matrici na hraniciach s 3D tlačenou výstužou.

V experimente sa porušenie vzoriek neprejavovalo náhodne, ale opakovane sa iniciovalo v charakteristických oblastiach prvku, predovšetkým v ťahovej zóne spodných vlákien v strednej časti rozpätia a v okolí hexagonálnej polymérnej výstuže.



Obr. 9.1: Porušené vzorky s veľkosťou výstuže $h = 5, 10, 15, 20$ mm

Na Obr. 9.1 sú znázornené porušené skúšobné vzorky vystužené 3D tlačou polymérnou výstužou s hexagonálnou geometriou po ukončení ohybových skúšok. Jednotlivé série vzoriek sa líšia výškou polymérnej výstuže, pričom farebné označenie slúži na ich jednoznačnú identifikáciu. Na všetkých vzorkách je zreteľná dominantná trhlinka prechádzajúca celým prierezom v oblasti maximálneho ohybového momentu. Trhlinka sa iniciuje v spodných vláknach prvku, kde sa pri ohybovom namáhaní koncentrujú ťahové napätia, a následne sa šíri smerom k hornej tlakovej zóne.



Obr. 9.2: Porušené vzorky s veľkosťou výstuže $h = 5$ mm

Na Obr. 9.2 je zobrazený bočný a spodný pohľad na porušené vzorky série PETG H5, kde je zreteľná poloha polymérnej výstuže v spodnej časti prierezu. Priebeh trhliny je prevažne kolmo orientovaný na pozdĺžnu os vzorky, pričom v oblasti kontaktu s polymérnou výstužou dochádza k lokálnym odklonom trhliny od ideálne rovinného priebehu. Tento jav poukazuje na interakciu medzi betónovou matricou a polymérnou výstužou už pri nižšej výške výstuže.



Obr. 9.3: Porušené vzorky s veľkosťou výstuže $h = 10$ mm

Detailné zobrazenie porušenia vzoriek série PETG H10 je uvedené na Obr. 9.3. Zo spodného pohľadu je zrejmé, že priebeh trhliny výraznejšie kopíruje geometriu hexagonálnej výstuže. Trhlina sa lokálne viaže na rozhranie medzi maltovou matricou a polymérnym materiálom, pričom v niektorých oblastiach dochádza k jej presmerovaniu pozdĺž ramien hexagonálnej štruktúry. Bočný pohľad zároveň naznačuje, že porušenie prebieha postupne a nie je striktne lokalizované do jedného bodu.



Obr. 9.4: Porušené vzorky s veľkosťou výstuže $h = 15$ mm

Na Obr. 9.4 sú znázornené porušené vzorky série PETG H15, pri ktorých je pozorovateľné výraznejšie odkrytie polymérnej výstuže v oblasti porušenia. V porovnaní s nižšími výškami výstuže je zreteľnejšia interakcia medzi šírením trhliny a hexagonálnou geometriou výstuže, pričom dochádza k lokálnemu obečeniu trhliny okolo polymérnych prvkov a k čiastočnému premosteniu trhliny výstužou.



Obr. 9.5: Porušené vzorky s veľkosťou výstuže $h = 20$ mm



Obr. 9.6: Porušené vzorky s veľkosťou výstuže $h = 20 \text{ mm}$, porovnanie

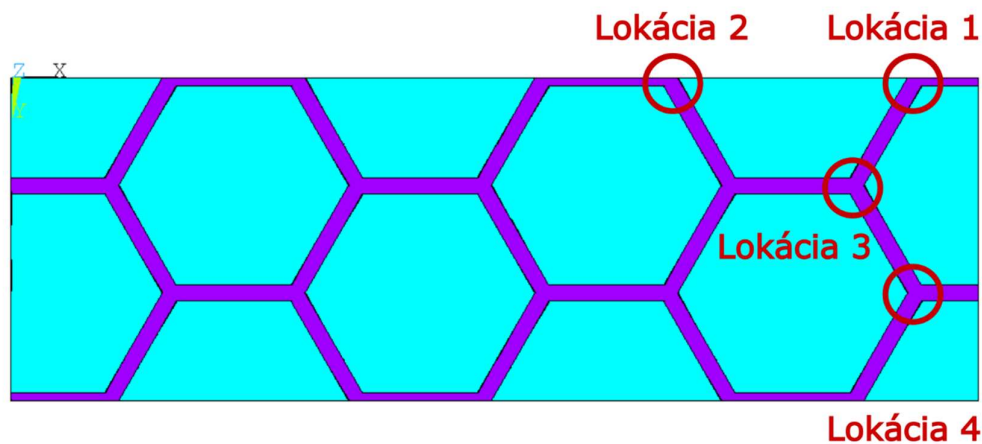
Na Obr. 9.5 sú znázornené porušené vzorky s označením PETG H20 po ukončení únavovej skúšky. Na vzorkách je zreteľná dominantná trhlinka prechádzajúca celým prierezom v oblasti maximálneho ohybového momentu. Trhlinka sa iniciuje v spodných vláknach prvku, kde sa pri ohybovom namáhaní koncentrujú ťahové napätia, a následne sa šíri smerom k hornej tlakovej zóne. Charakter trhliny poukazuje na krehké porušenie maltovej matrice, pričom prítomnosť polymérnej výstuže ovplyvňuje jej smer a lokálny priebeh.

Detailnejší pohľad na poškodenie je znázornený na Obr. 9.6, kde je uvedený pohľad na spodnú stranu vzorky a bočný pohľad na oblasť porušenia. Zo spodného pohľadu je zrejmé, že trhlinka sa výrazne viaže na geometriu hexagonálnej polymérnej výstuže. Priebeh trhliny kopíruje rozhranie medzi maltovou matricou a polymérnym materiálom, pričom v niektorých prípadoch dochádza k lokálnemu obtečeniu alebo odklonu trhliny pozdĺž ramien hexagonálnej štruktúry. Tento jav naznačuje, že výstuž pôsobí ako prvok redistribúcie napätia a ovplyvňuje trajektóriu šírenia trhliny v krehkej matrici. Bočný pohľad ďalej poukazuje na to, že porušenie nie je lokalizované výlučne do jedného bodu,

ale má charakter postupného otvárania trhliny v priebehu cyklického namáhania. Viditeľné je čiastočné zachovanie integrity polymérnej výstuže aj po porušení maltovej matrice, čo poukazuje na jej schopnosť čiastočne prenášať ťahové napätia aj po vzniku trhliny. Tento mechanizmus je významný z hľadiska únavového správania systému, keďže prispieva k spomaleniu degradácie tuhosti a k stabilnejšiemu priebehu porušenia. Pozorované poškodenia jednoznačne potvrdzujú, že kritické oblasti identifikované v experimente korešpondujú s lokalitami zvýšených hodnôt prvého hlavného napätia σ_1 predikovaných numerickým modelom.

Na základe analýzy porušených vzoriek z únavových skúšok boli identifikované charakteristické miesta iniciácie a šírenia poškodenia. Všetky sledované porušenia sa koncentrovali v ťahovej zóne spodných vlákien prvku, pričom rozhodujúcu úlohu zohrávalo rozhranie medzi maltovou matricou a 3D tlačenu polymérnou výstužou. Práve v tejto oblasti dochádzalo k vzniku dominantných trhlín a k ich interakcii s hexagonálnou geometriou výstuže.

Z tohto dôvodu boli pre ďalšie vyhodnotenie zvolené štyri reprezentatívne lokácie situované výlučne na rozhraní medzi maltou a polymérnou výstužou, ktoré sú zobrazené v spodnom pohľade na vzorku (Obr. 9.7), teda v oblasti maximálnych ťahových napätí. Zvolené lokácie reprezentujú miesta, kde sa v experimentoch opakovanne pozorovalo iniciovanie porušenia alebo výrazná zmena smeru šírenia trhliny vplyvom geometrie hexagonálnej štruktúry.



Obr. 9.7: Vybrané lokácie na testovanie predikcie životnosti

Identické lokácie boli následne analyzované aj v numerickom modeli prostredníctvom vyhodnotenia polí prvého hlavného napätia σ_1 . Tento prístup umožňuje priamu koreláciu medzi experimentálne pozorovanými miestami poškodenia a numericky predikovanými koncentráciami napätia na rozhraní materiálov. Výber lokácií tak umožňuje lepšie vyhodnotiť predikciu životnosti daných experimentálnych vzoriek pri únave a pri aplikovanom zaťažení.

10. Úprava predikcie životnosti pri únave

Táto kapitola sa zameriava na predikciu únavovej životnosti skúmaných vzoriek na základe numerickej analýzy napät'ového poľa a jeho porovnania s experimentálnymi výsledkami. Na základe výsledkov numerických a experimentálnych dát je cieľom určiť životnosť danej vzorky pre aplikované zaťaženie. Predikcia sa vykonáva lokálne vo vybraných miestach nachádzajúcich sa na rozhraní medzi maltovou maticou a 3D tlačnou polymérnou výstužou, kde sa experimentálne pozorovalo počiatočné únavové poškodenie. Pre každú konfiguráciu výšky polymérnej výstuže sú vyhodnotené štyri reprezentatívne lokácie definované v predchádzajúcej kapitole, ktoré sa následne porovnávajú s referenčnou nevystuženou vzorkou. Takto zvolený prístup umožňuje posúdiť nielen globálny vplyv prítomnosti výstuže na únavové správanie systému, ale aj jej lokálny účinok v kritických oblastiach rozhrania, kde dochádza k iniciácii trhlín. Pre všetky skupiny dát boli výsledky aproximované pomocou Basquinovho mocninového modelu, pričom príslušné regresné krivky sú v grafe znázornené prerušovanými čiarami.

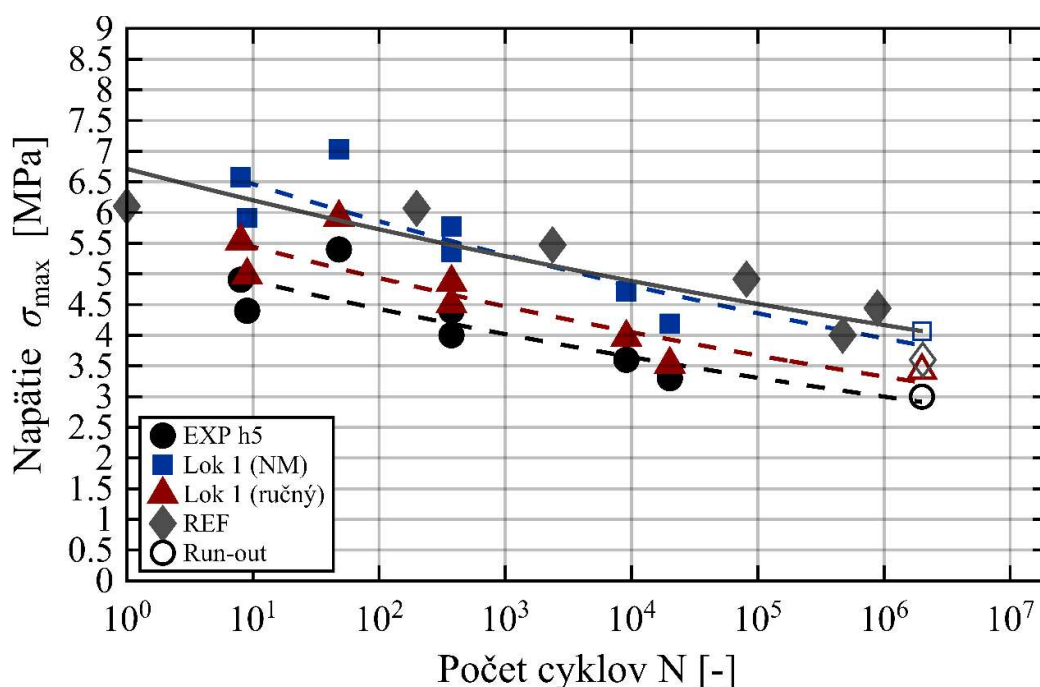
Tabuľka 9: Porovnanie výsledkov napätí 3D numerickým modelom a ručne prepočítanými výsledkami experimentu

Porovnanie výsledkov				
numerický model [MPa]				
Výška \ LOK	1	2	3	4
h5	3,8	3,2	3,9	3,31
h10	3,47	4,15	3,9	3,6
h15	2,46	3,7	3,3	2,5
h20	1,25	3,54	2,8	1,26
ručný prepočet [MPa]				
Výška \ LOK	1	2	3	4
h5	2,92	2,34	2,75	2,92
h10	3,09	2,81	3,04	3,09
h15	2,72	3,20	2,96	2,72
h20	0,99	3,12	1,85	0,99

Tabuľka 9 porovnáva maximálne hodnoty napätia získané numerickým modelom a ručným analytickým prepočtom podľa rovníc (9)-(16), pre štyri sledované lokácie pri rôznych výškach polymérnej výstuže. Výsledky numerického modelu dosahujú vo

väčšine prípadov vyššie hodnoty napätia ako ručný prepočet, čo je spôsobené detailnejším zachytením geometrie, materiálovej nehomogenity a redistribúcie napätí v numerickom modeli. Najvyššie rozdiely medzi oboma prístupmi sú pozorované pri menších výškach výstuže, kde numerický model predikuje výraznejšie napäťové koncentrácie v jednotlivých lokáciách. So zvyšujúcou sa výškou výstuže dochádza k celkovému poklesu maximálnych napätí, pričom rozdiely medzi numerickým a ručným výpočtom sa v niektorých lokáciách mierne zmenšujú.

V nasledujúcich grafoch bol Numerický model vyhodnotený pre referenčné zaťaženie 1 kN, pričom výsledné napätia boli následne lineárne prepočítané na úroveň zaťaženia použitého v experimente.

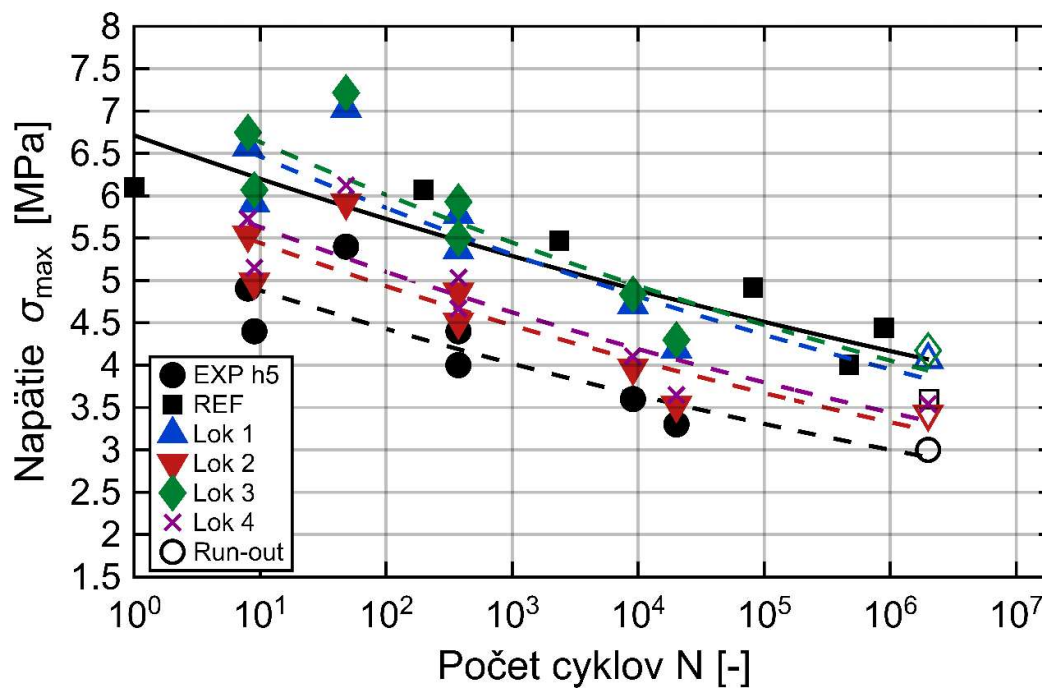


Obr. 10.1: Porovnanie ručného, numericky modelovaného a experimentálneho napätia pri únave pre výšku $h = 5$ mm v lokácii 1

Z Obr. 10.1 je zrejmé, že ručný výpočet poskytuje konzervatívny odhad napätí, ktorý sa nachádza medzi experimentálnymi hodnotami a numerickou predikciou. Napriek zjednodušujúcim predpokladom dokáže ručný model správne zachytiť trend poklesu napätia s rastúcim počtom cyklov. Táto zhoda potvrdzuje význam ručného výpočtu ako referenčného nástroja na kontrolu numerického modelu a na základnú orientačnú predikciu únavovej životnosti, pričom detailnejšie rozloženie napätí je už možné spoľahlivo analyzovať pomocou numerického modelovania.

10.1. Výstuha s výškou $h = 5$ mm

Nasledujúci graf znázorňuje S–N krivky pre jednotlivé kritické lokácie na rozhraní maltovej matrice a PETG výstuže v porovnaní s experimentálnymi dátami pre $h = 5$ mm.



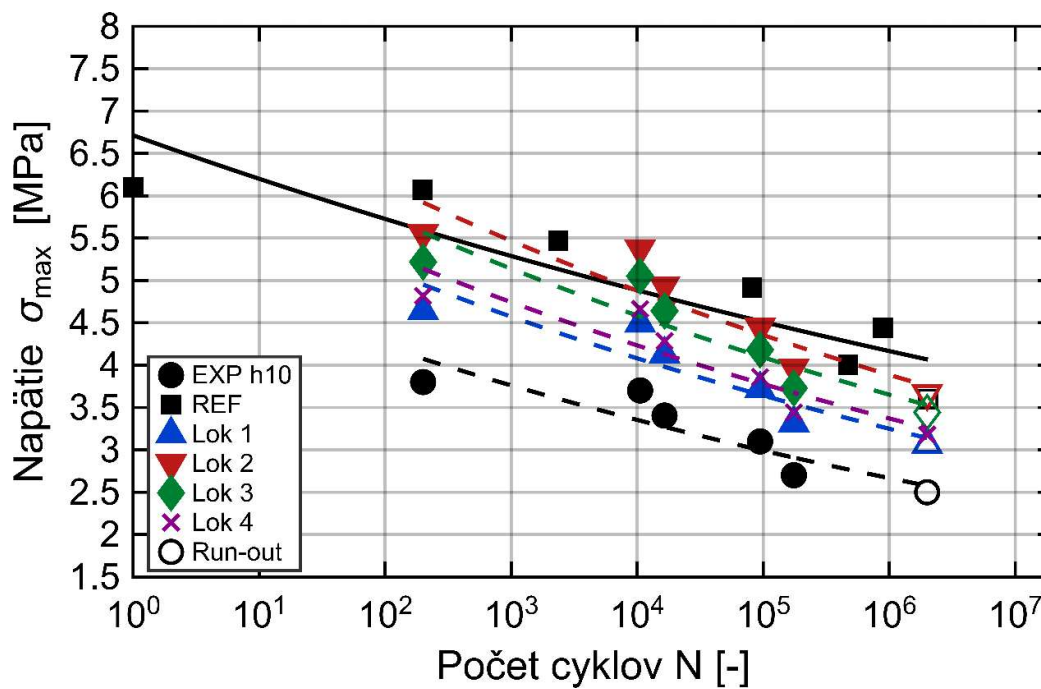
Obr. 10.2: Predikcia životnosti (S–N krivka) pre model s výškou výstuhy 5 mm

Z porovnania jednotlivých lokácií je zrejmé, že úroveň napätia sa lokálne líši v závislosti od geometrickej polohy v okolí hexagonálnej výstuže. Najvyššie hodnoty napätia a zároveň najstrmší pokles únosnosti so zvyšujúcim sa počtom cyklov sú pozorované v lokácii **Lok 3**, čo naznačuje jej najkritickejší charakter z hľadiska iniciácie únavového poškodenia. Naopak, lokácie Lok 2 a Lok 4 vykazujú mierne nižšie úrovne napätia a pozvoľnejší pokles, čo poukazuje na priaznivejšiu redistribúciu napätia.

Porovnanie numerických kriviek s experimentálnymi dátami ukazuje, že úrovne napätí vypočítané v kritických lokáciách sa nachádzajú v blízkosti experimentálne stanovenej S–N krivky pre vystužený variant s výškou $h = 5$ mm. Tento fakt naznačuje dobrú schopnosť numerického modelu zachytiť lokálne únavové namáhanie v oblastiach, kde bolo v experimente pozorované iniciovanie porušenia. Zároveň je zreteľné, že referenčná nevystužená vzorka dosahuje vyššie hodnoty napätia pri rovnakom počte cyklov, čo poukazuje na priaznivý vplyv polymérnej výstuže na zníženie lokálneho napätového zaťaženia v maltovej matrici.

10.2. Výstuha s výškou $h = 10$ mm

Nasledujúci graf znázorňuje S–N krivky pre jednotlivé kritické lokácie na rozhraní maltovej matrice a PETG výstuže v porovnaní s experimentálnymi dátami pre $h = 10$ mm.



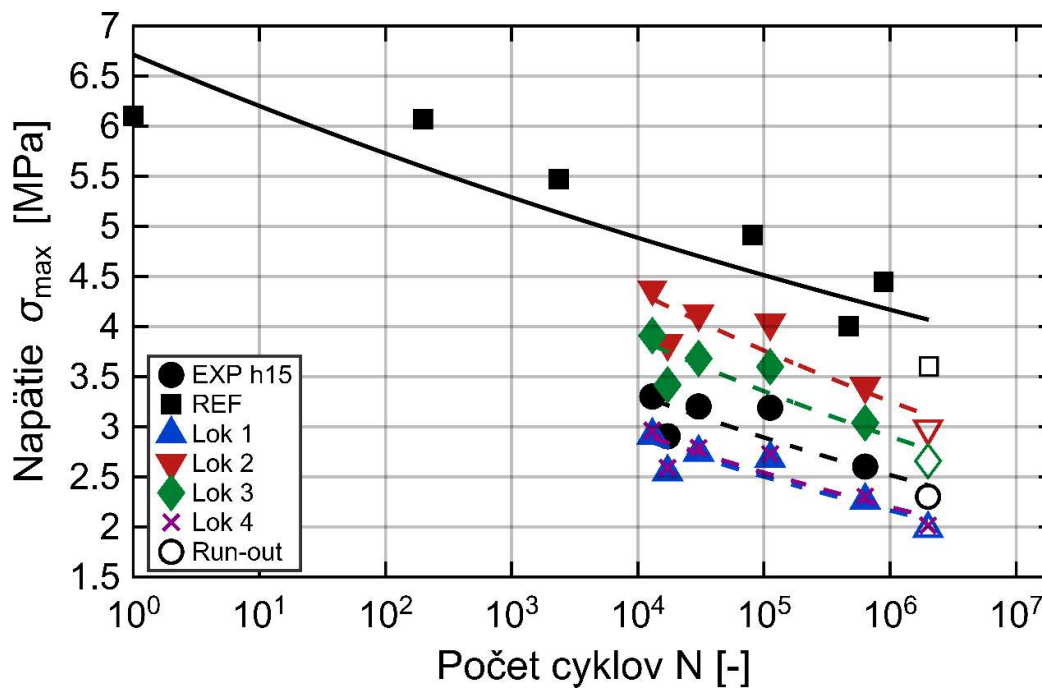
Obr. 10.3: Predikcia životnosti (S–N krivka) pre model s výškou výstuhy 10 mm

V porovnaní s výškou výstuže $h = 5$ mm je možné pozorovať mierny posun regresných kriviek smerom k nižším hodnotám napätia, čo naznačuje zníženie únavovej únosnosti pri zvýšení výšky polymérnej výstuže. Referenčná vzorka si naďalej zachováva najvyššiu úroveň napätia v celom sledovanom rozsahu cyklov, avšak rozdiel medzi referenčnou a vystuženými vzorkami je v niektorých lokáciách menej výrazný než pri nižšej výške výstuže.

Rozdiely medzi jednotlivými lokáciami sú miernejšie, pričom trendové krivky vykazujú podobné sklony a dobrú kvalitu aproximácie. To poukazuje na rovnomernejšie rozloženie napätí v oblasti rozhrania materiálov a na efektívnejšie zapojenie polymérnej výstuže do prenosu zaťaženia. Výška výstuže $h = 10$ mm sa tak javí ako konfigurácia, pri ktorej dochádza k priaznivej redistribúcii napätí bez vzniku výrazných lokálnych koncentrácií, čo má pozitívny vplyv na únavové správanie systému.

10.3. Výstuha s výškou $h = 15$ mm

Nasledujúci graf znázorňuje S–N krivky pre jednotlivé kritické lokácie na rozhraní maltovej matrice a PETG výstuže v porovnaní s experimentálnymi dátami pre $h = 15$ mm.



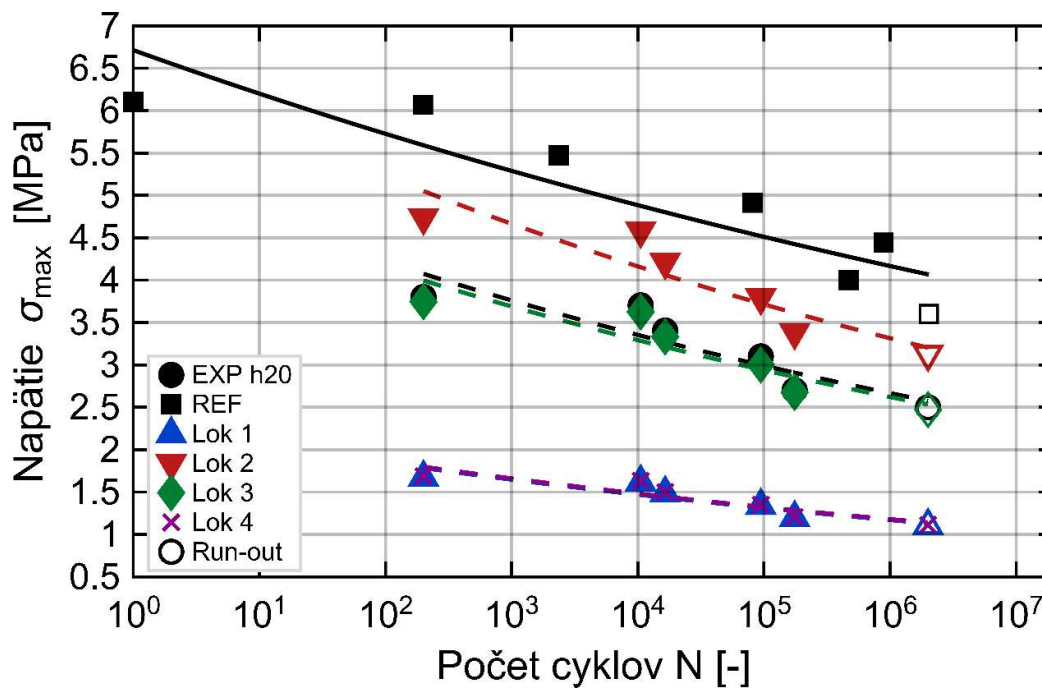
Obr. 10.4: Predikcia životnosti (S–N krivka) pre model s výškou výstuhy 15 mm

V porovnaní s predchádzajúcimi výškami výstuže je zrejмый výraznejší pokles úrovne napätia pre rovnaký počet cyklov, čo poukazuje na zhoršenie únavovej únosnosti systému. Tento efekt je najvýraznejší najmä pri niektorých lokáciách, kde trendové krivky vykazujú strmší sklon. Rozdiely medzi jednotlivými lokáciami sú v tomto prípade zreteľnejšie, čo indikuje nerovnomerné rozloženie napätí v oblasti rozhrania medzi maltou a výstužou.

Vyššia výška výstuže vedie k výraznejšiemu zapojeniu hexagonálnej štruktúry do ťahovej zóny, čo sa prejavuje lokálnymi koncentraciami napätia v kritických oblastiach. Táto skutočnosť môže urýchľovať iniciáciu únavového poškodenia a skracovať životnosť vzoriek. Výška výstuže $h = 15$ mm sa preto javí ako menej priaznivá z hľadiska únavového správania, čo je v súlade s pozorovaniami z experimentálnych skúšok.

10.4. Výstuha s výškou $h = 20$ mm

Nasledujúci graf znázorňuje S–N krivky pre jednotlivé kritické lokácie na rozhraní maltovej matrice a PETG výstuže v porovnaní s experimentálnymi dátami pre $h = 20$ mm.



Obr. 10.5: Predikcia životnosti (S–N krivka) pre model s výškou výstuhy 20 mm

Zo zobrazených výsledkov je zrejmé, že pri tejto výške výstuže dochádza k výraznej redukcii úrovne napätia už pri relatívne nízkom počte cyklov. Rozdiely medzi jednotlivými lokáciami sú výrazné, pričom niektoré lokácie vykazujú podstatne nižšiu únavovú únosnosť než ostatné. Tento jav poukazuje na silnú lokalizáciu napätí v oblasti rozhrania materiálov a na zvýšenú citlivosť systému na geometrické detaily výstuže.

Vysoká výška výstuže vedie k intenzívnemu zapojeniu polymérneho prvku do prenosu ťahových síl, avšak zároveň spôsobuje vznik výrazných koncentrácií napätia v kritických miestach, čo negatívne ovplyvňuje únavovú životnosť. V porovnaní s nižšími výškami výstuže je správanie systému výrazne menej stabilné a rozptyl výsledkov väčší. Výška $h = 20$ mm sa preto z hľadiska únavovej odolnosti javí ako najmenej priaznivá konfigurácia spomedzi analyzovaných variantov.

11. Vyhodnotenie výsledkov

Na základe porovnania experimentálnych pozorovaní poškodenia, numerických analýz polí prvého hlavného napätia σ_1 a následnej predikcie únavovej životnosti je možné konštatovať, že numerický model poskytuje konzistentný a fyzikálne opodstatnený opis správania skúmaného kompozitného systému. Kritické oblasti identifikované v numerickej analýze, situované na rozhraní medzi maltovou maticou a 3D tlačnou polymérnou výstužou v ťahovej zóne spodných vlákien, vykazujú veľmi dobrú zhodu s miestami iniciácie a šírenia poškodenia pozorovanými v únavových experimentoch.

Vyhodnotenie S–N kriviek pre jednotlivé výšky polymérnej výstuže potvrdzuje, že výška výstuže má významný vplyv na lokálnu úroveň napätia aj na charakter únavového správania. Pri nižších výškach výstuže ($h = 5$ mm a $h = 10$ mm) dochádza k relatívne rovnomernej redistribúcii napätí na rozhraní materiálov, pričom rozdiely medzi jednotlivými lokáciami sú malé a S–N krivky vykazujú stabilný priebeh. Tieto konfigurácie sa vyznačujú priaznivým pomerom medzi zapojením polymérnej výstuže do prenosu ťahových síl a mierou lokálnych koncentrácií napätia, čo sa pozitívne odráža aj na predikovanej únavovej životnosti.

So zvyšujúcou sa výškou výstuže ($h = 15$ mm a najmä $h = 20$ mm) sa však prejavuje rastúca nerovnomernosť napät'ového poľa v oblasti rozhrania. Numerická analýza v týchto prípadoch identifikuje výraznejšie lokálne koncentrácie prvého hlavného napätia, ktoré korešpondujú s väčším rozptylom S–N kriviek medzi jednotlivými lokáciami. Tento jav poukazuje na silnejšiu lokalizáciu poškodenia a na zvýšenú citlivosť systému na geometrické detaily hexagonálnej výstuže, čo sa negatívne premieta do únavovej životnosti.

Porovnanie s referenčnou nevystuženou vzorkou ukazuje, že prítomnosť polymérnej výstuže vedie vo všeobecnosti k zníženiu lokálnych napätí v maltovej matici, avšak tento priaznivý efekt nie je monotónne závislý od výšky výstuže. Získané výsledky naznačujú existenciu optimálneho rozsahu výšky polymérnej výstuže, pri ktorom je dosiahnutá efektívna spolupráca medzi výstužou a maticou bez výrazného nárastu koncentrácií napätia v kritických oblastiach.

Celkové vyhodnotenie potvrdzuje, že zvolený numerický prístup založený na analýze polí prvého hlavného napätia a jeho lokálnom vyhodnocovaní v kritických miestach rozhrania

je vhodný pre predikciu únavovej životnosti kompozitných prvkov s 3D tlačenou polymérnou výstužou. Kombinácia experimentálneho pozorovania poškodenia a numerickej analýzy tak poskytuje ucelený nástroj na hodnotenie vplyvu geometrie výstuže na únavové správanie a vytvára predpoklad pre optimalizáciu tvaru a rozmerov polymérnej výstuže z hľadiska dlhodobej životnosti.

12. Záver

Táto diplomová práca sa zaoberala štúdiom správania cementových kompozitných prvkov vystužených 3D tlačenou polymérnou výstužou s hexagonálnou architektúrou, pričom dôraz bol kladený najmä na vplyv geometrie výstuže, jej výšky a materiálových vlastností na rozloženie napätových polí a únavové správanie ohybom namáhaných prvkov. Na dosiahnutie stanovených cieľov bola využitá kombinácia numerického modelovania a vyhodnotenia dostupných experimentálnych údajov, čo umožnilo komplexnejší pohľad na analyzovaný kompozitný systém.

V teoretickej časti práce bol spracovaný prehľad aditívnych výrobných technológií a polymérnych materiálov vhodných pre výrobu aditívnych výstuží. Osobitná pozornosť bola venovaná technológii FFF a materiálu PETG, ktoré boli zvolené s ohľadom na ich dostupnosť, spracovateľnosť a mechanické vlastnosti.

Numerická analýza poukázala na to, že geometria polymérnej výstuže a jej výška majú výrazný vplyv na rozloženie napätových polí v cementovej matrici. Zvýšenie výšky HEX výstuže viedlo k miernejšiemu rozloženiu hlavných ťahových napätí a k priaznivejšej distribúcii zaťaženia v ťahovej oblasti ohybom namáhaného prvku. Výsledky naznačujú, že aditívna polymérna výstuž môže okrem nosnej funkcie zohrávať aj významnú úlohu pri ovplyvňovaní mechanizmu vzniku a šírenia trhlín.

Porovnanie numerických výstupov s experimentálnymi dátami preukázalo dobrú kvalitatívnu zhodu v lokalizácii kritických oblastí porušenia. Oblasti predikované numerickým modelom ako najviac namáhané korešpondovali s miestami iniciácie porušenia pozorovanými počas experimentálnych skúšok. Táto zhoda podporuje vhodnosť zvoleného modelovacieho prístupu a naznačuje, že numerický model je schopný zachytiť základné trendy správania analyzovaného systému.

V oblasti únavového namáhania výsledky poukázali na nepriaznivé ovplyvnenie únavovej životnosti vystužených prvkov. Analýza únavových kriviek naznačila, že geometrické usporiadanie výstuže a rozloženie napätí môžu mať vplyv na priebeh poškodzovania pri cyklickom zaťažení, a tým aj na celkové správanie konštrukcie v dlhodobom horizonte.

Na záver možno konštatovať, že využitie 3D tlačenej polymérnej výstuže s hexagonálnou architektúrou predstavuje zaujímavý a perspektívny prístup k modifikácii mechanického správania cementových kompozitov. Práca ukázala, že prepojenie aditívnej výroby, numerického modelovania a experimentálnych dát poskytuje vhodný základ pre ďalšie skúmanie tohto typu výstuží. Získané poznatky môžu slúžiť ako východisko pre budúci výskum, napríklad v oblasti optimalizácie geometrie výstuže a detailnejšieho štúdia rozhrania medzi polymérnou výstužou a cementovou matricou.

Citácie

- [1] ISLAM, Md Aminul, Md Hosne MOBARAK, Md Israfil Hossain RIMON, Md Zobair AL MAHMUD, Jubaraz GHOSH, Md Mir Shakib AHMED a Nayem HOSSAIN. Additive manufacturing in polymer research: Advances, synthesis, and applications. *Polymer Testing* [online]. Elsevier BV, 2024, 132, 108364 [cit. 2025-12-29]. ISSN 0142-9418. Dostupné z: doi:10.1016/j.polymertesting.2024.108364
- [2] *DIN EN ISO/ASTM 52900, Additive Fertigung - Grundlagen - Terminologie (ISO/ASTM 52900:2021): Additive manufacturing - general principles - fundamentals and vocabulary (ISO/ASTM 52900:2021)*. 2022.
- [3] SRIVASTAVA, Manu, Sandeep RATHEE, Vivek PATEL, Atul KUMAR a Praveennath G. KOPPAD. A review of various materials for additive manufacturing: Recent trends and processing issues. *Journal of Materials Research and Technology* [online]. Elsevier BV, 2022, 21, 2612-2641 [cit. 2026-01-09]. ISSN 2238-7854. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmrt.2022.10.015
- [4] KOLTSAKI, Maria a Maria MAVRI. A Comprehensive Overview of Additive Manufacturing Processes Through a Time-Based Classification Model. *3D Printing and Additive Manufacturing* [online]. SAGE Publications, 2024, 2024-2-1, 11(1), 363-382 [cit. 2026-01-09]. ISSN 2329-7662. Dostupné z: doi:10.1089/3dp.2022.0167
- [5] NAMAKIARAGHI, Parsa, Ethan YEN a Yaghoob (Amir) FARNAM. Using lattice and hollow architected polymeric reinforcement to improve flexural performance of cementitious composite. *Construction and Building Materials* [online]. Elsevier BV, 2025, 487, 142124 [cit. 2026-01-09]. ISSN 0950-0618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2025.142124
- [6] *MATCHA- aditivní technologie* [online]. 2025 [cit. 2025-12-14]. Dostupné z: <https://matca.cz/technologie/aditivni-technologie/>

- [7] GIBSON, I., D. W. ROSEN, B. STUCKER a Mahyar KHORASANI. *Additive manufacturing technologies*. Third edition. Cham, Switzerland: Springer, [2021]. ISBN 978-3-030-56126-0.
- [8] KRUTH, Jean-Pierre, X. WANG, Tahar LAOUI a Ludo FROYEN. Lasers and materials in selective laser sintering. *Assembly Automation* [online]. 2003, 2003-12-01, 23(4), 357-371 [cit. 2026-01-10]. ISSN 0144-5154. Dostupné z: doi:10.1108/01445150310698652
- [9] HP INC. *HP Multi jet fusion* [online]. 2023 [cit. 2026-01-10]. Dostupné z: <https://www.hp.com/us-en/printers/3d-printers/products/multi-jet-technology.html>
- [10] GAO, Xia, Shunxin QI, Xiao KUANG, Yunlan SU, Jing LI a Dujin WANG. Fused filament fabrication of polymer materials: A review of interlayer bond. *Additive Manufacturing* [online]. Elsevier BV, 2021, 37, 101658 [cit. 2026-01-10]. ISSN 2214-8604. Dostupné z: doi:10.1016/j.addma.2020.101658
- [11] GAO, Ge, Fan XU, Jiangmin XU, Guanghai TANG a Zhenyu LIU. A Survey of the Influence of Process Parameters on Mechanical Properties of Fused Deposition Modeling Parts. *Micromachines* [online]. MDPI, 2022, 2022-3-30, 13(4), 553 [cit. 2026-01-10]. ISSN 2072-666X. Dostupné z: doi:10.3390/mi13040553
- [12] WU, Wenzheng, Peng GENG, Guiwei LI, Di ZHAO, Haibo ZHANG a Ji ZHAO. Influence of Layer Thickness and Raster Angle on the Mechanical Properties of 3D-Printed PEEK and a Comparative Mechanical Study between PEEK and ABS. *Materials* [online]. 2015, 2015-09-01, 8(9), 5834-5846 [cit. 2026-01-10]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma8095271
- [13] NGO, Tuan, Alireza KASHANI, Gabriele IMBALZANO, Kate NGUYEN a David HUI. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B Engineering* [online]. 2018, 2018-02-13, 143, 172-196 [cit. 2026-01-10]. ISSN 1359-8368. Dostupné z: doi:10.1016/j.compositesb.2018.02.012
- [14] DANIEL, Ani, Hamed BAKHTIARI, Alireza NOURI, Barun K. DAS, Muhammad AAMIR a Majid TOLOUEI-RAD. Fatigue properties of 3D-printed polymeric

- metamaterials: A review. *Smart Materials in Manufacturing* [online]. Elsevier BV, 2025, 3, 100076 [cit. 2026-01-01]. ISSN 2772-8102. Dostupné z: doi:10.1016/j.smmf.2025.100076
- [15] LU, Chenxi, Mengting HSIEH, Zhifeng HUANG, Chi ZHANG, Yaojun LIN, Qiang SHEN, Fei CHEN a Lianmeng ZHANG. Architectural Design and Additive Manufacturing of Mechanical Metamaterials: A Review. *Engineering* [online]. Elsevier BV, 2022, 17, 44-63 [cit. 2026-01-01]. ISSN 2095-8099. Dostupné z: doi:10.1016/j.eng.2021.12.023
- [16] VELGHE, Ineke, Bart BUFFEL, Veerle VANDEGINSTE, Wim THIELEMANS a Frederik DESPLENTERE. Review on the Degradation of Poly(lactic acid) during Melt Processing. *Polymers* [online]. MDPI, 2023, 2023-4-25, 15(9), 2047 [cit. 2026-01-02]. ISSN 2073-4360. Dostupné z: doi:10.3390/polym15092047
- [17] VAŠÍČEK, Adam, Petr LENFELD a Luboš BĚHÁLEK. Degradation of Polylactic Acid Polymer and Biocomposites Exposed to Controlled Climatic Ageing: Mechanical and Thermal Properties and Structure. *Polymers* [online]. MDPI, 2023, 2023-7-8, 15(14), 2977 [cit. 2026-01-02]. ISSN 2073-4360. Dostupné z: doi:10.3390/polym15142977
- [18] SANDANAMSAMY, L., W. S. W. HARUN, I. ISHAK, F. R. M. ROMLAY, K. KADIRGAMA, D. RAMASAMY, S. R. A. IDRIS a F. TSUMORI. A comprehensive review on fused deposition modelling of polylactic acid. *Progress in Additive Manufacturing* [online]. Springer Science and Business Media, 2022, 2022-10-31, 8(5), 775-799 [cit. 2026-01-02]. ISSN 2363-9512. Dostupné z: doi:10.1007/s40964-022-00356-w
- [19] WAGNER, John R., Eldridge M. MOUNT a Harold F. GILES. Processing Recommendations for Various Resin Systems. In: *Extrusion* [online]. 2. Elsevier, 2014, s. 255-275 [cit. 2026-01-02]. ISBN 9781437734812. Dostupné z: doi:10.1016/b978-1-4377-3481-2.00022-3
- [20] DALY, Mohamed, Mostapha TARFAOUI, Manel CHIHI a Chokri BOURAOU. FDM technology and the effect of printing parameters on the tensile strength of

- ABS parts. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. Springer Science and Business Media, 2023, 2023-5-1, 126(11-12), 5307-5323 [cit. 2026-01-02]. ISSN 0268-3768. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-023-11486-y
- [21] GIAKOUMAKIS, Nikolaos S., Christophe VOS, Kwinten JANSSENS, Jelle VEKEMAN, Mats DENAYER, Frank DE PROFT, Carlos MARQUEZ a Dirk DE VOS. Total revalorization of high impact polystyrene (HIPS): enhancing styrene recovery and upcycling of the rubber phase. *Green Chemistry* [online]. Royal Society of Chemistry (RSC), 2024, 26(1), 340-352 [cit. 2026-01-02]. ISSN 1463-9262. Dostupné z: doi:10.1039/d3gc02407e
- [22] TWI. TWI. *TWI* [online]. [cit. 2026-01-02]. Dostupné z: https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-petg?utm_source=chatgpt.com
- [23] HOMRANI, Khalil, Steven VOLCHER, Edouard Riviere LORPHÈVRE, Anthonin DEMARBAIX, Jérémy ODENT, Margaux LORENZONI, Laurent SPITAEELS a François DUCOBU. Investigation into Influence of Tensile Properties When Varying Print Settings of 3D-Printed Polylactic Acid Parts: Numerical Model and Validation. *Polymers* [online]. MDPI, 2024, 2024-8-8, 16(16), 2253 [cit. 2026-01-02]. ISSN 2073-4360. Dostupné z: doi:10.3390/polym16162253
- [24] PASZKIEWICZ, Sandra, Anna SZYMCZYK, Daria PAWLIKOWSKA, et al. Synthesis and characterization of poly(ethylene terephthalate-co-1,4-cyclohexanedimethylene terephthalate)-block-poly(tetramethylene oxide) copolymers. *RSC Advances* [online]. Royal Society of Chemistry (RSC), 2017, 7(66), 41745-41754 [cit. 2026-01-02]. ISSN 2046-2069. Dostupné z: doi:10.1039/c7ra07172h
- [25] ROMEIJN, Thomas, Michael BEHRENS, Gavin PAUL a Dongbin WEI. Instantaneous and long-term mechanical properties of Polyethylene Terephthalate Glycol (PETG) additively manufactured by pellet-based material extrusion. *Additive Manufacturing* [online]. Elsevier BV, 2022, 59, 103145 [cit. 2026-01-02]. ISSN 2214-8604. Dostupné z: doi:10.1016/j.addma.2022.103145

- [26] SHKUNDALOVA, Olena, Arvydas RIMKUS a Viktor GRIBNIAK. STRUCTURAL APPLICATION OF 3D PRINTING TECHNOLOGIES: MECHANICAL PROPERTIES OF PRINTED POLYMERIC MATERIALS / KONSTRUKCINIS 3D SPAUSDINIMO TECHNOLOGIJŲ TAIKYMAS: SPAUSDINTŲ POLIMERINIŲ MEDŽIAGŲ MECHANINĖS SAVYBĖS. *Mokslas - Lietuvos ateitis* [online]. Vilnius Gediminas Technical University, 2018, 2018-12-21, 10, 1-8 [cit. 2026-01-04]. ISSN 2029-2341. Dostupné z: doi:10.3846/mla.2018.6250
- [27] SALDAÑA-ROBLES, Alberto, Alexis SÁNCHEZ-ANGELES, Antonio de J. BALVANTÍN-GARCÍA, Diego A. NÚÑEZ-ALTAMIRANO a Gustavo CAPILLA-GONZÁLEZ. Mechanical behavior of 3D printed polymers under tensile and bending loads. *Advances in Science and Technology Research Journal* [online]. Wydawnictwo Naukowe Gabriel Borowski (WNGB), 2025, 2025-10-1, 19(10), 371-384 [cit. 2026-01-04]. ISSN 2080-4075. Dostupné z: doi:10.12913/22998624/207989
- [28] *Fatigue of Structures and Materials* [online]. Dordrecht: Springer Netherlands, 2009 [cit. 2026-01-06]. ISBN 9781402068072. Dostupné z: doi:10.1007/978-1-4020-6808-9
- [29] VECHET, Stanislav a Petr KRÁL. *Únava materiálu: Únava materiálu úvod. In NoMI-6*. 2007.
- [30] KACHKOUCH, Fatima Zahraa, Camila Carvalho NOBERTO, Lucas Feitosa DE ALBUQUERQUE LIMA BABADOPULOS, Abcael Ronald Santos MELO, Amanda Moreira Lima MACHADO, Nassim SEBAIBI, Fouad BOUKHELF a Yassine EL MENDILI. Fatigue behavior of concrete: A literature review on the main relevant parameters. *Construction and Building Materials* [online]. Elsevier BV, 2022, 338, 127510 [cit. 2026-01-01]. ISSN 0950-0618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2022.127510
- [31] HU, Xiaozhi a Kai DUAN. Influence of fracture process zone height on fracture energy of concrete. *Cement and Concrete Research* [online]. Elsevier BV, 2004,

- 34(8), 1321-1330 [cit. 2026-01-10]. ISSN 0008-8846. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconres.2003.12.027
- [32] RIYAR, Ram Lal, MANSI a Sonali BHOWMIK. Fatigue behaviour of plain and reinforced concrete: A systematic review. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics* [online]. Elsevier BV, 2023, 125, 103867 [cit. 2025-12-30]. ISSN 0167-8442. Dostupné z: doi:10.1016/j.tafmec.2023.103867
- [33] CARPINTERI, Alberto a Marco PAGGI. A unified interpretation of the power laws in fatigue and the analytical correlations between cyclic properties of engineering materials. *International Journal of Fatigue* [online]. Elsevier BV, 2009, 31(10), 1524-1531 [cit. 2026-01-09]. ISSN 0142-1123. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijfatigue.2009.04.014
- [34] SCHIJVE, J. Fatigue of structures and materials in the 20th century and the state of the art. *International Journal of Fatigue* [online]. Elsevier BV, 2003, 25(8), 679-702 [cit. 2026-01-10]. ISSN 0142-1123. Dostupné z: doi:10.1016/s0142-1123(03)00051-3
- [35] KUREK, Andrzej, Marta KUREK a Tadeusz ŁAGODA. Stress-life curve for high and low cycle fatigue. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics* [online]. Polish Society of Theoretical and Applied Mechanics, 2019, 2019-7-15, 57(3), 677-684 [cit. 2026-01-10]. ISSN 1429-2955. Dostupné z: doi:10.15632/jtam-pl/110126
- [36] BAKHTIARI, Hamed, Muhammad AAMIR a Majid TOLOUEI-RAD. Effect of 3D Printing Parameters on the Fatigue Properties of Parts Manufactured by Fused Filament Fabrication: A Review. *Applied Sciences* [online]. MDPI, 2023, 2023-1-9, 13(2), 904 [cit. 2026-01-01]. ISSN 2076-3417. Dostupné z: doi:10.3390/app13020904
- [37] LEMAITRE, Jean a Rodrigue DESMORAT. *Engineering Damage Mechanics* [online]. 2005, 2005-01-01 [cit. 2026-01-10]. Dostupné z: doi:10.1007/b138882
- [38] CORNELISSEN, H.A.W a HANS W. REINHARDT. Uniaxial tensile fatigue failure of concrete under constant-amplitude and programme loading. *Magazine of*

- Concrete Research* [online]. 1984, 1984-12-01, 36(129), 216-226 [cit. 2026-01-10]. ISSN 0024-9831. Dostupné z: doi:10.1680/mac.1984.36.129.216
- [39] TALREJA, R. a Chandra Veer SINGH. *Damage and failure of composite materials*. Cambridge: Cambridge University Press, 2012. ISBN 978-0-521-81942-8.
- [40] BAŽANT, Zdeněk P. a Jaime PLANAS. *Fracture and size effect: in concrete and other quasibrittle materials*. Boca Raton: CRC Press, [1998]. New directions in civil engineering. ISBN 0-8493-8284-X.
- [41] O. C. ZIENKIEWICZ a R. L. TAYLOR. *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*. 7. Butterworth-Heinemann, 2013. ISBN 9780080951355.
- [42] ANSYS, INC. *ANSYS Mechanical APDL Theory Reference*. [online]. Release 2022 R1 [cit. 2025-11-19]. Dostupné z: <https://www.ansys.com>
- [43] LEE, M.K. a B.I.G. BARR. An overview of the fatigue behaviour of plain and fibre reinforced concrete. *Cement and Concrete Composites* [online]. Elsevier BV, 2004, 26(4), 299-305 [cit. 2026-01-09]. ISSN 0958-9465. Dostupné z: doi:10.1016/s0958-9465(02)00139-7
- [44] NAMAKIARAGHI, Parsa, Ethan YEN a Yaghoob (Amir) FARNAM. Using lattice and hollow architected polymeric reinforcement to improve flexural performance of cementitious composite. *Construction and Building Materials* [online]. Elsevier BV, 2025, 487, 142124. ISSN 0950-0618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2025.142124
- [45] SAVIJA, Branko. Use of 3D printing to create multifunctional cementitious composites: review, challenges and opportunities. *RILEM Technical Letters* [online]. Rilem Publications, 2020, 2020-9-3, 5, 17-25. ISSN 2518-0231. Dostupné z: doi:10.21809/rilemtechlett.2020.113
- [46] ZHENG, Yuguo, Yuqi LIAO, Bin KANG a Minghang CHEN. Unified Flexural Resistance Design Method and Evaluation Frame for the B-Regions of RC Flexural Members—Theory and Application. *Buildings* [online]. MDPI, 2023, 2023-4-24, 13(5), 1138. ISSN 2075-5309. Dostupné z: doi:10.3390/buildings13051138

- [47] FAN, Zongyue, Huming LIAO, Hao JIANG, Hao WANG a Bo LI. A dynamic adaptive eigenfracture method for failure in brittle materials. *Engineering Fracture Mechanics* [online]. Elsevier BV, 2021, 244, 107540. ISSN 0013-7944. Dostupné z: doi:10.1016/j.engfracmech.2021.107540
- [48] BATHE, Klaus-Jürgen. *Finite Element Procedures: Vectors, Matrices, and Tensors*. 1996. ISBN 0133014584.

Zoznam obrázkov

Obr. 3.1 : Rozdelenie aditívnej výroby [6]	13
Obr. 3.2 Multi jet fusion [6]	14
Obr. 3.3: Selective laser sintering [6]	15
Obr. 3.4 Fused filament fabrication [6].....	18
Obr. 3.5 Material jetting [6]	19
Obr. 4.1: Druhy mechanických metamateriálov a) štruktúra na báze hrebeňa b) mriežková štruktúra c) TPSM štruktúra.....	22
Obr. 4.2: Testované vzorky [25]	25
Obr. 5.1: funkcie zaťažovacích cyklov (zľava): sínusové, obdĺžnikové, trojuholníkové	31
Obr. 5.2: Zóna lomového procesu [31]	34
Obr. 5.3: Wöhlerova krivka	35
Obr. 6.1: 3D model celého maltového prvku v rozpone podpier.....	38
Obr. 6.2: 2D model výstuh DWG	39
Obr. 6.3 : 3D model IGS 1/4 prvku.....	39
Obr. 6.4: Rozdelenie modelu do objemov	40
Obr. 6.5: Rozdelenie siete na výstuhe.....	42
Obr. 6.6: Rozdelenie siete v maltovej zmesi.....	42
Obr. 6.7: Lokácie priebehu Poissonovoho čísla.....	43
Obr. 6.8: Napätie pre rôzne poissonove súčinitele v lokácii 1 (17)	44
Obr. 6.9: Napätie pre rôzne poissonove súčinitele v lokácii 2 (293)	44
Obr. 6.10: Napätie pre rôzne poissonove súčinitele v lokácii 3 (2003)	44
Obr. 6.11: Okrajové podmienky a osi symetrie axonometrický pohľad	46
Obr. 6.12: Osy symetrie dolný pohľad.....	47
Obr. 6.13: Zaťaženie	47
Obr. 6.14: Schéma trojbodovej ohybovej skúšky	48
Obr. 6.15: Priebeh momentov pre trojbodový ohyb na telese z rozpätím 120 mm	49
Obr. 7.1: Deformácie vzorky $h = 5$ mm.....	52

Obr. 7.2: Prvé hlavné napätia σ_1 v polymérnych výstužniach s rôznymi veľkosťami	54
Obr. 7.3: Lokalizácia prvého hlavného napätia σ_1 v polymérnych výstužniach s rôznymi veľkosťami.....	55
Obr. 7.4: Roviny rezu.....	57
Obr. 7.5: Prvé hlavné napätia σ_1 v maltovej matrici – bočný a spodný pohľad s rôznymi veľkosťami výstuh	58
Obr. 7.6: Prvé hlavné napätia σ_1 v maltovej matrici – rez lokáciou 1	60
Obr. 7.7: Prvé hlavné napätia σ_1 v maltovej matrici – rez lokáciou 2	60
Obr. 8.1: Mikroskopický pohľad na AM výstuhy	64
Obr. 8.2: Vytlačené výstuhy rôznych veľkostí	64
Obr. 8.3: Všetky experimentálne vzorky pred únavovou skúškou	65
Obr. 8.4: pohľad na spodnú stranu vzorky	66
Obr. 8.5: Priemer statickej pevnosti pre jednotlivé výstuže	67
Obr. 8.6: S-N krivky pre experimentálnu skúšku	68
Obr. 9.1: Porušené vzorky s veľkosťou výstuže $h = 5, 10, 15, 20$ mm.....	71
Obr. 9.2: Porušené vzorky s veľkosťou výstuže $h = 5$ mm.....	72
Obr. 9.3: Porušené vzorky s veľkosťou výstuže $h = 10$ mm.....	72
Obr. 9.4: Porušené vzorky s veľkosťou výstuže $h = 15$ mm.....	73
Obr. 9.5: Porušené vzorky s veľkosťou výstuže $h = 20$ mm.....	73
Obr. 9.6: Porušené vzorky s veľkosťou výstuže $h = 20$ mm , porovnanie.....	74
Obr. 9.7: Vybrané lokácie na testovanie predikcie životnosti.....	75
Obr. 10.1: Porovnanie ručného, numericky modelovaného a experimentálneho napätia pri únave pre výšku $h = 5$ mm v lokácii 1	78
Obr. 10.2: Predikcia životnosti (S-N krivka) pre model s výškou výstuhy 5 mm	79
Obr. 10.3: Predikcia životnosti (S-N krivka) pre model s výškou výstuhy 10 mm	80
Obr. 10.4: Predikcia životnosti (S-N krivka) pre model s výškou výstuhy 15 mm	81
Obr. 10.5: Predikcia životnosti (S-N krivka) pre model s výškou výstuhy 20 mm	82

Zoznam tabuliek

Tabuľka 1: Youngov modul pre experimenty E1, E2 ,E3 [25]	26
Tabuľka 2: Poissonov súčiniteľ pre experimenty E1, E2, E3 [25]	26
Tabuľka 3: Prehľad mechanický vlastností daných polymérov získaných z ťahovej skúšky [26].....	27
Tabuľka 4: Rozsah mechanických vlastností materiálov PLA, ABS a PETG stanovených ťahovou skúškou pri rôznych kombináciách parametrov technológie FFF [27].....	27
Tabuľka 5: Parametre siete pre rôzne výšky výstuhy	41
Tabuľka 6: Závislosť maximálneho prvého hlavného napätia pre rôzne Poissonove súčinitele	45
Tabuľka 7: Statické pevnosti pre jednotlivé výstuže	66
Tabuľka 8: Parametre materiálu a, b, R opisujúce mechanické vlastnosti vzoriek	68
Tabuľka 9: Porovnanie výsledkov napätí 3D numerickým modelom a ručne prepočítanými výsledkami experimentu	77

Zoznam symbolov a skratiek

Symboly

Grécka abeceda

$\Delta\sigma$	Rozsah napätia	[MPa]
ν	Poissonov súčiniteľ	[-]
ρ	Hustota	[kg*m ⁻³]
σ_I	prvé hlavné napätie	[MPa]
σ_a	Amplitúda napätia	[MPa]
σ_d	dolné napätie	[MPa]
σ_h	horné napätie	[MPa]
σ_m	Stredne napätie	[MPa]

Rímska abeceda

A	plocha prierezu	[mm ²]
a	Koeficient unavovej pevnosti	[-]
b	Exponent unavovej pevnosti	[-]
E	Modul pružnosti	[GPa]
F	Zaťaženie	[kN]
f	frekvencia	[Hz]
H	Výška prvku	[mm]
h	Výška výstuh	[mm]
I	moment zotrvačnosti	[mm ⁴]
L	Dĺžka prvku	[mm]
l	Rozpor podpôr	[mm]
M	Moment	[N*m]
n	modulový pomer	[-]
N	Pocet zaťažovacích cyklov	[-]
P	Súčiniteľ amplitúdy	[-]
R	Súčiniteľ napätia	[-]
T	doba kmitu	[s]
W	modul prierezu	[mm ³]
y_n	poloha neutrálnej osi	[mm]

Skratky

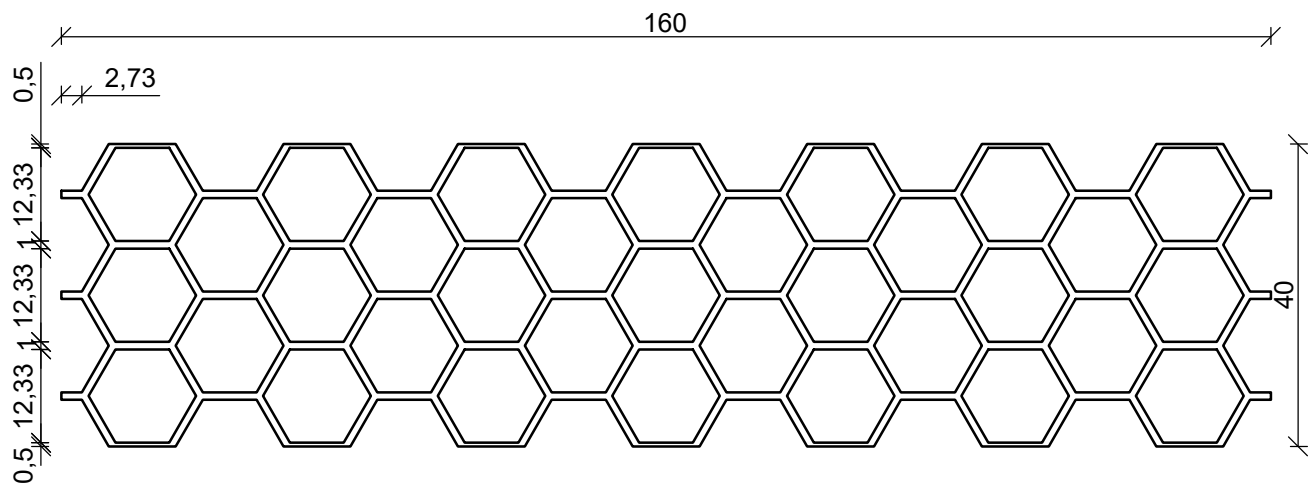
HEX	Šesťuholníkový tvar	Hexagonal shape
AM	Aditívna výroba	Additive manufacturing
PBF	Tavenie v práškovom lôžku	Powder bed fusion
MJF	Viaclúčové spájanie prášku	Multi jet fusion
SLS	elektívne laserové spekanie	Selective laser sintering
ME	Extrúzia materiálu	Material extrusion
FFF	Výroba taveným filamentom	Fused filament fabrication
MJ	Tryskanie materiálu	Material jetting
PLA	Polylactic acid	
ABS	Akrylonitril-butadién-styrén	
HIPS	High impact polystyrene	
PET	Polyetyléntereftalát	
PETG	Polyethylene terephthalate glycol-modified	
DIC	Digitálna obrazková korelácia	Digital image correlation
CoV	Koeficient variability	Coefficient of Variation
FPZ	Zóna procesu lomu	Fracture process zone
MKP	Metóda konečných prvkov	Finite element method

Zoznam príloh

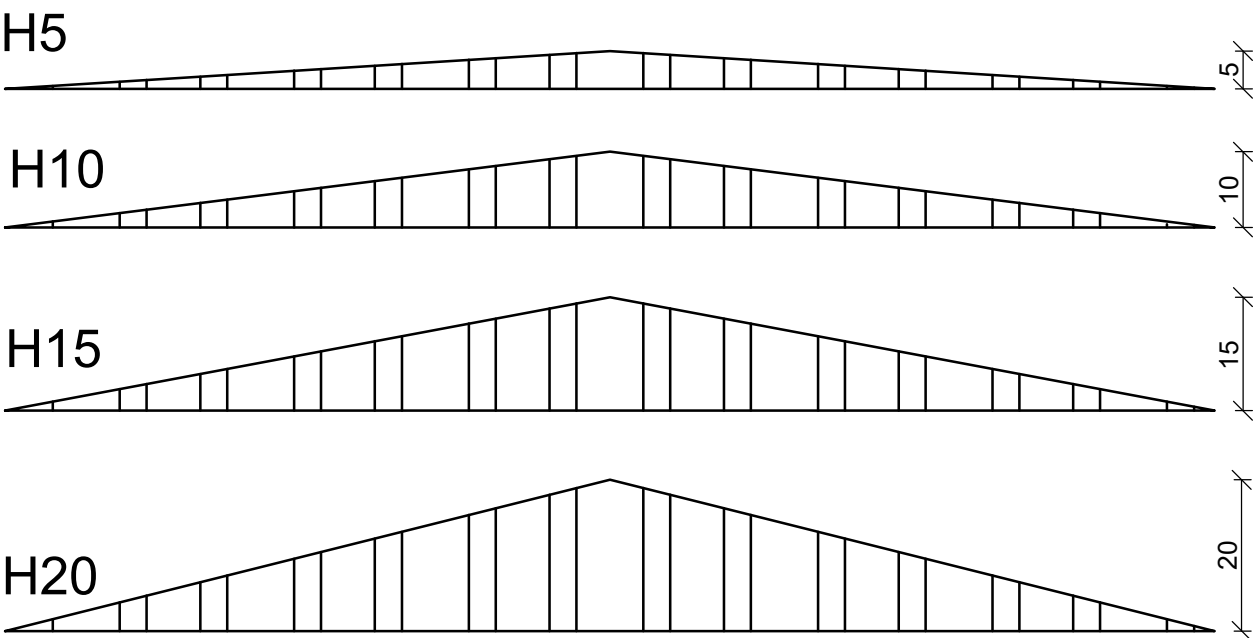
Príloha č.1 : výkresová dokumentácia polymérnych výstuh

Príloha č.2 : ANSYS APDL kód k numerickému výpočtu

PÔDORYS:



BOČNÝ POHĽAD:



Materiál výstuh PETG
teplota trysky 250 °C,
teplota podložky 80 °C
výška vrstvy 0,2 mm
šírka extrúzie 0,25 mm
tlačené na Prusa XL s tryskou s priemerom 0,25 mm

Predmet:	Diplomová práca		
Vypracoval:	Bc. Samuel Mikle		
Vedúci práce:	Ing. Petr Miarka, Ph.D.	Formát	A4
Obsah:	Aditívne vyrobená hexagonálna výstuž	Mierka	1:1
		Dátum	16.01.2026

Príloha č.2:

!settings

!-----

/clear

/PREP7

IMMED,0

/PNUM,KP,1

/PNUM,LINE,1

/PNUM,AREA,1

/PNUM,VOLU,1

/PBC,ALL,,1

/VIEW, 1 ,,-1

/ANG,1

/repl,fast

!-----

!parameters

!-----

ET,1,SOLID187

APLOT

MP,EX,1,30E3

MP,DENS,1,2500

MP,NUXY,1,0.2

!-----

ET,2,SOLID187

APLO

MP,EX,2,2.5E3

MP,DENS,2,1200

MP,NUXY,2,0.35

!-----

H = 5

T = H + 5

P = (H/80)*20

S = 60

silá = 1000/4 !N

```
!-----  
BLOCK, 0, 100, 0, 100, 0, 100  
!-----  
CDREAD,SOLID,"",',HEX4_1','igs'  
!-----  
k,4001,0,0,P  
k,4002,S,0,H  
k,4003,S,20,H  
k,4004,0,20,P  
k,4005,0,0,40  
k,4006,S,0,40  
k,4007,S,20,40  
k,4008,0,20,40  
!-----  
V,4001,4002,4003,4004,4005,4006,4007,4008  
!-----  
k,2001,0,0,0  
k,2002,S,0,0  
k,2003,S,20,0  
k,2004,0,20,0  
k,2005,0,0,P  
k,2006,S,0,H  
k,2007,S,20,H  
k,2008,0,20,P  
!-----  
V,2001,2002,2003,2004,2005,2006,2007,2008  
!-----  
vdele,1,,,1  
!-----  
VSBV,2,3,,delete,DELETE  
!-----  
k,4001,0,0,P  
k,4002,S,0,H  
k,4003,S,20,H
```

```

k,4004,0,20,P
k,4005,0,0,T
k,4006,S,0,T
k,4007,S,20,T
k,4008,0,20,T
!-----
V,4001,4002,4003,4004,4005,4006,4007,4008
!-----
k,5001,0,0,T
k,5002,S,0,T
k,5003,S,20,T
k,5004,0,20,T
k,5005,0,0,40
k,5006,S,0,40
k,5007,S,20,40
k,5008,0,20,40
!-----
V,4005,4006,4007,4008,5005,5006,5007,5008
!-----
VSBV,4,1,,delete,KEEP
vsel,s,,,2,16
vglue,all
allsel,all
NUMMRG,NODE
NUMMRG,ELEM
!-----
!component
!-----
vsel,s,,,1
cm,plast,volu
allsel,all,all
vsel,s,,,2,18
cm,beton,volu
allsel,all,all

```

```
!-----  
!mesh  
!-----  
esize,2  
type,1  
mat,1  
MSHAPE,1,3D  
MSHKEY,0  
CM,_Y,VOLU  
VSEL, , , , 3,18  
CM,_Y1,VOLU  
CHKMSH,'VOLU'  
CMSEL,S,_Y  
VMESH,_Y1  
CMDELE,_Y  
CMDELE,_Y1  
CMDELE,_Y2  
!-----  
esize,0.5  
MAT,2  
type,2  
MSHAPE,1,3D  
MSHKEY,0  
CM,_Y,VOLU  
VSEL, , , , 1  
CM,_Y1,VOLU  
CHKMSH,'VOLU'  
CMSEL,S,_Y  
VMESH,_Y1  
CMDELE,_Y  
CMDELE,_Y1  
CMDELE,_Y2
```

```
!-----  
!OP  
!-----  
NSEL,S,LOC,X,0,0.05  
NSEL,R,LOC,Z,0,0.05  
NSEL,R,LOC,Y,0,20  
D,all,uz,0  
ALLSEL,ALL,ALL  
!-----  
NSEL,S,LOC,X,0,60  
NSEL,R,LOC,Z,0,40  
NSEL,R,LOC,Y,19.9,20  
D,all,uy,0  
ALLSEL,ALL,ALL  
!-----  
NSEL,S,LOC,X,59.98,60  
NSEL,R,LOC,Z,0,40  
NSEL,R,LOC,Y,0,20  
D,all,ux,0  
ALLSEL,ALL,ALL  
!-----  
NSEL,S,LOC,X,59.98,60  
NSEL,R,LOC,Z,39,40  
NSEL,R,LOC,Y,0,20  
*GET,node_BC,node,all,count  
F,all,fz,-sila/node_BC  
ALLSEL,ALL  
!-----  
/AUTO,1  
/repl,fast  
  
/solu  
solve
```