

Strukturní tělesa s odolností vůči dynamickému zatížení

Ing. Jan Strnad, Ph.D.

Teze disertační práce



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Teze disertační práce

Strukturní tělesa s odolností vůči dynamickému zatížení

Structural Test Specimens with Resistance to Dynamic Force Loading

Autor: **Ing. Jan Strnad, Ph.D.**

Studijní program: P3909 Procesní inženýrství

Studijní obor: 3909VO13 Nástroje a procesy

Školitel: doc. Ing. Ondřej Bílek, Ph.D.

Oponenti: prof. Ing. Katarína Monková, Ph.D.
doc. Ing. Martin Novák, Ph.D.
doc. Ing. Josef Chladil, CSc.

Zlín, Červen 2023

© Jan Strnad

Vydala **Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně** v edici **Doctoral Thesis Summary**.
Publikace byla vydána v roce 2023.

Klíčová slova: 3D tisk, FFF technologie, rázová zkouška, zkouška houževnatosti, mechanické vlastnosti, zkušební těleso, vnitřní struktury, deformace, síla, energie.

Keywords: 3D Printing, FFF Technology, Impact Test, Toughness Test, Mechanical Properties, Test Specimen, Internal Structures, Deformation, Force, Energy.

Plná verze disertační práce je dostupná v Knihovně UTB ve Zlíně.

ISBN 978-80-7678-170-2

Poděkování:

V první řadě bych chtěl poděkovat mému školiteli docentu Bílkovi za vedení této disertační práce a za celkové vedení mého doktorského studia na Fakultě technologické. Dále bych chtěl poděkovat panu doktoru Mizerovi za pomoc při testování zkušebních těles na výzkumném centru CEBIA-Tech ve Zlíně. Mé díky také patří panu profesoru Patovi za konzultace a rady ohledně statistického vyhodnocení a celkově všem vyučujícím profesorům, docentům a doktorům, kteří mi v průběhu let dodávali informace vedoucí k výsledkům mé práce. V neposlední řadě bych chtěl také poděkovat své rodině, své mamce a sestře za podporu v nižších ročnících studia na vysoké škole a především mé Veronice za podporu a dodávání energie při tomto doktorském studiu.

Obsah

1. SOUČASNÝ STAV	7
1.1 Struktura Boxception	7
1.2 Struktura Honeycomb	8
1.3 Struktury atomových modelů.....	9
1.4 Mřížkové struktury jádra.....	10
2. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	11
3. ZVOLENÁ METODIKA ZPRACOVÁNÍ.....	12
3.1 Použitý materiál	13
3.2 Zkušební vzorky.....	14
3.3 Tvar a struktura	14
3.3.1 Plně průchozí struktura	15
3.3.2 Struktura vnitřních dutin.....	16
3.4 Nastavení tisku.....	16
4. STRUKTURNÍ POHLED EXPERIMENTU	18
4.1 Průběh měření a postup vyhodnocení výsledků strukturních těles.....	19
4.2 Statistické shrnutí strukturních těles	20
4.2.1 Statistické vyhodnocení strukturních těles z hlediska síly	20
4.2.2 Statistické vyhodnocení strukturních těles z hlediska energie	21
4.3 Vizuální hodnocení po zatížení na padostroji.....	22
5. MIKROSKOPIE A OVĚŘENÍ PŘESNOSTI TISKU	23
5.1 Měření přesnosti výšky nanášených vrstev	24
5.2 Měření přesnosti výroby vnitřních dutin	26
6. MATERIÁLOVÝ POHLED EXPERIMENTU	28
6.1 Stroj Zwick Roell HIT 25P	28
6.2 Plněné materiály.....	29
6.2.1 Ekonomické zhodnocení.....	31
6.3 Zkušební tělesa.....	31
6.4 Výsledné hodnoty rázové a vrubové houževnatosti	33
6.4.1 Rázová houževnatost – shrnutí výsledků	33
6.4.2 Vrubová houževnatost – shrnutí výsledků	34
6.5 Vyhodnocení strukturních těles z plněných materiálů	35
7. Diskuze výsledků	36
8. Přínos pro vědu a praxi.....	37
9. Závěr.....	38
CV AUTORA	48

ABSTRAKT

Práce je zaměřena na rázovou odolnost strukturních zkušebních těles z materiálu ASA (akrylonitrilstyren) a z dalších plněných materiálů. První skupinu tvoří strukturní tělesa s průchozími otvory a druhou skupinou jsou pak strukturní tělesa s vnitřními dutinami. Tyto struktury byly navrženy v softwaru Catia V5R19 a byly vyrobeny pomocí technologií FFF (Fused Filament Fabrication), což je jedna z nejrozšířenějších aditivních metod. Tato technologie 3D tisku umožňuje navrhovat složitější součásti a je tedy ideální pro výrobu těchto prototypů.

Cílem bylo získat strukturní tělesa s větší odolností vůči působení padostroje, než těleso o plném objemu materiálu. Všechna strukturní tělesa mají o 35 % menší objem oproti plnému tělesu, přičemž základní rozměry zkušebních těles jsou stejné. Pro tuto zkoušku byl použit padostroj Zwick Roell HIT230F. Hodnotícím kritériem zde byly maximální síly a energie potřebné k proražení zkušebního tělesa.

Po zatěžování těles na padostroji byly díky mikroskopu Keyence přeměřeny skutečné hodnoty vnitřních dutin, kde byly pojmenovány určité nepřesnosti při výrobě, které vznikají především nastavenou výškou vrstev a uzavřením kruhových trajektorií při pohybu vytlačovací trysky. Také byla naměřena skutečná výška jednotlivých vrstev.

V další části výzkumu bylo zvoleno několik nejnovějších plněných materiálů pro zhotovení zkušebních těles na zkoušku Charpyho kladivem, kde bylo cílem porovnat materiály mezi sebou a z nejodolnějšího materiálu na rázovou a vrubovou houževnatost vyrobit zkušební těleso, které by odolalo nejvyšším hodnotám sil a energii při zatížení na padostroji. Na základě vyhodnocení zkoušky rázové a vrubové houževnatosti byly zvoleny materiály Nylon AF80 a materiál s označením PC-CF k výrobě strukturních těles.

Na základě těchto experimentů bylo prokázáno, že strukturní tělesa dosáhly vyšší odolností než plný materiál. Jediný zástupce struktur s průchozími otvory, který dosahoval vyšší odolností než plný materiál, byla struktura s průchozími kruhovými otvory. Zatímco v případě strukturních těles s vnitřními dutinami dosahovaly vyšší odolností jak těleso s kulovými dutinami, tak těleso s kuželovými dutinami. Přínosem je tedy úspora materiálu při výrobě těles odolných vůči tomuto zatěžování. Dále bylo zjištěno, že materiálový pohled u strukturního vzorku z hlediska konkrétních plněných materiálů Nylon AF80 a PC-CF nemá zásadní vliv na odolnost strukturních těles vůči zatížení na padostroji, hodnoty plněných materiálů zde nedosahovaly statisticky významných rozdílů oproti materiálu ASA.

ABSTRACT

The work is focused on the impact resistance of structural test specimens made of ASA (acrylonitrile styrene) and other filled materials. The first group consists of structural bodies with through holes and in the second group are structural bodies with internal cavities. These structures were designed in Catia V5R19 software and they were manufactured using FFF (Fused Filament Fabrication) technologies, one of the most widespread additive methods. This 3D printing technology makes it possible to design more demanding parts, therefore it is ideal for the production of these prototypes.

The goal was to obtain structural bodies with greater resistance due to drop tester than a body with a full volume of material. All structural bodies have smaller volume by 30 % compared to a full body, while the outer dimensions of the test bodies are the same. A Zwick Roell HIT230F drop weight tester was used in this work. The evaluation criteria were the maximum forces and energy required to break through the test body.

After loading the bodies on the drop tester, the actual values of the internal cavities were remeasured using the Keyence microscope. Thanks to this microscope, certain inaccuracies during production were revealed, i.e. an inappropriate set height of the layers and the closure of circular trajectories during the movement of the extrusion nozzle. The actual height of the individual layers was also measured.

In the next part of the research, several of the latest filled materials were chosen for the production of test bodies for the Charpy hammer test, where the aim was to compare the materials with each other. A test specimen from the most resistant material with the best results for impact and notch strength testing, was subsequently tested for the highest values of forces and energy drop weight tester. Based on the evaluation of the impact and notch toughness tests, the materials Nylon AF80 and the material marked PC-CF were chosen to produce the structural bodies.

Based on these experiments, it was proven that the structural bodies achieved a higher resistance than the full material. The only representative of structures with through holes, which achieved higher resistances than full material, was the structure with through circular holes. While in the case of structural bodies with internal cavities, both the body with spherical cavities and the body with conical cavities achieved higher resistance. The benefit for using bodies with cavities is the saving of material in the production of pieces resistant to this drop tester. Furthermore, it was found that the material of the structural sample in terms of the specific filled materials Nylon AF80 and PC-CF does not have a significant effect on the resistance of the structural bodies to the load drop tester, because the values of the filled materials did not reach statistically significant differences compared to the ASA material.

1. SOUČASNÝ STAV

Metoda 3D tisku jako rozvíjející se výrobní technologie postupně přitahuje větší zájem jak v akademické obci, tak v průmyslové oblasti. Pro využití jeho plného potenciálu v inženýrských aplikacích je nutné charakterizovat mechanické chování a vlastnosti 3D tištěných materiálů a struktur při vnějším zatížení. [28]

Technologie aditivní výroby jsou široce používány pro výrobu polymerních komponent od prototypů, až po funkční struktury se složitou geometrií. Použitá metoda FFF (Fused Filament Fabrication) vytváří 3D geometrii nanášením po sobě jdoucích vrstev extrudovaného termoplastického vlákna, jako je například akrylonitrilbutadienstyren (ABS), kyselina polyléčná (PLA) apod. [1, 22]

Zajímavým odvětvím je výzkum strukturních těles s důrazem na odolnost vůči dynamickému zatížení. Přínosem je pak úspora materiálu při výrobě strukturních těles odolných vůči mechanickému zatížení. Struktury s těmito specifikacemi mají velké množství aplikací v různých průmyslových odvětvích. Nemusí posloužit jen pro výrobu ochranných sportovních pomůcek, jako jsou například přilby sloužící k ochraně zdraví. Mohou být taktéž využity i pro civilní, stavební průmysl, automobily, elektrická zařízení, biomedicínu a podobně. [23, 27,29]

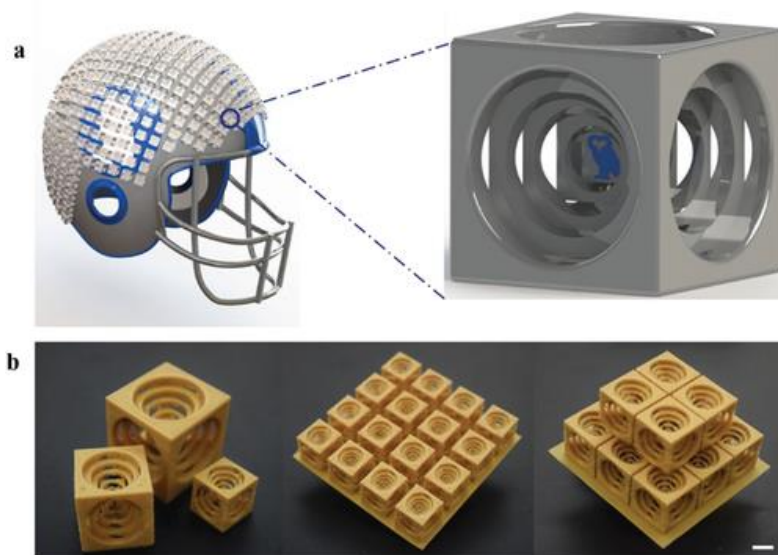
Tvarové struktury v mikrometrické a makrometrické velikosti jsou rozsáhlým tématem výzkumu už několik let. Je známo, že u různě geometricky složitých těles jsou pozorovány vysoké odolnosti vůči statickému i dynamickému zatěžování. Tyto vlastnosti mají významnou roli v průmyslu, letectví, či sportovním odvětví. [2, 3, 4]

Bylo provedeno značné množství vědeckých studií k pochopení skrytých aspektů přírodních struktur a jejich komplexních architektur. Tyto výzkumy se zabývají korelací topologií žraločích zubů a podobně. Studie se zaměřily na pochopení vzájemného působení topologie a mechanické odezvy struktur a pokusily se stanovit vztah mezi mechanickými vlastnostmi a morfologií přírodních struktur. Podrobné studie přírodních struktur poskytly cenné poznatky pro navrhování a vývoj nových struktur a materiálů se specifickými vlastnostmi jako je například vysoce výkonné zatížení, vysoká absorpce energie, materiál odolný proti vibracím. V poslední době aditivní syntéza, zejména 3D tisk, umožnila vědcům vytvářet složité geometrie s pozitivním a negativním Gaussovým zakřivením. Práce Soleymani Eil Bakhtiari a spol. [3] se inspiroje složitými návrhy a demonstruje myšlenku návrhu lehkého materiálu s vysokou odolností proti nárazu za použití dostupných materiálů podporujících FFF technologii 3D tisku. [5,6,7]

1.1 Struktura Boxception

Jedním z aktuálně řešených tvarů a struktur je tzv. tvar Boxception. Boxception je architektura, kde je krabice/krychle zapuštěna do jiné krabice. Tato konfigurace se postupně opakuje a jednotlivé geometrie krychle jsou vždy o část větší než předchozí. Jednotlivé krychle jsou spojeny po okraji hran. V takových

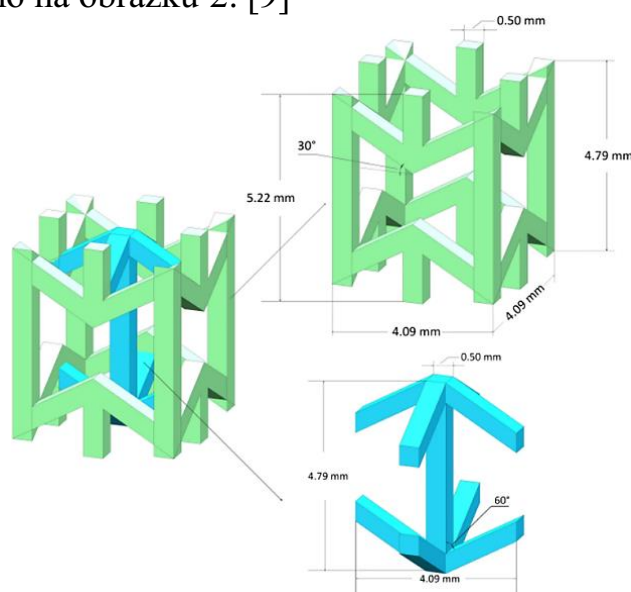
konstrukcích se očekává, že nevnitřnější krabice vydrží nárazovou sílu, zatímco ostatní krabice se mohou vybořit a selhat při ochraně právě vnitřní krychle. Architektura struktury Boxception je znázorněna na obrázku 4. Navržená architektura může být klíčová při navrhování konstrukcí, odolných vůči dynamickému zatěžování rázy. Tyto struktury hrají klíčovou roli například při navrhování přileb, rámu automobilů a podobně. [3, 8]



Obr. 1: Struktura Boxception [8]

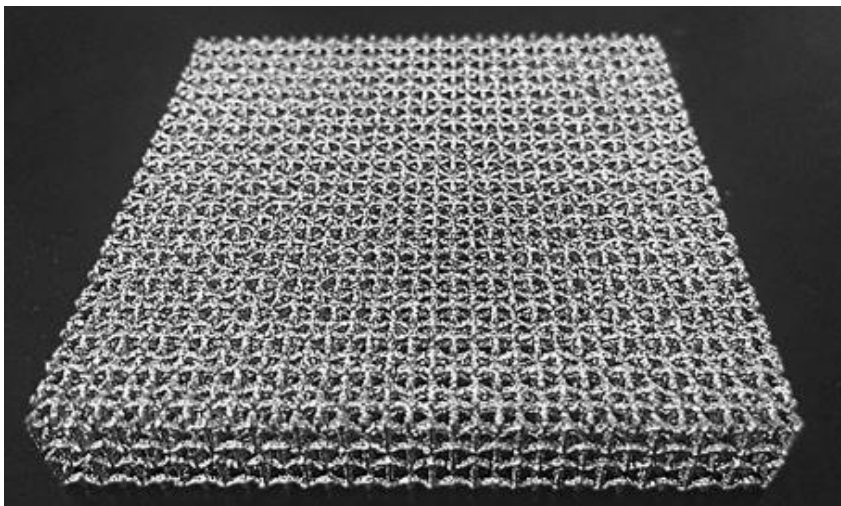
1.2 Struktura Honeycomb

Další zkoumanou strukturou odolnou vůči rázům je geometrie s názvem Honeycomb (voštiny). Tato struktura je nejčastěji používána jako jádro u kompozitních sendvičů. Zhao [9] zde zjistil, že voštinové struktury s negativním Poissonovým efektem jsou vysoce odolné vůči mechanickému zatěžování. Jádro voštiny je zobrazeno na obrázku 2. [9]



Obr. 2: Struktura voštiny [9]

Voštiny pak mají velkou odolnost vůči působení tlakových sil, jsou velmi houževnaté a mají vysokou kapacitu absorpce působící energie při mechanickém zatěžování. Při rázovém zatížení je hexagonální struktura voštiny stlačena a materiál proudí z nárazové části (z bodu nárazu) do okolní oblasti v kolmém směru na směr nárazového zatížení. Při rázové zkoušce dochází ke snižování rychlosti vstupujícího tělesa a ke snížení jeho dopadové energie. [9]



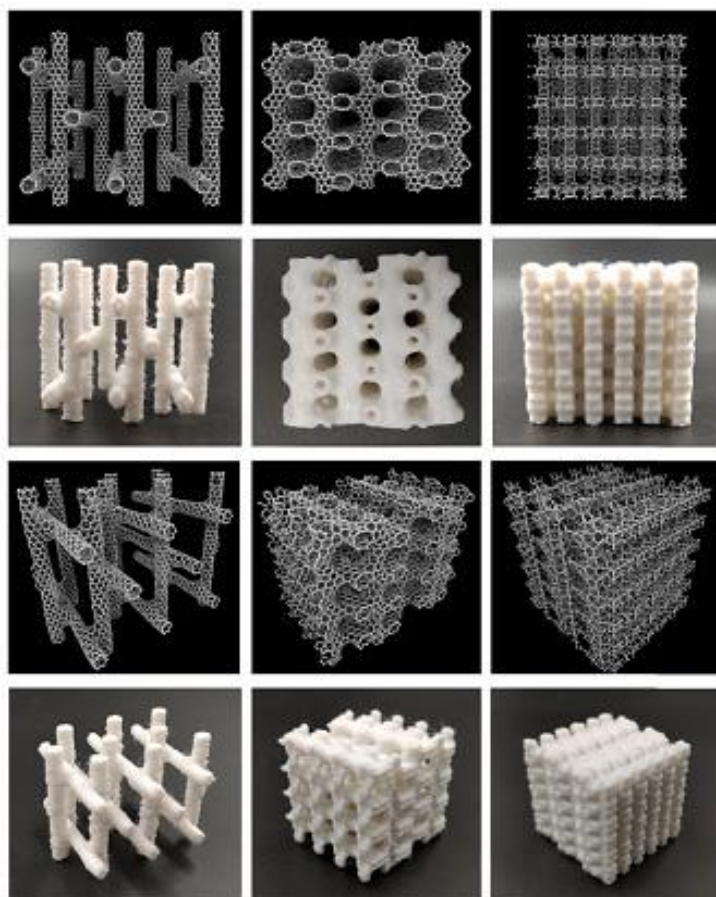
Obr. 3: Zobrazení voštiny [9]

1.3 Struktury atomových modelů

V následující práci Ambekara [11] byly zkoumány mechanické vlastnosti sítí uhlíkových nanotrubic. Atomové modely byly použity k navržení makro modelů, které byly vytištěny pomocí technologie FDM. Mechanické vlastnosti sítí byly zkoumány pomocí simulací a zátěžových testů. Bylo zjištěno, že existuje kvalitativní shoda pro mechanické chování atomových modelů a odpovídajících 3D tištěných makroměřitek. Některé nesrovnalosti byly způsobeny nepřesností použité technologie 3D tisku. Výsledky také ukazují, že některé aspekty mechanického chování se ukázaly jako nezávislé na měřítku. 3D tištěné struktury byly schopny vydržet vysoké tlakové zatížení bez strukturálního selhání.

Bylo zjištěno, že po stlačení tělesa ve směru osy Z se se zvyšujícím zatížením objevily odchylky v hodnotách napětí, nicméně bez strukturálního selhání objektu (bez zlomení struktur). [10, 11]

Několik studií se zabývalo touto problematikou a všechny dospěly ke shodnému závěru a to, že generování 3D tištěných makro-struktur atomových modelů, které je téměř nemožné vyrobit současnými technologiemi je efektivní přístup k vytváření nových struktur s odolnějšími geometrickými a mechanickými vlastnostmi. Takové složité architektury lze využít například pro ultralehké letecké a automobilové díly. [10,11,12]

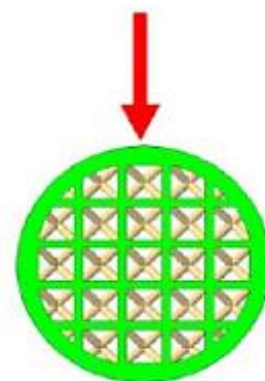


Obr. 4: Atomové modely v makroměřítku, vyrobené technologií FDM [11]

1.4 Mřížkové struktury jádra

V následující studii se autorka Monková [13] zabývá porézními materiály. Tyto materiály se v některých případech používají pro strukturální účely a v jiných případech pro účely funkční na základě jejich různých specifických strukturních morfologií a vlastností. V některých situacích hrají dvojí roli struktury a funkce současně. Tyto typy materiálů mohou prokázat komplexní fyzikální a mechanické vlastnosti. Proto mohou být porézní materiály použity v leteckém průmyslu, elektronice a komunikaci, dopravě, atomové energii, lékařství, ochraně životního prostředí, metalurgii, strojírenství, stavebnictví, elektrochemii, petrochemii a bioinženýrství. Vzhledem k široké možnosti využití v inženýrské praxi je velmi důležité znát chování konkrétní příhradové konstrukce při zatížení.

Mřížková struktura v jádru výrobku mu může poskytnout speciální kombinaci vlastností, jako je dobrá pevnost, absorpce energie, nízká hmotnost při dobré tuhosti. Zkušební tělesa byly vyrobeny technologií FFF (Fused Filament Fabrication) z materiálu ABSplus (Acrylonitril Butadien Styrene)-P430 Ivory. Hlavním důvodem výběru materiálu byla dostupnost, která byla také motivována nižšími finančními náklady ve srovnání s aditivními technologiemi pro kovové díly. [13]



Obr. 5: Zkouška ohybem [13]

Tato publikace pojednává o chování jednoduché příhradové konstrukce při ohybovém zatížení, znázorněno na obrázku 11. Cílem výzkumu bylo zjistit závislost ohybového napětí na objemovém poměru porézní struktury. V této studii byly provedeny ohybové zkoušky válcových vzorků s mřížkovou strukturou a základní buňkou vyrobenou aditivní technologií FFF z materiálu ABS. Byly provedeny třibodové ohybové zkoušky a ohybové napětí vzorků se třemi různými objemovými poměry. V tomto výzkumu bylo hodnoceno 44, 57 a 70 %. Trendová křivka naznačila, že závislost ohybového napětí na objemovém poměru není lineární, ale pro přesné stanovení ohybového chování porézní struktury bude nutné provést další zkoušky se vzorky různých objemových poměrů. [13]

2. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Cílem práce je navrhnout strukturní tělesa odolná vůči dynamickému zatížení. Podstatou práce je navrhnout, vymodelovat a následně vyrobit zkušební tělesa s vnitřní tvarovou odlišností. Tato tělesa musí splňovat podmínky jednotného objemu a musí být odlehčena od plného materiálu.

- Návrh těles s různými strukturami v softwaru Catia.
- Nastavení podmínek výroby a následné zhotovení zkušebních těles z materiálů ASA, pomocí technologie FFF pro zkoušku padostrojem.
- Dynamické zatěžování strukturních vzorků pomocí zkoušky pádem na stroji Zwick Roell HIT230F. Vyhodnocení a porovnání výsledků jednotlivých struktur a porovnání s plným materiálem.
- Příprava normalizovaných vzorků na zkoušku rázové houževnatosti ze speciálních plněných materiálů. Následná výroba pomocí technologie FFF.
- Porovnání výsledků plněných materiálů ze zkoušky Charpyho kladivem a následná výroba strukturního tělesa s největší odolností vůči rázu z nejodolnějšího zkoušeného materiálu na vrubovou a rázovou houževnatost.

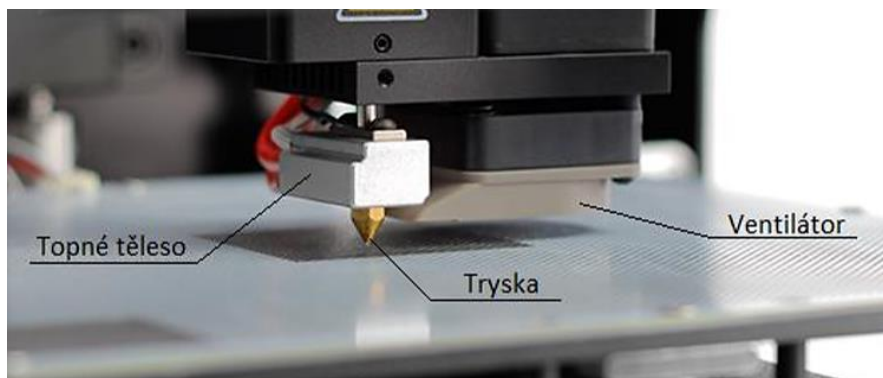
3. ZVOLENÁ METODIKA ZPRACOVÁNÍ

Zkušební tělesa jsou vytvořena na 3D tiskárně Zortrax M200 Plus. Tento stroj je jednou z nejpřesnějších stolních tiskáren, což umožňuje vytvářet zkušební tělesa s vysokou přesností. Tato přesnost je zajištěna díky plnému zakrytí tiskového prostoru, vyhřívanému tiskovému podloží a tuhé konstrukci tiskárny. Výrobce udává přesnost polohování tiskové hlavy v ose XYZ s hodnotou $\pm 0,09$ mm, což je velmi přesné. Pro vytváření zkušebních těles je k dispozici software Z-suite, který umožňuje nastavit různé parametry tisku. Mezi tyto parametry patří například teplota trysky, teplota podložky, rychlost tisku, volba podpůrného materiálu a další. Každý z těchto parametrů má vliv na výslednou kvalitu tisku, a proto je důležité je správně nastavit. [24,25,31]



Obr. 6: 3D tiskárna Zortrax M200 Plus [14]

Vyšší teplota trysky až 290 °C, umožňuje tisknout materiály s vyšší teplotou tání. Vyhřívané tiskové podloží zase zajišťuje lepší adhezi mezi podložkou a tisknutým materiálem, což může být u některých materiálů důležité. Rychlost tisku až 60 mm/s ovlivňuje dobu, kterou trvá tisk zkušebního tělesa. Vyšší rychlost tisku umožňuje tisknout objekty rychleji, nicméně to může nepříznivě ovlivnit kvalitu výsledného modelu. U složitějších tvarů software Z-suite generuje podpory, které závisí na tvaru a geometrii tisknutého objektu. [14,21,30]



Obr. 7: Popis vytačovací hlavy tiskárny Zortrax M200 plus

Tab. 1: Vlastnosti a provozní teploty 3D tiskárny Zotrax M200 Plus [14]

Pracovní rozměry tisku	200 × 200 × 180 mm
Průměr struny materiálu	1,75 mm
Průměr kapiláry trysky	0,4 mm
Podpurný materiál	mechanicky odstranitelný
Maximální teplota extruderu	290 °C
Stavební podložka	vyhřívána
Maximální teplota podložky	105 °C

3.1 Použitý materiál

Všechny vzorky jsou vyrobeny z materiálu ASA (Akrylonitril-styren-akrylát). Je alternativou k materiálu ABS, který je tradičně používán v aditivním výrobním procesu. ASA je polymerní materiál, který má vysokou odolnost proti UV záření a povětrnostním podmínkám. Jednotnost mechanických a fyzikálních vlastností zkušebních těles je klíčová pro porovnávání jednotlivých struktur. ASA je jedním z nejpoužívanějších konstrukčních termoplastů, což znamená, že má vysokou mechanickou a tepelnou odolnost a vysokou tuhost. Proto je ideálním materiálem pro aplikace s náročnými požadavky. Jeho tvrdost a houževnatost jsou důležité faktory při výběru materiálu pro výrobu zkušebních vzorků. Proto také byla tato zkušební tělesa navržena a vymodelována ve 3D softwaru Catia V5 R19, což zajišťuje přesný a jednotný tvar vzorků. [15, 32]

Dostupnost materiálu byla dalším faktorem, který byl brán v úvahu při výběru materiálu pro výrobu vzorků. Materiál ASA je poměrně dostupný a jeho pořízení je finančně výhodnější než pořízení jiných konstrukčních polymerních materiálů. To bylo důležité z hlediska nákladů na výrobu vzorků a také z hlediska ekonomické efektivity celého projektu.

Proto byla také vybrána metoda FFF (Fused Filament Fabrication) pro výrobu vzorků. V porovnání s aditivními výrobami za použití kovových materiálů jsou náklady na výrobu vzorků až 10krát nižší. [33, 38]

Tab. 2: Parametry tisku udávané výrobcem [15]

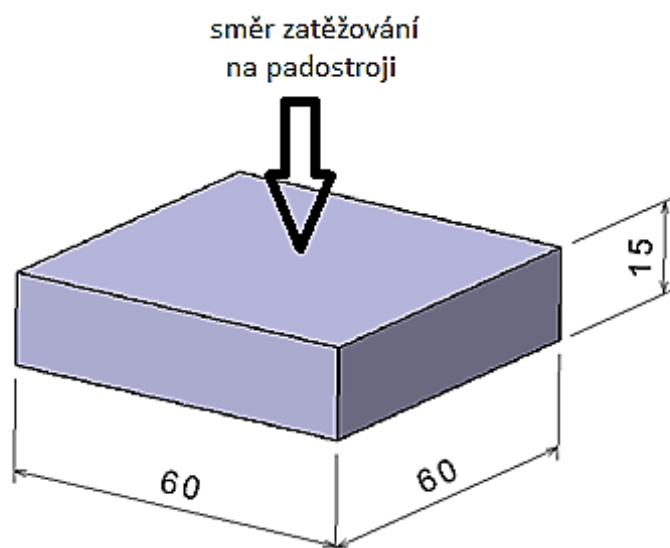
Parametry tisku		
Teplota extruderu	Teplota desky	Rychlost tisku
220–250 °C	40–60 °C	40 mm/s

3.2 Zkušební vzorky

Zkušební tělesa jsou klíčovými prvky při testování materiálů a konstrukcí. V tomto případě se jedná o destičky o rozměrech 60×60 mm a tloušťce 15 mm, které mají rozdílnou vnitřní strukturu. Tyto destičky byly vybrány tak, aby se dala porovnat různá konstrukce vnitřních struktur. Pomocí testování lze určit jejich mechanické vlastnosti, odolnost vůči rázu, v tomto případě síly a energie potřebné k proražení těchto těles. To umožňuje vylepšovat a optimalizovat konstrukce tak, aby byly co nejúčinnější a odolné.

Důležitým faktorem při testování zkušebních vzorků je zachování stejného objemu materiálu při rozlišnosti vnitřní struktury. To znamená, že i když jsou strukturální vzorky odlehčeny o 35 % v porovnání s plným objemem destičky, musí mít stejné základní rozměry jako plná zkušební tělesa. Tento požadavek umožňuje srovnávat různé konstrukce vnitřních struktur na základě stejných parametrů.

Dynamická zkouška rázem umožňuje pozorovat chování zkušebních těles při nárazu. Díky odlišné vnitřní struktuře se mohou destičky chovat různě a mít odlišnou mechanickou odolnost. Tento typ zkoušky je proto klíčový pro posouzení výkonnosti různých konstrukcí. [39, 40]



Obr. 8: Rozměr testovaných těles a směr zatížení na padostroji

3.3 Tvar a struktura

Zkušební tělesa mají různé vlastnosti, které určují jejich použití v různých aplikacích. Jednou z důležitých vlastností těchto těles je jejich schopnost odolávat průniku jiného tělesa. Průnik cizího tělesa může být nebezpečný v případě, že se týká nějakého důležitého systému, jako jsou například vojenské nebo průmyslové zařízení, či ochranné pomůcky, přilby a podobně. Pro snížení rizika průniku jsou materiály navrhovány s různými vnitřními strukturami. Tyto struktury jsou navrženy tak, aby vstupující těleso ztratilo část své energie tím, že se po nárazu rozptýlí do různých směrů v tvarové struktuře zkušebního tělesa. V důsledku toho se rychlost vstupujícího tělesa sníží nebo se zcela zastaví. [24,34]

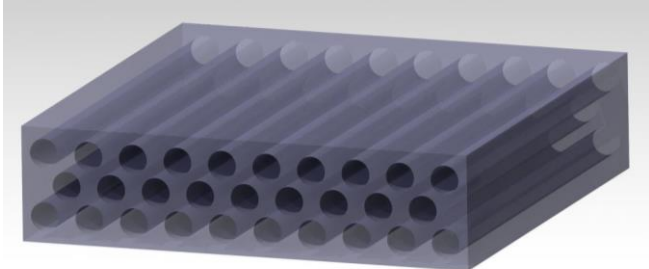
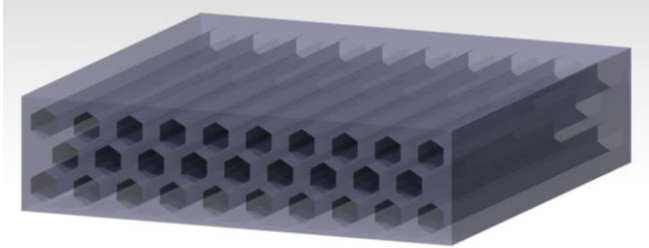
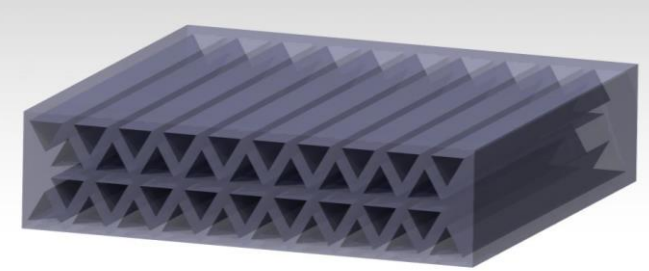
Pro tento účel jsou vymodelovány a vyrobeny různé typy vnitřních struktur, které jsou navrženy s ohledem na tvar a uspořádání materiálu. Pro experimenty se zpravidla používají dvě základní struktury - s plně průchozími otvory a s vnitřními dutinami. [8,10]

Výběr správné vnitřní struktury závisí na mnoha faktorech, včetně typu materiálu, účelu aplikace a požadovaných vlastnostech. Experimenty s různými strukturami mohou pomoci inženýrům a výrobcům najít nejlepší řešení pro jejich specifické použití. [41]

3.3.1 Plně průchozí struktura

U plně průchozích struktur bylo zvoleno několik tvarů, které jsou průchozí skrze celé zkušební těleso. V tomto případě byly na základě literární rešerše zvoleny tvar kruhu, plástve a trojúhelníku. Zde je předpokladem, že bude při zatěžování na padostroji způsoben účinnější rozklad kinetické energie právě díky těmto útvarům. Celkový objem každého strukturního zkušebního tělesa s průchozími otvory je 34,78 cm³.

Tab. 3: Struktury s průchozími otvory

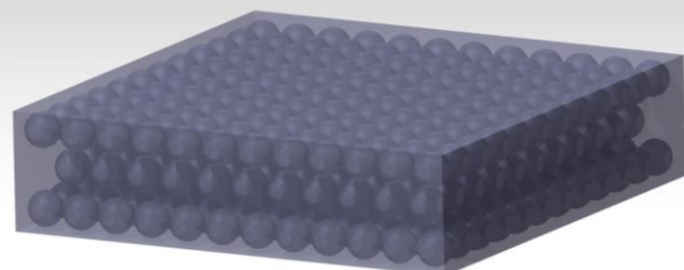

Plně průchozí struktury		
Pojmenování	Značení	Zobrazení struktur
Struktura s kruhovými průchozími otvory	○	
Struktura s průchozími otvory ve tvaru plástve	⬡	
Struktura s trojúhelníkovými průchozími otvory	△	

3.3.2 Struktura vnitřních dutin

Byly zvoleny kulové a kuželové dutiny, které byly rovnoměrně rozloženy po celém objemu vzorku, přičemž byly splněny hmotnostní a objemové rozměry stejně jako u průchozích otvorů. Strukturu s kulovými otvory tvoří celkem 409 kulových otvorů. Průměry jednotlivých kulových otvorů byly určeny dle přesnosti technologie výroby v závislosti na potřebném objemu zkušební vzorku. U kuželové vnitřní struktury je pak těleso vytvořeno z 530 kuželových dutin ve dvou řadách, přičemž jsou kužely v každé řadě proti sobě přeřazeny.

Stejně jako u struktur s průchozími otvory zkušební tělesa s vnitřními dutinami mají stejný objem o hodnotě 34,78 cm³. Lze tak porovnávat pouze chování jednotlivých struktur mezi sebou. Následně jsou porovnány s plným zkušebním tělesem, oproti kterému jsou všechna strukturální tělesa odlehčena o 35 %. Tyto plná tělesa mají pak objem 54 cm³.

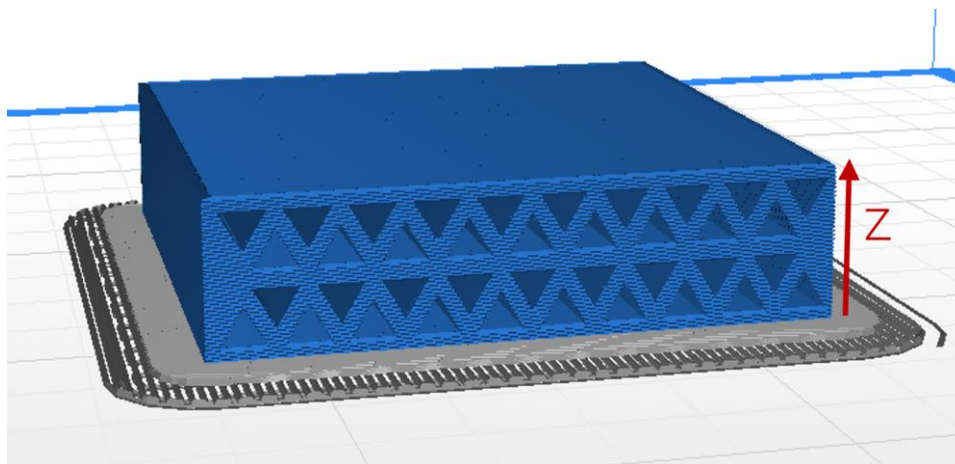
Tab. 4: Struktury s vnitřními dutinami

Struktury s vnitřními dutinami		
Pojmenování	Značení	Zobrazení struktur
Struktura s kulovými dutinami		
Struktura s kuželovými dutinami		

3.4 Nastavení tisku

Nastavení veškerých parametrů tisku je provedeno v softwaru Z-Suite, kdy teplota trysky je 240 °C a teplota stavební desky je nastavena na nejvyšší doporučenou hodnotu teploty 60 °C. Při tomto nastavení teploty stavební desky a v uzavřeném pracovním prostoru tiskárny nedochází vlivem výkyvu teplot ani při delším (časově) tisku ke smršťení nebo deformování zkušební vzorku. Při

výrobě těles jsou jednotlivé vrstvy materiálu vytlačovány v souvislých vrstvách křížem pod úhlem 45°. Výška jedné vrstvy je nastavena na 0,19 mm. Software pro tisk navrhuje několik typů výplně, zde je nastaven 100% infill, neboli výplň bez odlehčení konstrukce dutinami. Strukturální tělesa jsou tedy tvořena a odlehčena pouze vymodelovanými otvory a dutinami. Vzhledem k návrhům jednotlivých otvorů a dutin strukturálních těles není nutné použití podpůrného materiálu. Neexistují zde žádné přemostění, které by způsobovalo nepřesnosti.



Obr. 9: Vizualizace směru pokládání vrstev (červeně) v softwaru Z-Suite

Pro materiál ASA je v tabulce zobrazena celková časová náročnost jednotlivých struktur. Celková doba tisku všech strukturálních těles včetně porovnávacích těles o plném objemu trvala celkem 14 623 minut, tedy 243 hodin a 43 minut.

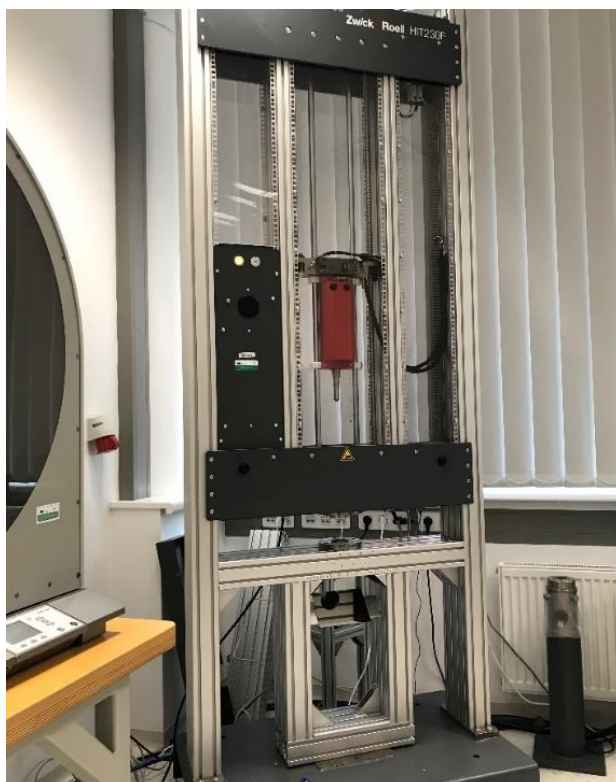
Tab. 5: Doba tisku strukturálních těles

Zkušební těleso	Doba tisku jednoho tělesa	Doba tisku skupiny 7 těles
Plný materiál	7 hodin 3 minuty	49 hodin 21 minut
Trojúhelník- průchozí otvory	5 hodin 26 minut	38 hodin 20 minut
Plástev- průchozí otvory	5 hodin 39 minut	39 hodin 33 minut
Kruh- průchozí otvory	5 hodin 32 minut	38 hodin 44 minut
Kulové dutiny	5 hodin 35 minut	39 hodin 50 minut
Kuželové dutiny	5 hodin 34 minut	38 hodin 58 minut

4. STRUKTURNÍ POHLED EXPERIMENTU

Pro testování strukturních těles byla zvolena pádová zkouška. Zde je cílem porovnání odolností jednotlivých strukturních těles mezi sebou, kdy hodnotícím kritériem bude energie a maximální síly spotřebované při proražení zkušebního tělesa. Na tomto základě budou později vyhodnocena nejodolnější strukturní tělesa vůči pádu, která budou v další části výzkumu vyrobena z plněných materiálů.

Pro měření pomocí instrumentovaných pádových zkoušek byl zvolen Padostroj Zwick Roell HIT230F. Zkoušky proběhly dle norem ČSN EN ISO 6603-1 (640628) a ČSN EN ISO 6603-2. Tato norma je srovnatelná s ASTM D7136/D7136M. [16, 35]

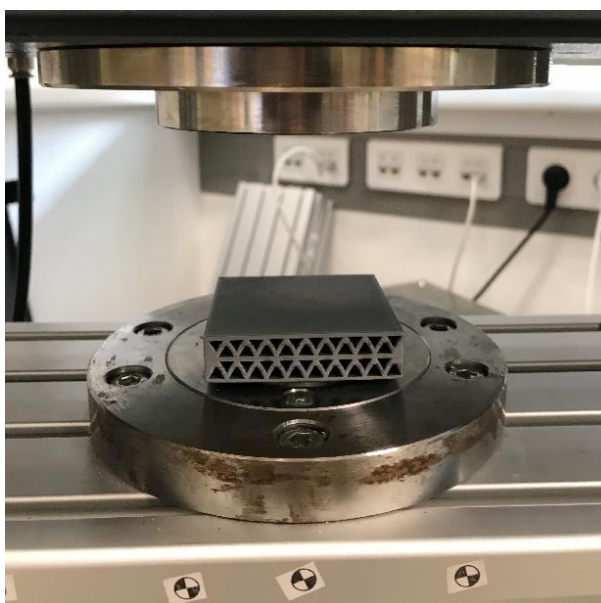


Obr. 10: Zwick Roell HIT230F

Padostroj je schopen dosáhnout rychlosti pádu 4,4 m/s a vyvinout energii 230 J. Používané závaží má hmotnost 23,3 kg. Konstrukce stroje zahrnuje rám, vodící lištu, systém pro přidržení a uvolnění tlouku s půlkulovou hlavou a se závažím, pneumatický lis, měřicí elektroniku a dvě tlačítka pro bezpečné uvolnění závaží. Materiál tlouku je v tomto případě kalená ocel a tlouk má v tomto případě polokulovou leštěnou hlavu o průměru 20 mm. Tlouk je vyroben tak, aby měl dostatečnou odolnost proti otěru a dostatečnou pevnost tak, aby nedošlo k vzniku plastické deformace. [16, 36]

Tab. 6: Hlavní parametry stroje Zwick Roell HIT230F [16]

Hlavní parametry	Hodnota	Jednotka
Rozměry (V × Š × H)	2600 × 1000 × 600	mm
Maximální rychlost nárazu	4,4	m/s
Maximální energie	230	J
Maximální hmotnost závaží	23,482	kg
Hmotnost beranu	0,283	kg
Výška pádu	110-1000	mm
Průměr tlouku	20	mm



Obr. 11: Vzorek vložen do padostroje

4.1 Průběh měření a postup vyhodnocení výsledků strukturních těles

Hodnotícím kritériem u zkoušky pádem u jednotlivých zkušebních těles je hodnota síly a energie potřebná k proražení strukturního tělesa. Snímání a sběr dat zajišťuje software TestXpert II podporující daný stroj. Následně jsou z tohoto programu přeneseny výsledky do programu Microsoft Office Excel, kde je zpracována základní statistika jako například průměrná hodnota a směrodatná průměrová odchylka. Další statistické vyhodnocení je zhotoveno pomocí programu Minitab 17, který díky svým statistickým nástrojům dokonale vizualizuje jednotlivé výsledky v grafech. Všechna data jsou vyhodnocena metodou EDA (exploratorní analýza dat), stejně jako v případě vzorového vyhodnocení struktury s trojúhelníkovými otvory.

Zkušební tělesa nebyla vyhodnocena pouze dle výpočtů, ale také i po vizuální stránce, kdy po zatížení padostroje je u několika struktur či plného tělesa možný vznik delaminace způsoben technologií výroby. Všechny zkušební tělesa jsou






vyrobená ze stejného materiálu a za identicky nastavených podmínek výroby. Stejně jsou zkušební tělesa i testována s opakovatelností sedmi měření, za stejně nastavených podmínek zkoušky.

4.2 Statistické shrnutí strukturních těles

Pro všechny struktury bylo nastaveno jednotné testovací kritérium při pádové zkoušce, kde byla teoretická dopadová rychlost 2,901 m/s, hmotnost závaží 23,77 kg a dopadová energie 99,98 J. Tyto parametry byly nastaveny tak, aby došlo k proražení materiálu, za použití polokulového tlouku o průměru 20 mm, z kalené oceli a leštěnou nárazovou plochou.

V tabulce 7 jsou zobrazeny všechny výsledné hodnoty sil a energií potřebných k proražení zkušebních těles. Jsou zde shrnuty průměrné hodnoty se směrodatnými průměrnými odchylkami a variačními koeficienty.

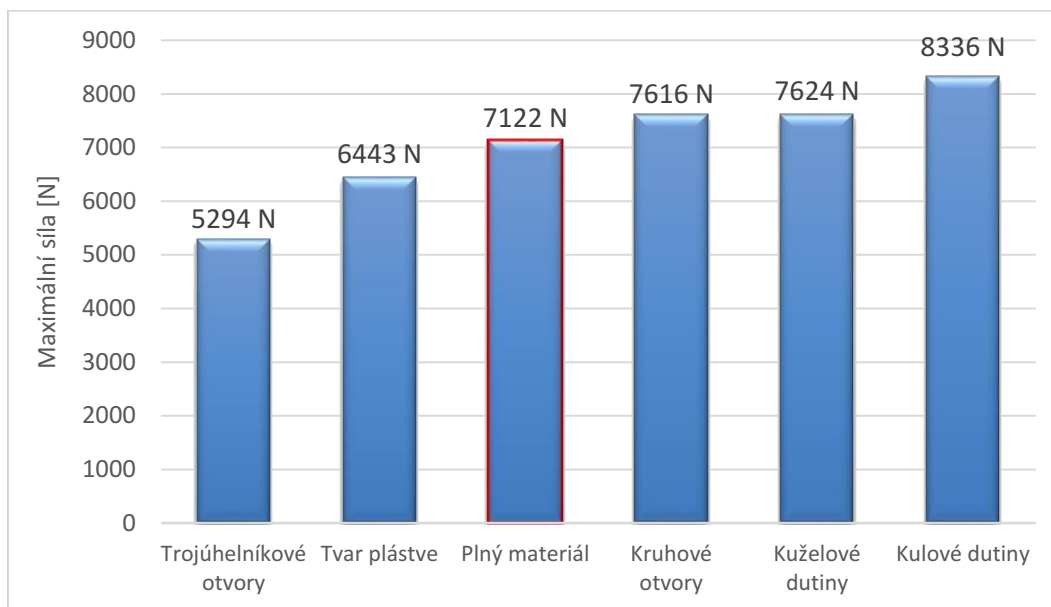
Tab. 7: Shrnutí rázové odolnosti struktur

Porovnání výsledných hodnot							
Strukturní těleso	Síla potřebná k proražení			Energie potřebná k proražení			n
	Průměrná hodnota $[\bar{x}]$	Směrodatná p. odchylka	Variační koeficient [%]	Průměrná hodnota $[\bar{x}]$	Směrodatná p. odchylka	Variační koeficient [%]	
Trojúhelníkové otvory 	5294 N	233 N	6,0	59,06 J	7,67 J	12,99	7
Kruhové otvory 	7616 N	315 N	4,1	49,69 J	4,17 J	8,38	7
Tvar plástve 	6443 N	221 N	3,4	46,01 J	6,60 J	14,35	7
Kulové dutiny 	8336 N	536 N	6,4	51,95 J	4,75 J	9,15	7
Kuželové dutiny 	7624 N	313 N	4,1	102,23 J	0,72	0,70	7
Plný materiál	7122 N	407 N	5,7	79,81 J	14,16	17,74	7

4.2.1 Statistické vyhodnocení strukturních těles z hlediska síly

Ze statistického vyhodnocení a také z grafického zobrazení na obrázku 28 je zřejmé, že nejvyšším odolnostem vůči působení maximálních sil dosahovaly strukturní tělesa s vnitřními kulovými dutinami s průměrnou hodnotou maximálních sil 8336 N a s průměrnou odchylkou 536 N. Dalšími nejodolnějšími tělesy z hlediska maximální síly byly strukturní tělesa s kuželovými dutinami s hodnotou 7624 N a s průměrnou odchylkou 313 N. Další struktura těsně pod hranicí hodnot kuželových dutin byla tělesa s průchozími kruhovými otvory

s hodnotou 7616 N a s průměrnou odchylkou 315 N. Nejnižší hodnoty silového zatížení pak dosahovala struktura s trojúhelníkovými otvory o hodnotě 5294 N s průměrnou odchylkou 233 N.



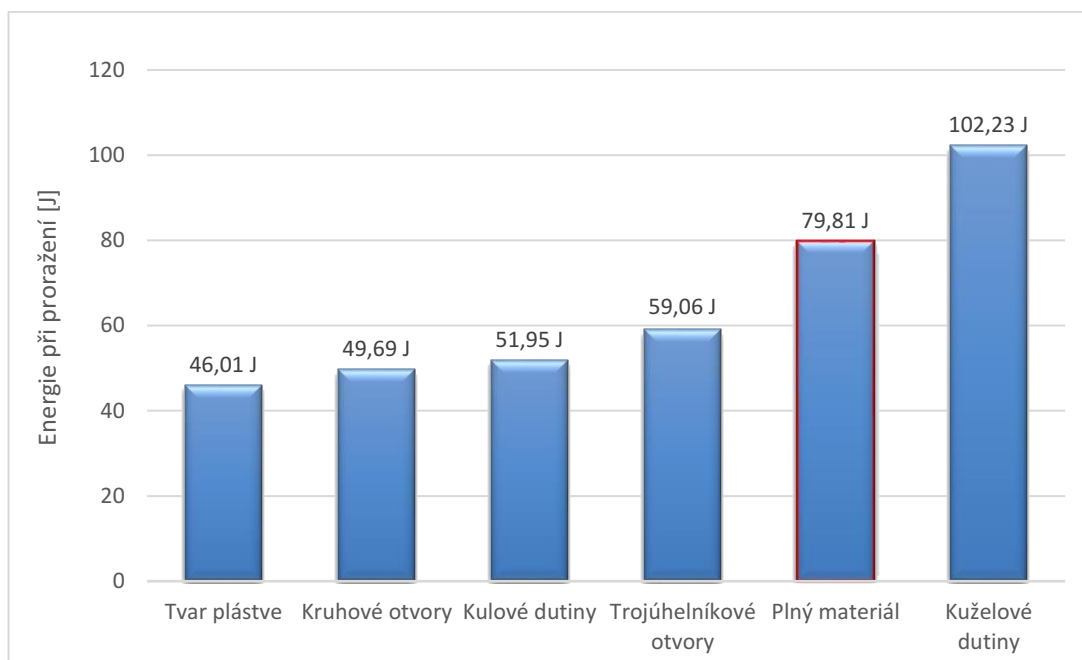
Obr. 12: Grafické zobrazení průměrných hodnot maximálních sil při zatížení padostroje

4.2.2 Statistické vyhodnocení strukturních těles z hlediska energie

Vyhodnocení dle energie potřebné k proražení strukturních těles ukazuje, že nejvyšším odolnostem co se týče pohlcení energie dosahují strukturní tělesa s vnitřními kuželovými dutinami, kde při zatěžování jmenovitou energií 99,98 J nedocházelo k proražení těchto zkušebních těles, avšak docházelo k vysokému průtisku. Hodnota variačního koeficientu je pak ovlivněna nastavením hodnoty zatížení a skutečností, že tlouk nebyl schopen, při tomto zatížení prorazit zkušební těleso.

Druhým nejodolnějším zkušebním tělesem byl pak plný materiál, který dosahoval při zatížení padostrojem hodnoty energie 79,81 J s průměrnou odchylkou 14,16 J. U plného materiálu je zřejmý vysoký podíl směrodatné odchylky od průměrné hodnoty, tedy variační koeficient je na hodnotě 17,74%. Toto může být způsobeno delaminací jednotlivých vrstev materiálu.

Nejnižší hodnoty energie potřebné k proražení dosahovalo pak těleso s průchozími otvory ve tvaru plástve o hodnotě 46,01 J s odchylkou 6,6 J.



Obr. 13: Grafické zobrazení průměrných hodnot energie při zatížení na padostroji

4.3 Vizuální hodnocení po zatížení na padostroji

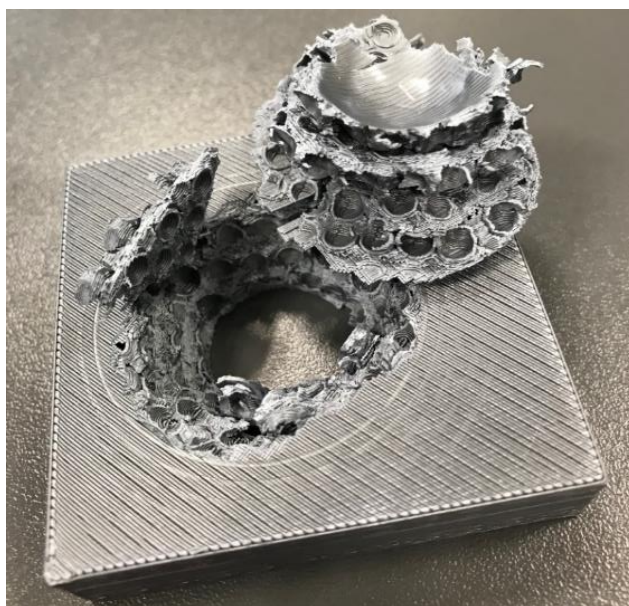
Strukturální tělesa byla naměřena a statisticky vyhodnocena. Nicméně je zde ještě jeden důležitý parametr, čímž je vizuální zhodnocení po zatížení, kdy se u těles mohou projevit různé druhy deformací. U procesu 3D tisku v případě využití technologie FFF je při nanášení jednotlivých vrstev těleso náchylné na tzv. delaminaci. Tento jev lze popsat jako praskání celých plošných poruch v nanášených vrstvách materiálu.

V případě testovaných struktur s průchozími otvory je zřejmé, že docházelo u jednotlivých zástupců těchto strukturálních těles k delaminaci vrstev a taky k vyražení jednotlivých tvarových segmentů z povrchu strukturálního tělesa.



Obr. 14: Delaminace jednotlivých struktur s průchozími otvory

Zatímco u zástupců struktur s vnitřními dutinami se při nárazu tlouku projevilo odlišné chování. Kulové dutiny se postupně při zatěžování vtlačely do sebe, kdy se později celý objem zasaženého pole vytrhl z celého tělesa. V případě kuželových dutin došlo jen k vysokému průtisku.



Obr. 15: Vytlačený objem materiálu u strukturního tělesa dutinami

5. MIKROSKOPIE A OVĚŘENÍ PŘESNOSTI TISKU

Pro ověření přesnosti technologie 3D tisku byl zvolen mikroskop s laserovým 3D skenováním KEYENCE VK-X3000. Jedná se konkrétně o 3D povrchový profilometr, který využívá metodu skenování povrchu. V tomto případě lze využít laserovou konfokální metodu, metodu s proměnlivým ohniskem, nebo metodu interferometrie bílého světla, čímž dosahuje přístroj vysoce přesného měření a analýz různých objektů. Skenovací oblast je o velikosti 50×50 mm. Mikroskop KEYENCE je schopný snímat i materiály s transparentními či zrcadlovými povrchy, je možné použít tento přístroj pro měření a analýzu složitých geometrií, které by jinak mohly být obtížně měřitelné jinými metodami.

Mikroskop KEYENCE také umožňuje vysokorychlostní skenování, které umožňuje rychle a efektivně snímat a analyzovat větší množství dat. Díky tomu lze rychle získat všechny potřebné informace o objektech a ověřit přesnost technologie 3D tisku. [17]



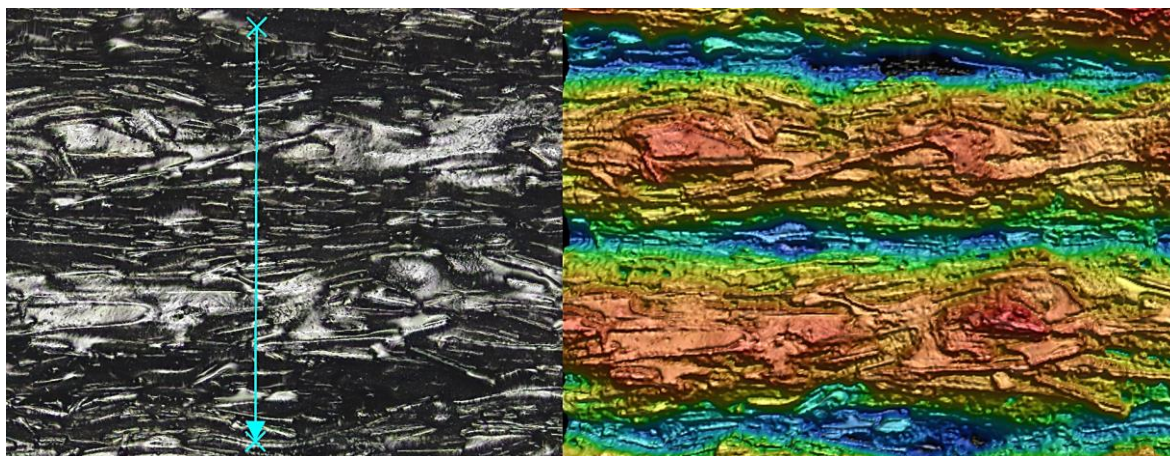
Obr. 16: Měřicí přístroj Keyence VK-X3000 [17]

Tab. 8: Parametry měřicího přístroje Keyence VK-X3000 [17]

Model	VK-X3000
Celkové zvětšení	42× až 28800×
Zorné pole	11 až 7398 μm
Princip měření	Konfokální laser, variace ohniska, interferometrie bílého světla, spektrální interference
Vlnová délka laseru	VK-X3100: Polovodičový laser, 404 nm
Max. rychlost laserového měření	Povrch: 125 Hz, Linka: 7900 Hz
Max. laserový výstup	0,9 mW
Laserová třída	Třída 2 (IEC60825-1)
Rozlišení zobrazení výšky	1 nm

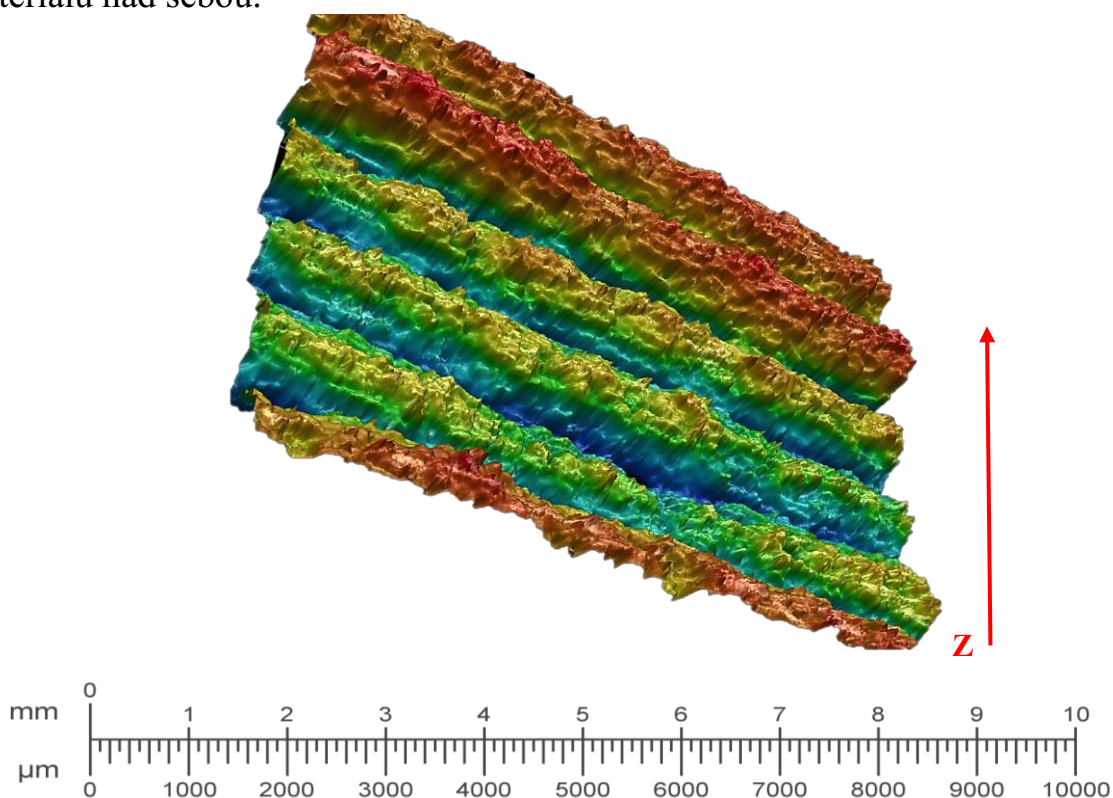
5.1 Měření přesnosti výšky nanášených vrstev

V první řadě u metody výroby 3D tisku byla zkoumána přesnost nanášení jednotlivých vrstev, kdy bylo zjištěno, že při nastavení výšky vrstvy 0,190 mm, stroj tiskl s hodnotou výšky vrstvy 0,184 mm. Je zde tedy nepatrná odchylka 6 mikrometrů, která je v mezích měřicího zařízení a přesnosti tisku 3D tiskárny Zortrax M200 Plus.



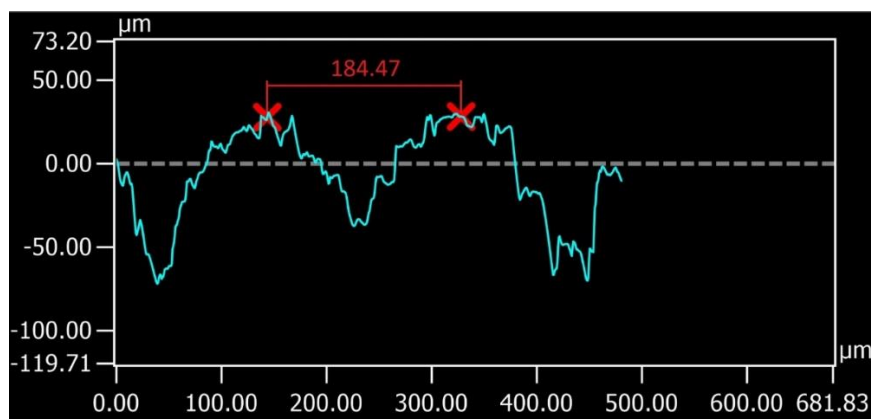
Obr. 17: Mikroskopické zobrazení vrstev materiálu při výrobě zkušebních těles

Na obrázku je zobrazen první krok snímání povrchu tištěného zkušebního tělesa na tiskárně Zortrax M200 Plus, kde jsou zobrazeny dvě nanášené vrstvy materiálu nad sebou.



Obr. 18: Trojrozměrné zobrazení povrchu jednotlivých vrstev materiálu

Na obrázku 18 je zobrazena 3D struktura tohoto povrchu, která je následně na obrázku 19 rozložena do grafu popisujícího drsnost povrchu součásti, kde je zakreslena rozteč mezi dvěma vrstvami nanášeného materiálu, která je souhlasná se skutečnou výškou nanášené vrstvy.

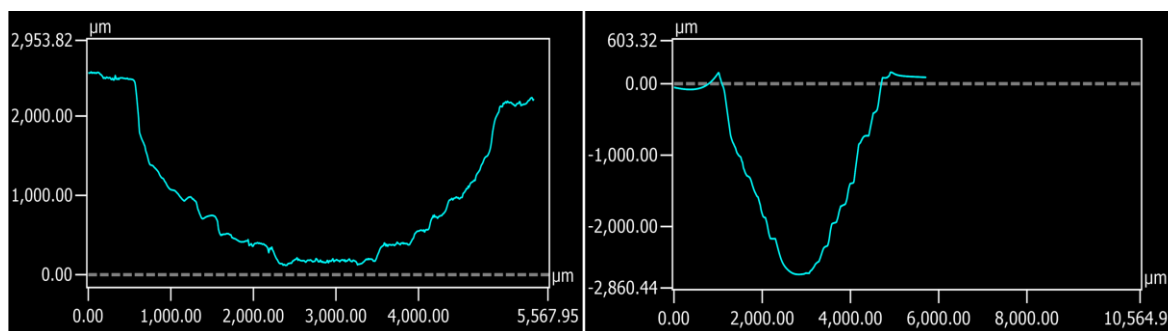


Obr. 19: Rozložení průřezu vrstvy do grafu s naměřenou roztečí mezi vrstvami 0,184 mm

5.2 Měření přesnosti výroby vnitřních dutin

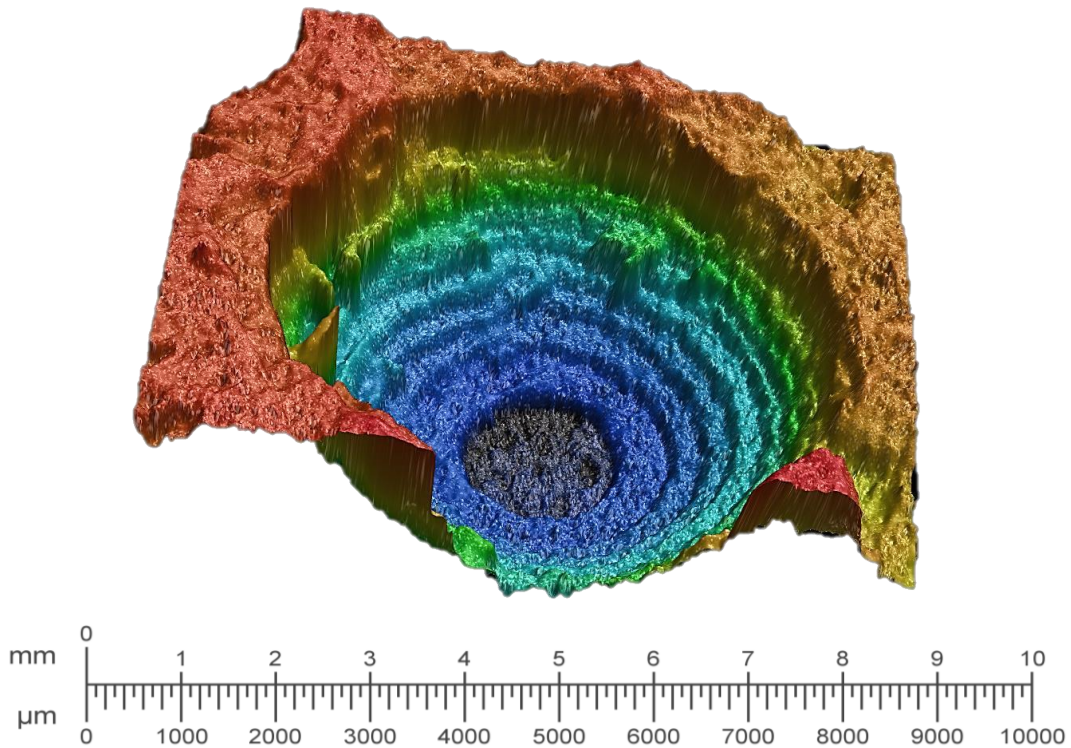
Pro další nasnímáním a vyhodnocení přesnosti tisku strukturních těles byly vybráni zástupci strukturních těles s vnitřními dutinami, tedy zkušební tělesa s nejvyššími odolnostmi vůči působení dynamickému zatížení na padostroji. Konkrétně jsou nasnímána tělesa s vnitřními kulovými otvory a s vnitřními kuželovými otvory. Na obrázku 20, 21 a 22 je zobrazena přesnost měření kulových a kuželových dutin.

Dle snímků z mikroskopu je zřejmá určitá nepřesnost u strukturního vzorku s kulovými a kuželovými dutinami, která je způsobena především nastavením výšky nanášené vrstvy materiálu při výrobě pomocí technologie 3D tisku. Tato nepřesnost lze kompenzovat nastavením výšky vrstev na nižší hodnotu.



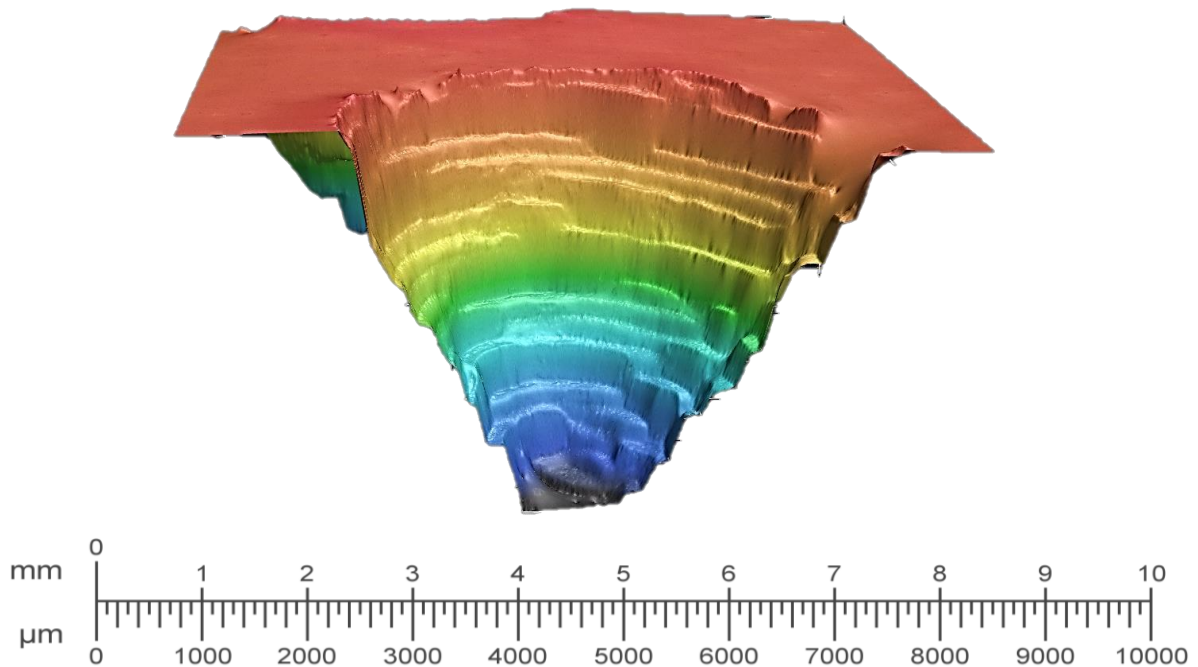
Obr. 20: Rozložení průřezu kulové a kuželové dutiny v grafu

Na obrázku v 3D zobrazení jsou zřejmé již zmíněné kaskádovité útvary vzniklé výškami jednotlivých vrstev. Ostatní nepřesnosti jsou způsobené například drobnými vibracemi při výrobě, nebo také ukončením dané kruhové trajektorie při nanášení vrstvy materiálu, kde při uzavření tohoto kruhového útvaru vzniká spojením tato nepřesnost. Tyto nepřesnosti jsou obvykle malé a nenarušují celkovou kvalitu tisku.



Obr. 21: Trojrozměrné zobrazení povrchu jednotlivých vrstev materiálu u kulových dutin

Stejně jako v případě strukturních vzorků s vnitřními kulovými dutinami, tak i v případě kuželových dutin vznikali nepřesnosti výše uvedenými příčinami. Pro lepší zobrazení byl u kuželové dutiny vytvořen řez viz obrázek 22.



Obr. 22: Trojrozměrné zobrazení kuželových dutin

6. MATERIÁLOVÝ POHLED EXPERIMENTU

V dalším kroku experimentu jsou vybrány nejnovější dostupné plněné materiály pro výrobu zkušebních těles na Charpyho kladivo. Ty by měly dosahovat lepších výsledků, tedy vyšším odolnostem než materiál ASA, z kterého byly vyrobeny prvotní strukturní tělesa pro zatížení padostrojem. Cílem je zjistit materiál s největší odolností vůči vrubové a rázové houževnatosti. Na tomto základě budou nejodolnější materiály zvoleny pro výrobu nejodolnějších strukturních těles.

Některé ze zvolených materiálů disponují materiálovými listy, kde jsou zobrazeny hodnoty ze zkoušky Charpyho kladivem. Nicméně pro ověření přesnosti je tato zkouška opětovně provedena a to z toho důvodu, že výrobci obvykle udávají hodnoty ze zkušebních vzorků vyrobených procesem vstříkování.

6.1 Stroj Zwick Roell HIT 25P

Po zhotovení jednotlivých těles z plněných materiálů, byly tyto zkušební tělesa podrobeny zkoušce na Charpyho kladivu, a to konkrétně na stroji Zwick Roell s kyvadlem série HIT s maximální energií 25 J. Jednotlivé technické parametry stroje jsou uvedeny v tabulkách dole.



Obr. 23: Stroj Zwick Roell HIT 25P

Tab. 9: Základní parametry HIT25P [18]

Označení	1064351
Maximální energie	25 J
Rozměry	1080 × 1170 × 500 mm
Hmotnost	258 kg
Napětí	100–240 V
Frekvence	50/60 HZ
Příkon	70 W

Jednotlivá zkušební tělesa byla ustavena na podpěry dle normy ČSN EN ISO 179-1. Následně byly nastaveny rozměry normalizovaných vzorků v softwaru podporující Charpyho kladivo TestXpert III. Po nárazu kladiva a proražení tělesa byl definován lom na lom typu C, kdy dochází naprostému lomu zkušební tělesa. Pro každý materiál bylo testováno 10 vzorků na rázovou houževnatost (zkušební tělesa bez vrubu) a na vrubovou houževnatost s vytvořeným vrubem pomocí vrubovacího nástroje. [18, 37]

6.2 Plněné materiály

Pro zkoušku Charpyho kladivem byly zvoleny nejnovější plněné materiály dostupné na cívkách s tloušťkou struny 1,75 mm. Jednotlivé materiálové listy jsou vloženy v příloze.

- Nylon AF80 od společnosti Fillamentum
- Nylon CF15 od společnosti Fillamentum
- XT-CF20 od společnosti ColorFabb
- PP-GF30 od společnosti FibreX™
- PC-CF od společnosti Průša Research

Materiál Nylon AF 80

Materiál má vysoké tribologické vlastnosti a odolnosti vůči opotřebení. Oproti neplněnému nylonu odolává vyšším zatížením. Další výhodou je odolnost vůči vyšším teplotám a chemickým látkám. [15]

Tab. 10: Mechanické vlastnosti materiálu Nylon CF15 [15]

Mechanické vlastnosti	Hodnota	Testovací metoda
Pevnost v tahu	50,4 MPa	ISO 527
Prodloužení	5,8 %	ISO 527
Modul pružnosti	510 MPa	ISO 527
Charpy - rázová houževnatost	53,2 kJ/m ²	ISO 179

Materiál Nylon CF15

Plnivem u tohoto materiálu jsou nadrcená uhlíková vlákna, která jsou v polyamidu obsažena z 15 %. Rozměr těchto vláken je 4 x 100 um. Materiál má vysokou pevnost při nízkých teplotách, odolnost vůči opotřebení a chemickou odolnost. [15]

Tab. 11: Mechanické vlastnosti materiálu XT-CF20 [15]

Mechanické vlastnosti	Hodnota	Testovací metoda
Pevnost v tahu	55,78 MPa	ISO 527
Prodloužení	2,04 %	ISO 527
Modul pružnosti	5143 MPa	ISO 527
Charpy - rázová houževnatost	27,45 kJ/m ²	ISO 179

Materiál XT-CF20

Materiál je tvořen co-polyesterem s 20% příměsí karbonových vláken. Kde tyto uhlíková vlákna dodávají vysokou odolnost vůči mechanickému opotřebení. [19]

Tab. 12: Mechanické vlastnosti materiálu XT-CF20 [19]

Mechanické vlastnosti	Hodnota	Testovací metoda
Pevnost v tahu	55,78 MPa	ISO 527
Prodloužení	2,04 %	ISO 527
Modul pružnosti	5143 MPa	ISO 527
Charpy - rázová houževnatost	27,45 kJ/m ²	ISO 179

Materiál PP-GF30

Jedná se o polypropylenový kopolymer, který je vyztužen z 30 % skelnými vlákny. Materiál má vysoké tepelné odolnosti, nižší smrštění a malé deformace v porovnání s jinými materiály na bázi polypropylenu. Má vysokou pevnost a tuhost a chemickou odolnost. [20]

Tab. 13: Mechanické vlastnosti materiálu PP-GF30 [20]

Mechanické vlastnosti	Hodnota	Testovací metoda
Pevnost v tahu	85 MPa	ISO 527
Prodloužení	3 %	ISO 527
Modul pružnosti	5500 MPa	ISO 527
Charpy - rázová houževnatost	40 kJ/m ²	ISO 179

Materiál PC-CF

Materiál má díky příměsí uhlíkových vláken skvělou pevnost, tuhost a teplotní odolnost. Velkou výhodou je také malé smrštění a tím i vyšší rozměrová stálost, také je odolný vůči běžným chemikáliím a UV záření. Je vhodný pro mechanicky a tepelně namáhané díly. [19]

Tab. 14: Mechanické vlastnosti materiálu PC-CF [19]

Mechanické vlastnosti	Hodnota	Testovací metoda
Pevnost v tahu	55 MPa	ISO 527
Prodloužení	3,5 %	ISO 527
Modul pružnosti	4900 MPa	ISO 527
Charpy - rázová houževnatost	35 kJ/m ²	ISO 179
Charpy – vrubová houževnatost	9 kJ/m ²	ISO 179

Ekonomické zhodnocení

Z tabulky 15 je z ekonomického hlediska zřejmé, že pro prvotní výrobu na padostroji byl vhodně zvolen materiál ASA s cenou 0,93 Kč za gram tohoto materiálu. Zatímco například u materiálu PP-GF30 je cena spotřeby materiálu na zkušební strukturní tělesa experimentu až čtyřnásobná.

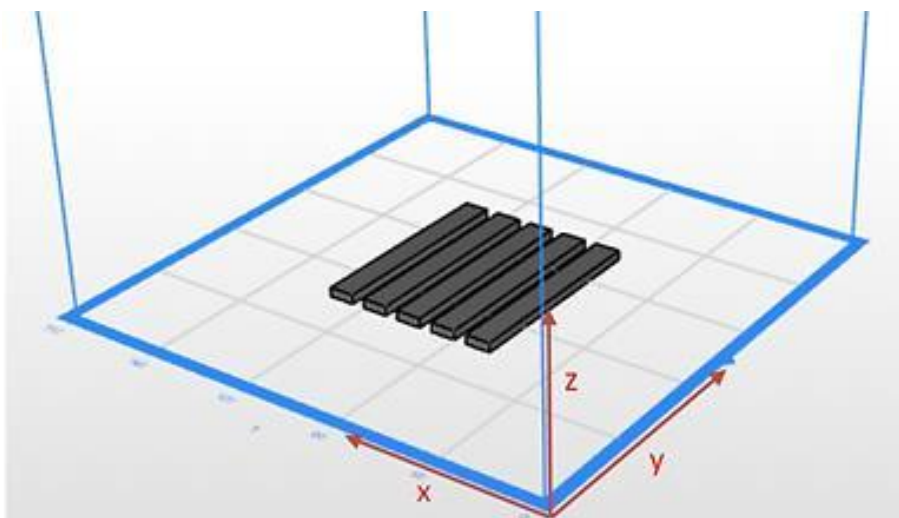
Tab. 15: Ekonomické vyhodnocení plněných materiálů a materiálu ASA

Zvolený materiál	Cena filamentu [Kč]	Hmotnost filamentu [g]	Cena za gram [Kč]
ASA	700	750	0,93
AF80	2060	600	3,43
CF15	1660	600	2,77
XT - CF20	1349	750	1,80
PP - GF30	1971	500	3,94
PC - CF	1499	800	1,87

6.3 Zkušební tělesa

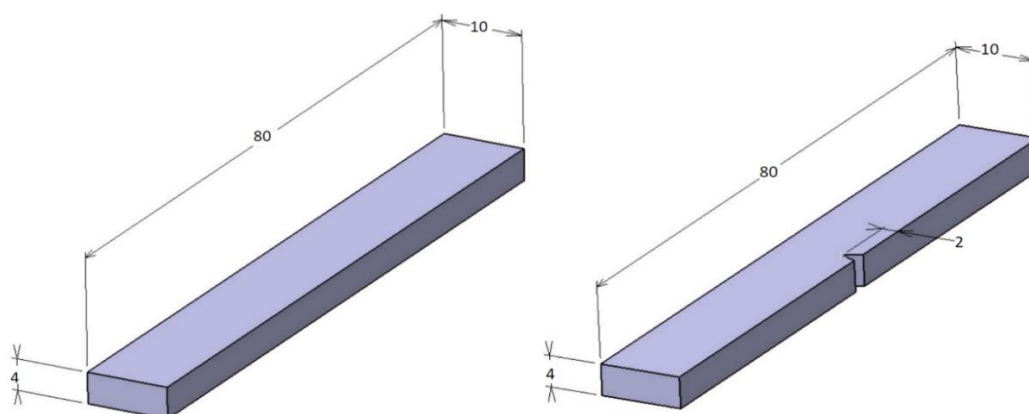
Zkušební tělesa pro zkoušku Charpyho kladivem byly vymodelovány v softwaru Catia V5 R19. Taktéž byly vyrobeny pomocí tiskárny Zortrax M200 Plus, stejně jako v případě výroby strukturních vzorků pro zatěžování na padostroji. Výroba jednotlivých těles je zobrazena na obrázku 24, kde je zobrazeno rozmístění těles na ploše tiskové desky. Zkušební tělesa se tiskla ve skupinách o pěti vzorcích s umístěním uprostřed tiskové desky a v uzavřeném pracovním prostoru 3D tiskárny.

Pro všechny tištěné materiály byla nastavena hodnota vnitřní výplně na 100 %. Výška vytlačované vrstvy materiálu byla pak nastavena na hodnotu 0,19 mm. Průměr kapiláry trysky u tiskárny Zortrax M200 Plus byl 0,4 mm. Ostatní parametry byly automaticky zvoleny softwarem Z-Suite (verze 2.25.0).



Obr. 24: Prostředí softwaru Z-Suite, tisk těles na zkoušku rázové houževnatosti

Zkušební tělesa mají základní rozměr (80 × 10 × 4) mm. V případě zkoušky vrubové houževnatosti je u zkušebního tělesa vytvořen tzv. vrub o hloubce 2 mm. Zkušební tělesa jsou zobrazena na obrázku 25.



Obr. 25: Těleso pro rázovou houževnatost vlevo a pro vrubovou houževnatost vpravo

Tab. 16: Shrnutí nastavení teplotních parametrů tisku u jednotlivých materiálů

Zvolený materiál	Teplota trysky [°C]	Teplota tiskové podložky [°C]
ASA	240	80
AF80	235	80
CF15	245	90
XT – CF20	250	70
PP – GF30	260	90
PC - CF	275	110

6.4 Výsledné hodnoty rázové a vrubové houževnatosti

Stejně jako u strukturních těles byla u vyhodnocení rázové a vrubové houževnatosti použita metoda exploratorní analýzy dat, kdy byla tato data testována na výskyt odlehlých hodnot a vyvrácena možnost systematické či hrubé chyby. V tabulce 31 jsou pak zobrazeny výsledky základní statistiky, kde jsou u jednotlivých materiálů vypočteny průměrné hodnoty, směrodatné odchylky průměru a variační koeficienty.

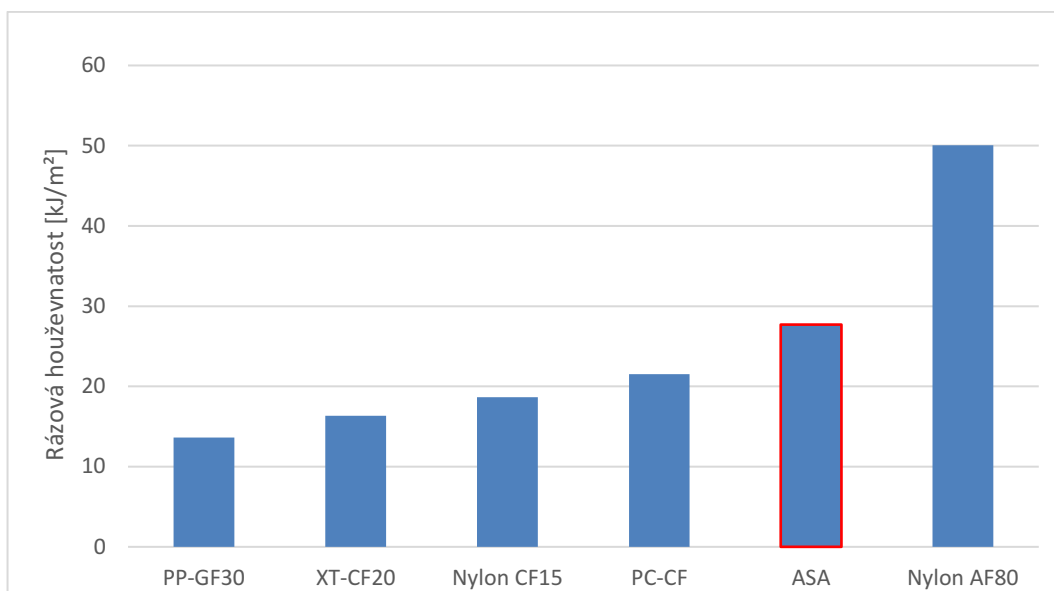
Tab. 17: Zobrazení výsledných hodnot základní statistiky rázové a vrubové houževnatosti

Porovnání výsledných hodnot							
Materiál	Rázová houževnatost [kJ/m ²]			Vrubová houževnatost [kJ/m ²]			n
	Průměrná hodnota [x̄]	Směrodatná průměrná odchylka	Variační koeficient [%]	Průměrná hodnota [x̄]	Směrodatná průměrná odchylka	Variační koeficient [%]	
ASA	27,70	4,27	15,41	12,94	0,61	4,40	10
AF 80	50,05	3,93	7,45	7,41	0,46	5,80	10
CF 15	18,63	1,75	8,91	6,57	1,60	23,14	10
XT-CF20	16,35	2,48	15,15	3,60	0,50	13,84	10
PP-GF30	13,63	1,28	9,43	4,16	0,39	9,41	10
PC-CF	21,54	2,18	10,12	9,27	0,66	7,17	10

6.4.1 Rázová houževnatost – shrnutí výsledků

U měření rázové houževnatosti nejlepších výsledků a tím i největším odolnostem vůči působení rázu na Charpyho kladivu dosáhl plněný materiál Nylon AF80. Tento materiál při měření dosáhl jako jediný udávaných hodnot rázové houževnatosti dle materiálových listů. Kdy hodnota rázové houževnatosti v materiálovém listu je 53,2 kJ/m². Tato hodnota spadá do naměřené hodnoty 50,2 ± 3,93 kJ/m². Z tohoto důvodu je materiál vybrán pro následnou výrobu strukturních vzorků s kulovými vnitřními dutinami. Porovnávacím kritériem budou síly potřebné k proražení strukturního tělesa z materiálu ASA a z materiálu Nylon AF80.

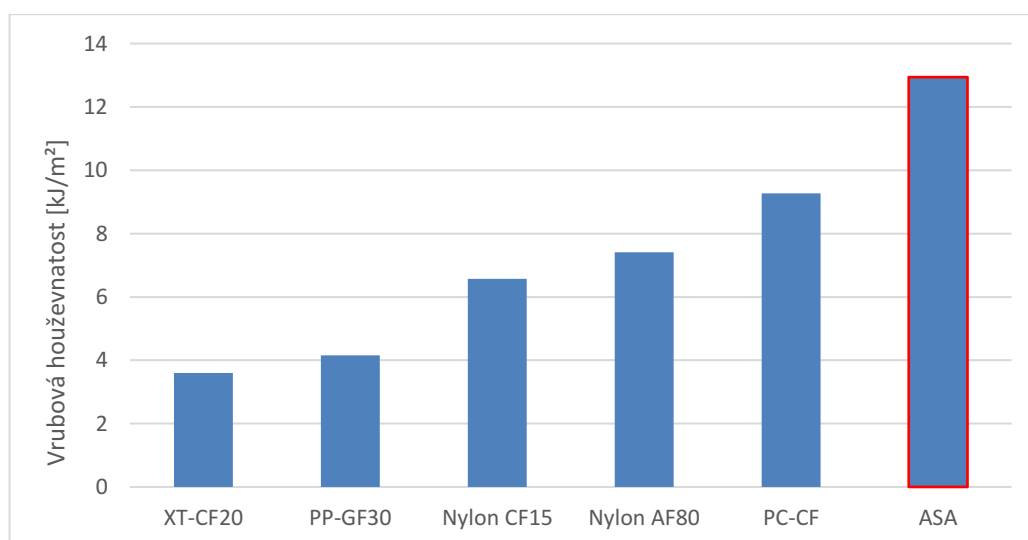
Naopak nejnižší odolnosti vůči rázové houževnatosti dosáhl materiál s označením PP-GF30 s hodnotou 13,63 ± 1,28 kJ/m². U většiny materiálů nedošlo k potvrzení hodnot rázové houževnatosti z technických listů. Toto může být způsobeno několika faktory, jedním z nich je skutečnost, že některá zkušební tělesa nejsou přímo vyrobena metodou 3D tisku, ale metodou vstřikování, kdy vznikají tělesa s diametrálně odlišnými mechanickými vlastnostmi. Další možností nepotvrzení hodnot z materiálových listů je navlhavost některých materiálů. Dále je u plněných materiálů důležitá soudržnost vláken s matricí materiálu.



Obr. 26: Grafické zobrazení výsledků průměrných hodnot rázové houževnatosti plněných materiálů a materiálu ASA

6.4.2 Vrubová houževnatost – shrnutí výsledků

U měření vrubové houževnatosti dosáhl nejlepších výsledků základní materiál ASA (akrylonitril-styren-akryl), který byl využit pro výrobu strukturních těles. Jedná se o materiál, který není nijak plněn. Tento materiál dosáhl hodnoty vrubové houževnatosti 12,94 kJ/m². Na základě tohoto měření bude vybrán plněný materiál s druhou nejvyšší odolností u vrubové houževnatosti, tedy materiál PC-CF, pro další výrobu zkušebních těles s vnitřními kulovými dutinami s následným zatížením na padostroji.

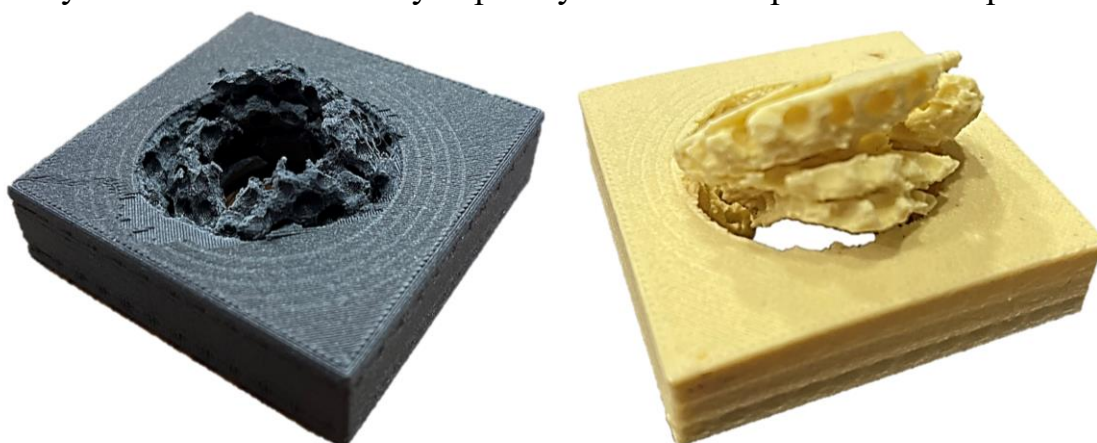


Obr. 27: Grafické zobrazení výsledků průměrných hodnot vrubové houževnatosti plněných materiálů a materiálu ASA

6.5 Vyhodnocení strukturních těles z plněných materiálů

Dle vyhodnocení jednotlivých plněných materiálů u zkoušky Charpyho kladivem byly na základě hodnot rázové a vrubové houževnatosti vybrány dva plněné materiály. Prvním materiálem zvoleným z nejvyšších odolností na rázovou houževnatost je Nylon AF80. Jedná se o polyamid 12 s 8 % aramidových vláken. Druhým materiálem zvoleným vzhledem k výsledkům vrubové houževnatosti je materiál PC-CF, neboli polykarbonát jehož plnivo je drť z uhlíkových vláken.

Pro následnou zkoušku na padostroji byly zvoleny strukturní vzorky s nejvyššími hodnotami silových zatížení při působení padostroje, tedy strukturní tělesa s kulovými dutinami. Na obrázku 28 jsou zobrazeny strukturní vzorky s kulovými dutinami ze zvolených plněných materiálů po zatížení na padostroji.



Obr. 28: Strukturní vzorky o rozměru (60×60×15 mm) z plněných materiálů po zatížení na padostroji. Materiál PC-CF vlevo, materiál Nylon AF80 vpravo

Tab. 18: Porovnání zvolených plněných materiálů s materiálem ASA u strukturních těles s kulovými dutinami

	Síla potřebná k proražení			Energie potřebná k proražení			n
	Průměrná hodnota [x̄]	Směrodatná průměrná odchylka	Variační koeficient [%]	Průměrná hodnota [x̄]	Směrodatná průměrná odchylka	Variační koeficient [%]	
ASA	8336 N	536 N	6,40	51,95 J	4,75 J	9,15	7
AF 80	8153 N	137 N	1,68	47,00 J	5,41 J	11,51	3
PC-CF	8593 N	313 N	3,70	47,16 J	0,50 J	1,10	3

Rozdělení do skupin pomocí metody ANOVA porovnání průměrů:

	N	AR. PRŮM.	SKUPINA
PC-CF max. síly	3	8593	A
ASA max. síly	7	8336	A
AF 80 max. síly	3	8153	A

Ze statistického vyhodnocení je zřejmé, že i když v případě vrubové houževnatosti dosahoval vyšších odolností materiál ASA, tak v případě zkoušky padostrojem dosahoval větší odolnosti materiál PC-CF. Je tedy zřejmé, že na základě zkoušky Charpyho kladivem jsou hodnoty pouze orientační a že v při zatížení na padostroj mohou být výsledky mírně odlišné.

Dle statistické metody ANOVA byla zjištěna určitá zaměnitelnost výběrových souborů, kdy jednotlivý materiálový zástupci nedosahují vlivem velikosti směrodatných průměrových odchylek větším rozdílům mezi sebou, tudíž spadají do stejné skupiny A. Průměrné hodnoty se tedy mezi sebou liší statisticky nevýznamně.

7. Diskuze výsledků

Celkový experiment je tvořen z několika částí. Z návrhu a výroby strukturních těles pro následné zatížení na padostroj. V tomto případě byla vytvořena strukturní tělesa se základním rozměrem $60 \times 60 \times 15$ mm, s 35% úbytkem objemu materiálu oproti plnému tělesu.

Druhou část pak tvoří zkouška plněných materiálů na Charpyho kladivu, kde je vyrobeno standardizované zkušební těleso o rozměrech $80 \times 10 \times 4$ mm. Cílem této zkoušky je zjistit rázovou a vrubovou odolnost zkoušených materiálů a následně nejodolnější materiál vůči tomuto typu zatížení použít pro výrobu strukturních těles. Výsledkem pak budou nejodolnější strukturní tělesa s největší odolností vůči tomuto dynamickému zatížení. Zatěžování Charpyho kladivem bylo zvoleno jako porovnávací zkouška především z ekonomického hlediska, kde velikost zkušebních těles je menší jako v případě zkoušky na padostroj. Tedy výroba zkušebních těles není zde tak finančně nákladná.

Na základě získaných výsledků z experimentální části strukturních vzorků může být konstatováno, že z jednotlivých návrhů strukturních těles bylo nejodolnějším tělesem z hlediska energie strukturní těleso tvořeno 530 kuželovými dutinami, které jako jediné odolalo zatížení 100 J. V tomto případě tedy nedocházelo k úplnému proražení tělesa, ale pouze k vysokému průtisku. Z hlediska působící maximální síly pak odolávalo největším silovým zatížením strukturní těleso s 409 kulovými dutinami o průměrné hodnotě maximálních sil 8336 ± 536 N. Na základě výsledků strukturních těles bylo pro následnou výrobu z plněných materiálů vybráno těleso s kulovými dutinami, které dosahovalo největším silovým zatížením a docházelo při tomto zatížení k úplnému proražení.

Z hlediska materiálového pohledu bylo pro výrobu zvoleno několik nejnovějších materiálů plněných uhlíkovými, aramidovými či skelnými vlákny. Tyto materiály byly pak podrobeny zkoušce Charpyho kladivem na rázovou a vrubovou houževnatost. Zde z hlediska rázové houževnatosti dosahoval nejvyšším odolnostem materiál AF80 s hodnotou $50,05 \pm 3,93$ kJ/m². Dále z pohledu vrubové houževnatosti bylo zjištěno, že nejvyšším odolnostem dosahuje právě materiál ASA, který byl zvolen pro prvotní výrobu strukturních těles.

Vzhledem k této skutečnosti byl tedy zvolen v pořadí druhý materiál s označením PC-CF s hodnotou vrubové houževnatosti $9,27 \pm 0,66 \text{ kJ/m}^2$.

Poslední částí experimentu byla výroba strukturního tělesa s kulovými dutinami z těchto dvou zvolených plněných materiálů s označením AF 80 a PC-CF. Po otestování struktur z plněných materiálů bylo zjištěno, že největším průměrným maximálním silám odolává těleso z materiálu PC-CF o hodnotě zatěžujících sil $8593 \pm 313 \text{ N}$. Co se týče spotřebované energie při proražení naopak dosahovalo největším odolnostem zkušební těleso z materiálu ASA o konkrétní hodnotě $51,95 \pm 4,75 \text{ J}$. Na základě statistického vyhodnocení u výsledků plněných materiálů s materiálem ASA, byla zjištěna pomocí statistické metody vyhodnocení ANOVA určitá zaměnitelnost hodnot z jednotlivých výběrových souborů. Na základě tohoto porovnání se průměry souborů liší statisticky nevýznamně. Lze tedy říci, že při tomto konkrétním zatížení, dané technologii výroby a u konkrétně zvolených materiálů, je minimální rozdíl v odolnosti při zatížení na padostroji.

Je tedy možné, že tyto minimální rozdíly u výsledků zkoušky na padostroji u materiálu ASA a plněných materiálů jsou způsobeny danou technologií výroby FFF, kde dochází k delaminaci jednotlivých vrstev materiálu. V dalším případě plněných materiálů je možné, že plnivo není tak modifikováno, aby soudržnost materiálu v jednotlivých vrstvách byla tak vysoká, jako v případě čistých materiálů bez plniv ve formě vláken uhlíku, aramidu apodobně. [42, 43]

Závěrem experimentální část z hlediska strukturního pohledu splňuje požadavky na nižší objem současně s vyšší odolností vůči zatížení na padostroji než u tělesa s plným objemem. Lze tedy říci, že použití struktur s kuželovými dutinami splňuje prvotní myšlenku úspory materiálu, a to konkrétně o 35 % objemu. Tedy z ekonomického hlediska jsou tato data přínosem pro budoucí návrhy konstrukcí a těles odolných vůči dynamickému zatížení. Práce se inspirovala složitými návrhy z literární rešerše a demonstruje myšlenku návrhu lehkého materiálu s vysokou odolností proti nárazu za použití dostupných materiálů podporujících FFF technologii 3D tisku. [5, 11]

8. Přínos pro vědu a praxi

Cílem této práce bylo vytvořit struktury odolné vůči dynamickému zatížení na padostroji. Tyto struktury byly navrženy v softwaru Catia, vyrobeny technologií 3D tisku FFF a následně testovány na padostroji, kde byla snímána síla a energie potřebná k proražení zkušebního tělesa, čímž lze hodnotit odolnost materiálu. Těmito strukturními tělesy lze přispět k šetření materiálu při výrobě těles odolných vůči dynamickému zatížení. Výsledky této práce mohou být využity při konstrukčních návrzích pro sportovní pomůcky, jako jsou přilby a pomůcky pro ochranu zdraví, které jsou velmi důležité pro sportovce, kteří riskují zranění při nebezpečných sportech. Dalším možným využitím výsledků této práce je oblast balistiky. Kde při pokračování ve výzkumu za pomoci jiných technologií 3D tisku mohou být eliminovány různé nepříznivé jevy při výrobě. Například při využití

metody DMLS (Direct Metal Laser Sintering) a za použití kovových materiálů mohou tělesa předcházet delaminacím ve vrstvách materiálu a také mohou být struktury vyrobeny s větší přesností díky spékání kovového prášku. Metoda DMLS tedy může být vhodným směrem pro budoucí pokračování například v oblasti balistiky, kde mohou tělesa dosahovat vysokých odolnosti vůči působení projektilu.

9. Závěr

Na základě literární rešerše byly navrženy, vymodelovány a vyrobeny strukturní zkušební tělesa. Jednotlivá strukturní tělesa mají odlišné tvary a byly rozděleny na struktury s průchozími otvory a s vnitřními dutinami. Jednotlivé modely byly vytvořeny tak, aby měl objem u všech stejnou hodnotu a současně aby byly od vzorku plného materiálu odlehčeny o 35%. Jednotlivé zkušební tělesa byly vyrobeny z dostupného materiálu ASA, za použití technologie 3D tisku, konkrétně metody Fusion Filament Fabrication (FFF). Všechna tělesa byla vyráběna za stejných podmínek, a to konkrétně nastavení tloušťky vrstvy 0,19 mm, teploty vytlačování 240 °C, teploty tiskové desky 80 °C a za použití 100% výplně. Pro výrobu byla použita tryska s průměrem kapiláry 0,4 mm. Dalším důležitým aspektem je, že proces výroby probíhal v uzavřeném pracovním prostoru 3D tiskárny.

V první a taky hlavní části experimentu bylo cílem získat strukturní tělesa se stejnými či vyššími odolnostmi vůči působení padostroje než u plného materiálu, přičemž tyto strukturní tělesa mají o 35 % nižší objem jako plné těleso. Pro tuto zkoušku byl použit padostroj Zwick Roell HIT230F. Hodnotícím kritériem byly maximální síly a energie potřebné k proražení zkušebního tělesa. Na tomto základě vyhodnocení lze říci, že některé struktury dosáhly vyšším odolnostem než plný materiál. Jediný zástupce struktur s průchozími otvory, který dosahoval vyšších odolností než plný materiál, byla struktura s průchozími kruhovými otvory. Zde průměrné maximální síly dosáhly hodnoty 7616 N, což je o 6,5 % více jako v případě plného tělesa s hodnotou 7122 N. Nicméně s hodnotou energie 49,69 J nebyla schopna struktura s kruhovými otvory překonat hodnotu energie plného tělesa 79,81 J.

Druhou skupinou byly pak zástupci s vnitřními dutinami, kde byl model vytvořen 409 kulovými dutinami a 530 kuželovými dutinami. Zde struktura s vnitřními kulovými dutinami dosáhla hodnoty 8336 N, což je o 14,6 % vyšší hodnota síly potřebné k proražení. Energie byla u této struktury na hodnotě 51,95 J, tím tedy o 34,9 % nižší jako v případě plného tělesa. Další strukturou, která jako jediná překonala obě hodnotící kritéria energie a síly potřebné k proražení plného tělesa, bylo strukturní těleso s vnitřními kuželovými dutinami s hodnotou průměrné maximální síly 7624 N a hodnotou energie 102,23 J. V porovnání s plným materiálem odolávaly strukturní tělesa s vnitřními kuželovými dutinami o 6,6 % vyšším zatěžujícím silám a o 49 % větším energiím při zatížení padostrojem. V tomto jediném případě nedocházelo k proražení zkušebního

tělesa, ale jen k vysokému průtisku. Lze tedy říci, že těleso s vnitřními kuželovými dutinami dosáhlo největších odolností z této části výzkumu.

Co je důležité zmínit, je skutečnost že u plně průchozích otvorů a také u plného tělesa docházelo k tzv. delaminaci jednotlivých vrstev či jednotlivých tvarových segmentů, zatím co u struktur s vnitřními dutinami docházelo vždy k vtlačování jednotlivých tvarových řad do sebe s následným vyražením či vytlačení celého objemu ze zkušební tělesa.

Po zatěžování těles na padostroji byly díky mikroskopu Keyence přeměřeny skutečné hodnoty vnitřních dutin, kde byly pojmenovány určité nepřesnosti při výrobě, které vznikají především nastavenou výškou vrstev a uzavřením kruhových trajektorií při pohybu vytlačovací trysky. Také byla naměřena skutečná výška jednotlivých vrstev o hodnotě 0,184 mm, která byla v softwaru Z-Suite nastavena na hodnotu 0,190 mm. Lze říci že tato odchylka spadá do přesnosti polohování tiskové hlavy spolu s přesností měřícího přístroje.

V další části výzkumu bylo zvoleno několik nejnovějších plněných materiálů pro zhotovení zkušebních těles na zkoušku Charpyho kladivem. Tato zkouška byla zvolena především skrz velikosti zkušebních těles, tedy z ekonomického hlediska, kdy standardizované zkušební tělesa na padostroj jsou pětikrát větší. U zkoušky na Charpyho kladivu bylo cílem porovnat materiály mezi sebou a z nejodolnějšího materiálu na rázovou a vrubovou houževnatost vyrobit zkušební těleso, které by odolalo nejvyšším hodnotám sil a energiím při zatížení na padostroji.

Na základě naměřených hodnot rázové houževnatosti dosahoval nejlepších výsledků a tím i nejvyšším odolnostem vůči působení Charpyho kladiva, materiál s označením Nylon AF80. Tento materiál je plněn aramidovými vlákny a dle materiálových listů má hodnotu rázové houževnatosti 53,2 kJ/m². Tato hodnota se potvrdila i měřením, kdy rázová houževnatost byla $50,5 \pm 3,93$ kJ/m². Tudíž pro výrobu strukturního tělesa byl zvolen plněný materiál Nylon AF80. Nicméně po zatížení strukturního tělesa s kulovými dutinami bylo zjištěno, že Nylon AF80 nedosahuje takových odolností vůči působení padostroje. Tedy dle měření nedosahoval materiál AF80 odolností jako materiál ASA.

Na základě naměřených hodnot vrubové houževnatosti dosáhl ze všech zkoušených materiálů nejvyšším odolnostem materiál ASA s hodnotou vrubové houževnatosti $12,94 \pm 0,61$ kJ/m². Druhé nejvyšší hodnoty vrubové houževnatosti $9,27 \pm 0,66$ kJ/m² dosáhl materiál s označením PC-CF, který byl následně zvolen pro výrobu strukturního tělesa s kulovými dutinami. Po zatížení tohoto strukturního tělesa z materiálu PC-CF bylo zjištěno, že dosahuje větších odolností vůči maximálním silám na padostroji, konkrétně 8593 N, což je oproti materiálu ASA nárůst síly o celkem 3 %. Z tohoto důvodu a také dle vyhodnocení metodou ANOVA je zřejmé, že materiálový pohled u strukturního vzorku z hlediska konkrétních plněných materiálů AF 80 a PC-CF nemá zásadní vliv na odolnost strukturních těles vůči působení padostroje. Důvodem pak může být, že plnicí

vlákna nejsou modifikována k daným materiálům a tedy nedosahují statisticky významným větším odolnostem jako materiál ASA.

Následným pokračováním práce by mohlo být využití jiné technologie výroby, například technologie DMLS (Direct Metal Laser Syntering), díky které by strukturní vzorky měly řádově vyšší odolnosti a nedocházelo by zde k nepříznivým jevům při výrobě, jako je například delaminace jednotlivých vrstev u technologie FDM. Z hlediska DMLS by bylo zajímavé experimentální pokračování například v odvětví balistiky.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] CAMINERO, M.A., J.M. CHACÓN, I. GARCÍA-MORENO a G.P. RODRÍGUEZ. Impact damage resistance of 3D printed continuous fibre reinforced thermoplastic composites using fused deposition modelling. *Composites Part B: Engineering*. 2018, 148, 93-103. ISSN 13598368. Dostupné z: doi:10.1016/j.compositesb.2018.04.054
- [2] SAJADI, S. M., P. RAMESH, Dr. M. M. RAHMAN, Dr. C. S. TIWARY a Prof. P. M. AJAYAN. 3D Printed Tubulanes as Lightweight Hypervelocity Impact Resistant Structures. Nov 11, 2019. 2019. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1002/sml.201904747
- [3] Sanaz Soleymani Eil Bakhtiari, Hamid Reza Bakhsheshi-Rad, Saeed Karbasi, Mahmood Razzaghi, Mohamadreza Tavakoli, Ahmad Fauzi Ismail, Safian Sharif, Seeram RamaKrishna, Xiongbiao Chen, Filippo Berto, 3-Dimensional Printing of Hydrogel-Based Nanocomposites: A Comprehensive Review on the Technology Description, Properties, and Applications, *Advanced Engineering Materials*, 10.1002/adem.202100477, 23, 10, (2021).
- [4] Mohammad Reza Khosravani, Tamara Reinicke, On the environmental impacts of 3D printing technology, *Applied Materials Today*, 10.1016/j.apmt.2020.100689, 20, (100689), (2020).
- [5] J. Nyika, F.M. Mwema, R.M. Mahamood, E.T. Akinlabi, Tc Jen, A five-year scientometric analysis of the environmental effects of 3D printing, *Advances in Materials and Processing Technologies*, 10.1080/2374068X.2021.1945267, (1-11), (2021).
- [6] Rushikesh S. Ambekar, Brijesh Kushwaha, Pradeep Sharma, Federico Bosia, Massimiliano Fraldi, Nicola M. Pugno, Chandra S. Tiwary, Topologically engineered 3D printed architectures with superior mechanical strength, *Materials Today*, 10.1016/j.mattod.2021.03.014, (2021).
- [7] Basgul C , Yu T , MacDonald DW et al. Structure–property relationships for 3D-printed PEEK intervertebral lumbar cages produced using fused filament fabrication. *J Mater Res* 2018;33:2040–51.
- [8] SAJADI, Seyed Mohammad, Peter Samora OWUOR, Robert VAJTAI, et al. Boxception: Impact Resistance Structure Using 3D Printing. *Advanced Engineering Materials*. 2019, 21(8), 2269-2275. ISSN 1438-1656. Dostupné z: doi:10.1002/adem.201900167
- [9] Zhao, L., Qian, X., Sun, Y. et al. Ballistic behaviors of injection-molded honeycomb composite. *J Mater Sci* 53, 14287–14298 (2018). <https://doi.org/10.1007/s10853-018-2611-y>
- [10] ZHOU, Xia, Chi QU, Yan LUO, Roger HEISE a George BAO. Compression Behavior and Impact Energy Absorption Characteristics of 3D Printed Polymer Lattices and Their Hybrid Sandwich Structures.

- Journal of Materials Engineering and Performance [online]. 2021, 30(12), 8763-8770 [cit. 2022-05-27]. ISSN 1059-9495. Dostupné z: doi:10.1007/s11665-021-06242-w
- [11] AMBEKAR, Rushikesh S., Eliezer F. OLIVEIRA, Brijesh KUSHWAHA, et al. On the mechanical properties of atomic and 3D printed zeolite-templated carbon nanotube networks. Additive Manufacturing. 2021, 37(52). ISSN 22148604. Dostupné z: doi:10.1016/j.addma.2020.101628
- [12] SAJADI, Seyed Mohammad, Peter Samora OWUOR, Steven SCHARA, et al. Multiscale Geometric Design Principles Applied to 3D Printed Schwarzites. Advanced Materials. 2018, 30(1). ISSN 0935-9648. Dostupné z: doi:10.1002/adma.201704820
- [13] Monkova, Katarina; Monka, Peter Pavol; Šuba, Oldřich; Žaludek, Milan; Kozak, Dražan and Vanca, Jan. Influence of the material volume of a lattice structure on bending properties // MATEC Web of Conferences, 349 (2021), 04003; 04003, 6 doi:10.1051/mateconf/202134904003
- [14] Zortrax: Zortrax M200 Plus [online]. [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: <https://zortrax.com>
- [15] Filamentum Addictive polymers [online]. [cit. 2023-03-22]. Dostupné z: <https://filamentum.com/>
- [16] Zwickroell [online]. [cit. 2021-04-11]. Dostupné z: <https://www.zwickroell.com>
- [17] Keyence [online]. [cit. 2023-03-22]. Dostupné z: <https://www.keyence.eu/cscz/products/microscope/laser-microscope/>
- [18] ČSN ISO 148-1 Kovové materiály – Zkouška rázem v ohybu metodou Charpy – Část 1: Zkušební metoda. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [19] Prusament [online]. [cit. 2020-12-30]. Dostupné z: <https://prusament.com/materials>
- [20] Fibrex [online]. [cit. 2023-03-22]. Dostupné z: <https://www.3dxttech.com/product/fibrex>
- [21] GIBSON, Ian, David ROSEN a Brent STUCKER. Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. Second Edition. Springer, 2015. ISBN 978-1-4939-2113-3.
- [22] Přehled technologií 3D tisku. Dk metal prominent [online]. 09.01.2018 [cit. 2020-12-16]. Dostupné z: <http://www.dkmp.cz/o-nas/detail/prehled-technologii-3d-tisku>
- [23] THOMAS, Daniel J. a Deepti SINGH. 3D Printing in Medicine and Surgery. 2020. United Kingdom: Elsevier. ISBN 978-0-08-102543-7. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/C2017-0-01048-0>
- [24] 4FUTUR3D | Základní pravidla 3D modelování pro 3d tisk. FUTUR3D | 3D tiskárny, 3d tisk a 3d skenování [online]. Dostupné z: <https://www.futur3d.net/zakladnipravidla-3d-modelovani-pro-3d-tisk>

- [25] GEBHARDT, Andreas; HÖTTER, Jan-Steffen. Additive Manufacturing: 3D Printing for Prototyping and Manufacturing. . 2016, . ISSN: -
- [26] Alianna Maguire, Neethu Pottackal, M A S R Saadi, Muhammad M Rahman, Pulickel M Ajayan, Additive manufacturing of polymer-based structures by extrusion technologies, Oxford Open Materials Science, 10.1093/oxfmat/itaa004, 1, 1, (2020).
- [27] Sharafeldin, M.; Jones, A.; Rusling, J.F. 3D-Printed Biosensor Arrays for Medical Diagnostics. *Micromachines* 2018, 9, 394.
<https://doi.org/10.3390/mi9080394>
- [28] FINA, Fabrizio, Alvaro GOYANES, Simon GAISFORD a Abdul W. BASIT. *International Journal of Pharmaceutics: Selective laser sintering (SLS) 3D printing of medicines*. 2017. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2017.06.082](https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2017.06.082)
- [29] AWAD, Atheer, Fabrizio FINA, Alvaro GOYANES, Simon GAISFORD a Abdul W. BASIT. *International Journal of Pharmaceutics: 3D printing: Principles and pharmaceutical applications of selective laser sintering*. 2020. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2020.119594](https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2020.119594)
- [30] Types of 3D printing [online]. [cit. 2022-04-17]. Dostupné z: <https://www.protolabs.com/resources/blog/types-of-3d-printing/>
- [31] Liza Wallach Kloski, Nick Kloski. *Začínáme s 3D tiskem*. Brno : Computer Press, 2017.
- [32] LAPČÍK, Lubomír a Miroslav RAAB. *Nauka o materiálech II*. Zlín : Vyd. 2., rozš. Univerzita Tomáše Bati., 2004. ISBN 80-7318-229-7.
- [33] FDM (Schmelzschtichtung). Visual Leutec3D[online]. 2014 [vid.2016-02-05]. Dostupné z: <http://www.visual-leutec.ch/index.php/3d-druckverfahren/11-home/10-fdm-schmelzschtichtung>
- [34] CAMINERO, M.A., J.M. CHACÓN, I. GARCÍA-MORENO a G.P. RODRÍGUEZ. Impact damage resistance of 3D printed continuous fibre reinforced thermoplastic composites using fused deposition modelling. *Composites Part B: Engineering*. 2018, 148, 93-103. ISSN 13598368. Dostupné z: [doi:10.1016/j.compositesb.2018.04.054](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.04.054)
- [35] SCHÄTZ, Miroslav, VONDRAČEK, Petr. *Zkoušení polymerů*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1979.
- [36] Directindustry: Impact testing machine 9440 [online]. [cit. 2021-01-11]. Dostupné z: <https://www.directindustry.com/prod/instron/product-18463-583390.html>
- [37] ČSN ISO 148-1 *Kovové materiály – Zkouška rázem v ohybu metodou Charpy – Část 2: Ověřování zkušebních strojů*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.

- [38] DOSHI, Manav, Ameya MAHALE, Suraj KUMAR SINGH, et al. Printing parameters and materials affecting mechanical properties of FDM-3D printed Parts: Perspective and prospects. *Materials Today: Proceedings*. 2022, 50(52), 2269-2275. ISSN 22147853. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2021.10.003
- [39] ASTM D7136/D7136M – 12: Standard Test Method for Measuring the Damage Resistance of a Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite to a Drop-Weight Impact Event. Philadelphia: ASTM International. D7136/D7136M – 12.
- [40] Mechanické vlastnosti polymerů – dynamické rázové namáhání [online]. [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/11.html>
- [41] KIM, Garam, RonaldSterkenburga STERKENBURGA a Waterloo TSUTSUIB. Investigating the effects of fluid intrusion on Nomex® honeycomb sandwich structures with carbon fiber facesheets. 2018. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.08.054>
- [42] KIM, Garam, RonaldSterkenburga STERKENBURGA a Waterloo TSUTSUIB. Investigating the effects of fluid intrusion on Nomex® honeycomb sandwich structures with carbon fiber facesheets. 2018. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.08.054>
- [43] MAJID, Fatima, T. HACHIMI, H. RHANIM a R. RHANIM. Delamination effect on the mechanical behavior of 3D printed polymers. *Frattura ed Integrità Strutturale* [online]. 2023, 17(63), 26-36 [cit. 2023-04-24]. ISSN 1971-8993. Dostupné z: doi:10.3221/IGF-ESIS.63.03

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1: Struktura Boxception [8].....</i>	<i>8</i>
<i>Obr. 2: Struktura voštiny [9]</i>	<i>8</i>
<i>Obr. 3: Zobrazení voštiny [9]</i>	<i>9</i>
<i>Obr. 4: Atomové modely v makroměřítku, vyrobené technologií FDM [11]</i>	<i>10</i>
<i>Obr. 5: Zkouška ohybem [13]</i>	<i>11</i>
<i>Obr. 6: 3D tiskárna Zotrax M200 Plus [14]</i>	<i>12</i>
<i>Obr. 7: Popis vytlačovací hlavy tiskárny Zortrax M200 plus</i>	<i>12</i>
<i>Obr. 8: Rozměr testovaných těles a směr zatížení na padostroji.....</i>	<i>14</i>
<i>Obr. 9: Vizualizace směru pokládání vrstev (červeně) v softwaru Z-Suite</i>	<i>17</i>
<i>Obr. 10: Zwick Roell HIT230F</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 11: Vzorek vložen do padostroje</i>	<i>19</i>
<i>Obr. 12: Grafické zobrazení průměrných hodnot maximálních sil při zatížení padostroje.....</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 13: Grafické zobrazení průměrných hodnot energie při zatížení na padostroji</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 14: Delaminace jednotlivých struktur s průchozími otvory</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 15: Vytlačený objem materiálu u strukturního tělesa dutinami</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 16: Měřicí přístroj Keyence VK-X3000 [17]</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 17: Mikroskopické zobrazení vrstev materiálu při výrobě zkušebních těles</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 18: Trojrozměrné zobrazení povrchu jednotlivých vrstev materiálu</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 19: Rozložení průřezu vrstvy do grafu s naměřenou roztečí mezi vrstvami 0,184 mm</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 20: Rozložení průřezu kulové a kuželové dutiny v grafu.....</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 21: Trojrozměrné zobrazení povrchu jednotlivých vrstev materiálu u kulových dutin</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 22: Trojrozměrné zobrazení kuželových dutin</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 23: Stroj Zwick Roell HIT 25P</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 24: Prostředí softwaru Z-Suite, tisk těles na zkoušku rázové houževnatosti</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 25: Těleso pro rázovou houževnatost vlevo a pro vrubovou houževnatost vpravo.....</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 26: Grafické zobrazení výsledků průměrných hodnot rázové houževnatosti plněných materiálů a materiálu ASA</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 27: Grafické zobrazení výsledků průměrných hodnot vrubové houževnatosti plněných materiálů a materiálu ASA</i>	<i>34</i>

Obr. 28: Strukturální vzorky o rozměru (60×60×15 mm) z plněných materiálů po zatížení na padostroji. Materiál PC-CF vlevo, materiál Nylon AF80 vpravo 35

SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Vlastnosti a provozní teploty 3D tiskárny Zotrax M200 Plus [14]	13
Tab. 2: Parametry tisku udávané výrobcem [15].....	13
Tab. 3: Struktury s průchozími otvory.....	15
Tab. 4: Struktury s vnitřními dutinami	16
Tab. 5: Doba tisku strukturálních těles	17
Tab. 6: Hlavní parametry stroje Zwick Roell HIT230F [16].....	19
Tab. 7: Shrnutí rázové odolnosti struktur	20
Tab. 8: Parametry měřicího přístroje Keyence VK-X3000 [17].....	24
Tab. 9: Základní parametry HIT25P [18].....	29
Tab. 10: Mechanické vlastnosti materiálu Nylon CF15 [15]	29
Tab. 11: Mechanické vlastnosti materiálu XT-CF20 [15]	30
Tab. 12: Mechanické vlastnosti materiálu XT-CF20 [19]	30
Tab. 13: Mechanické vlastnosti materiálu PP-GF30 [20]	30
Tab. 14: Mechanické vlastnosti materiálu PC-CF [19]	31
Tab. 15: Ekonomické vyhodnocení plněných materiálů a materiálu ASA	31
Tab. 16: Shrnutí nastavení teplotních parametrů tisku u jednotlivých materiálů	32
Tab. 13: Zobrazení výsledných hodnot základní statistiky rázové a vrubové houževnatosti	33
Tab. 14: Porovnání zvolených plněných materiálů s materiálem ASA u strukturálních těles s kulovými dutinami	35

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

°	stupeň
°C	stupeň Celsia
X	osa
Y	osa
Z	osa
min	Vyjádření času (minuty)
kJ	Vyjádření energie (kilo-joule)
kg	Vyjádření hmotnosti (kilogram)
MPa	Vyjádření tlaku (mega-pascal)
2D	Vyjádření dvourozměrného zobrazení
3D	Vyjádření třírozměrného zobrazení
FDM	Fused Deposition Modeling
FFF	Fused Filament Fabrication
DLP	Digital Light Procesing
SLA	Stereolitografie
SLS	Selective Laser Sintering
LOM	Laminated Object Manufacturing
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
EBM	Electron Beam Melting
ABS	akrylonitril butadien styren
ASA	akrylonitril-styren-akryl
PC	polycarbonate
PETG	polyethylene terephthalate glycol
PLA	polylactic acid
CPE	co-polyester
PVA	polyvinylalkohol
AF80	nylon s 8% vlákny aramidu
CF15	nylon s 15% vlákny uhlíkových vláken
UV	ultrafialové záření
STL	stereolotografy
CAD	computer-aided design
FEM	Finite element method

CV AUTORA

Jméno a příjmení, titul: Jan Strnad, Ing.
Datum a místo narození:
Adresa:
Telefon:
E-mail: j2_strnad@utb.cz
Státní příslušnost: česká

Vzdělání:

2009 – 2013 Střední průmyslová škola strojnická Olomouc
Maturita v oboru – Počítačová podpora konstruování

2013 – 2016 Bc.
Fakulta technologická, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Studijní program – Procesní inženýrství (B3909)
Studijní obor – Technologická zařízení

2016 – 2018 Ing.
Fakulta technologická, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Studijní program – Procesní inženýrství (N3909)
Studijní obor – Řízení jakosti

2018 – 2023 Ph.D.
Fakulta technologická, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Studijní program – Procesní inženýrství (P3909)
Studijní obor – Nástroje a procesy

Pracovní zkušenosti:

15.11.2017 – 30.6.2018 **Pracovní stáž ve firmě Parzlich s.r.o.**
Pozice: Procesní inženýr

01.01.2019 – 30.06.2020 **UTB ve Zlíně, FT - Ústav výrobního inženýrství**
Pozice: člen řešitelského týmu
Projekt: IGA/FT

01.01.2020 – 30.06.2021 **UTB ve Zlíně, FT - Ústav výrobního inženýrství**
Pozice: člen řešitelského týmu
Projekt: IGA/FT

01.01.2021 – 30.06.2022 **UTB ve Zlíně, FT - Ústav výrobního inženýrství**
Pozice: člen řešitelského týmu
Projekt: IGA/FT

Pedagogická činnost:

TUVI / TK9VK - Výroba a kontrola náradí (2 studijní skupiny)

TUVI / T1NM1 - Nauka o materiálu I (5 studijních skupin)

Konzultant letních stáží - 3

Vedoucí bakalářských prací – 2

Oponent bakalářských prací - 2

Školitel pro matematickou gramotnost (Technologie 3D tisku) - plán rozvoje vzdělávání v ORP Zlín II

Zahraniční stáž:

Óbuda Academy – Hungary, Budapest Polytechnic, Mechanical Engineering Faculty

04.02.2019 - 09.03.2019, CPMNr: CIII-SK-0067-14-1819-M-122869

PUBLIKAČNÍ AKTIVITA AUTORA

- [1] STRNAD, Jan, ŘEZNÍČEK, Martin, JELÍNKOVÁ, Kristýna, JANOŠTÍK, Václav, OVSÍK, Martin. Possibilities of creating a mechanism on FDM 3D printer. *Manufacturing Technology*, 2019, roč. 19, č. 3, s. 508-512. ISSN 1213-2489.
- [2] BÍLEK, Ondřej, MILDE, Radoslav, STRNAD, Jan, ŽALUDEK, Milan, BEDNAŘÍK, Martin. Prediction and Modeling of Roughness in Ball End Milling with Tool-Surface Inclination. *DMS-RE 2019 - Book of Abstracts of the 29th joint seminar*, 2. - 6. 9. 2019, Nová Lesná, Slovakia, 978-80-8208-019-6, 2019,
- [3] CHALUPA, Vlastimil, Michal STANEK, Jiří VANEK, Jan STRNAD a Martin OVSÍK. Design of Dual-Head 3D Printer. *Manufacturing Technology* [online]. [cit. 2023-04-25]. ISSN 12132489. Dostupné z: doi:10.21062/mft.2023.032
- [4] STRNAD, Jan, BÍLEK, Ondřej, ŘEZNÍČEK, Martin, MAŇAS, Lukáš. Possibilities of Creating a Ball Joint Mechanism by FDM Technology. *DMS-RE 2019 - Book of Abstracts of the 29th joint seminar*, 2. - 6. 9. 2019, Nová Lesná, Slovakia, 978-80-8208-019-6, 2019,
- [5] BÍLEK, Ondřej, MILDE, Radoslav, STRNAD, Jan, ŽALUDEK, Milan, BEDNAŘÍK, Martin. Prediction and modeling of roughness in ball end milling with tool-surface inclination. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Bristol : Institute of Physics Publishing Ltd., 2020, s. 1-8. ISSN 1757-8981.
- [6] MARCANÍK, Miroslav, STRNAD, Jan, KUBIŠOVÁ, Milena, PATA, Vladimír. Adaptér ramena robota k uchycení laserového odražeče nebo děliče. 2021.

Ing. Jan Strnad, Ph.D.

Strukturní tělesa s odolností vůči dynamickému zatížení

Structural Test Specimens with Resistance to Dynamic Force Loading

Teze disertační práce

Vydala Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně,
nám. T. G. Masaryka 5555, 760 01 Zlín.

Náklad: vyšlo elektronicky

Sazba: autor

Publikace neprošla jazykovou ani redakční úpravou.

Rok vydání 2023

Pořadí vydání: první

ISBN 978-80-7678-170-2

