

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

DISERTAČNÍ PRÁCE

2020

Ing. Pavel Hanzl

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: P2301 Strojní inženýrství

Studijní obor: 2303V004 Strojírenská technologie-technologie obrábění



DISERTAČNÍ PRÁCE

Topologická optimalizace frézovacího nástroje s využitím výrobní technologie Direct Metal Laser Sintering

Autor: **Ing. Pavel Hanzl**

Školitel: **doc. Ing. Miroslav Zetek, Ph.D**

Měsíc a rok: **8/2020**

Akademický rok 2019/2020

PROHLÁŠENÍ O AUTORSTVÍ

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě písemnou práci ke státní doktorské zkoušce, zpracovanou na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem předloženou práci na téma:

Topologická optimalizace frézovacího nástroje s využitím technologie výroby Direct Metal Laser Sintering

vypracoval samostatně, pod odborným dohledem školitele a s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této práce.

V Plzni dne:.....

.....

Podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji panu doc. Ing. Miroslavu Zetkovi, Ph.D. za odborné vedení práce a paní Ing. Ivaně Zetkové, Ph.D. za kvalifikované rady a vstřícné jednání. Také bych rád poděkoval řešitelskému týmu projektu „FV30149 3D tisk výpočtově optimalizovaných kovových součástí s využitím technologie DMLS“. Jmenovitě bych rád poděkoval Ing. Vojtovi Rulcovi z řešitelského týmu z Advanced Engineerig s.r.o. za poskytnutí odborné součinnosti v oblasti pevnostních analýz.

ANOTACE

AUTOR	Příjmení (včetně titulů) Ing. Hanzl	Jméno Pavel
STUDIJNÍ OBOR	Strojírenská technologie-technologie obrábění	
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) doc. Ing. Zetek, Ph.D.	Jméno Miroslav
PRACOVISTĚ VEDOUcíHO	ZČU – FST - KTO	
DRUH PRÁCE	disertační	
NÁZEV PRÁCE	Topologická optimalizace frézovacího nástroje s využitím výrobní technologie Direct Metal Laser Sintering	

Fakulta: Strojí

Katedra: Strojírenská technologie-technologie obrábění

Rok odevzdání: 2020

Počet stránek (A4 a ekvivalentů A4)

Celkem	104	Textová část	85	Grafická část	19
---------------	-----	---------------------	----	----------------------	----

STRUČNÝ POPIS ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	Cílem disertační práce je identifikovat potenciálně kritické oblasti, které souvisí s odlehčením frézovací hlavy a to hlavně v důsledku vyplnění těla frézy „lattice“ strukturou. V rámci této činnosti byly provedeny experimenty, které objasňují závažnost objevených možných rizik a jejich výstupy jsou v konečné fázi uplatněny pro návrhy odlehčení. Mezi ně byly zařazeny varianty odlehčené frézy „lattice“ strukturou, ale i varianty, které vznikly na základě bionických úprav a rozměrové parametrizace navržené příčky uvnitř obálky frézy.
KLÍČOVÁ SLOVA	Topologická optimalizace, Progresivní frézování, DMLS, Aditivní výroba z kovu

SUMMARY

AUTHOR	Surname (including of title) Ing. Hanzl	First name Pavel
FIELD OF STUDY	Technology of Metal Cutting	
SUPERVISOR	Surname (including of Degrees) doc. Ing. Zetek, Ph.D.	Name Miroslav
INSTITUTION	ZČU – FST - KTO	
TYPE OF WORK	dissertation	
TITLE OF THE WORK	Topological optimization of a milling tool using Direct Metal Laser Sintering	

Faculty: Mechanical Engineering
Department: Technology of Metal Cutting
Submitted in: 2020

Number of pages (A4 and eq. A4)

Total	104	Text part	85	Graphic part	19
--------------	-----	------------------	----	---------------------	----

BRIEF DESCRIPTION OF TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	The aim of the dissertation is to identify potentially critical areas that are related to the relief of the milling head, mainly due to the filling of the cutter body with a "lattice" structure. As part of this activity, experiments were performed that clarify the severity of the identified potential risks and their outputs are ultimately applied to relief proposals. Among them were variants of the lightweight cutter with a "lattice" structure, but also variants that arose on the basis of bionic modifications and dimensional parameterization of the designed partition inside the cutter cover.
KEY WORDS	Topological Optimization, Progressive Milling, DMLS, Metal Additive Manufacturing

KURZFASSUNG

AUTOR	Nachname Ing. Hanzl	Name Pavel
STUDIENFACH	Technology of Metal Cutting	
BETREUER	Nachname doc. Ing. Zetek, Ph.D.	Name Miroslav
INSTITUTION	ZČU – FST - KTO	
ART DER ARBEIT	dissertation	
TITEL	Topologische Optimierung des Fräsers mittels DMLS-Technologie	

Fakultät: Maschinenbau
Kathedern: Technology of Metal Cutting
Abgeben: 2020

ANZAHL VON SEITEN (A4 a eq. A4)

Total	104	Textteile	85	Grafik	19
--------------	-----	------------------	----	---------------	----

KURZBESCHREIBUNG	Ziel der Dissertation ist es, potenziell kritische Bereiche zu identifizieren, die mit der Entlastung des Fräskopfes zusammenhängen, hauptsächlich aufgrund der Füllung des Fräserkörpers mit einer "Gitter" -Struktur. Im Rahmen dieser Aktivität wurden Experimente durchgeführt, die die Schwere der identifizierten potenziellen Risiken verdeutlichen und deren Ergebnisse letztendlich auf Hilfsvorschläge angewendet werden. Darunter befanden sich Varianten des Leichtschneiders mit einer "Gitter" -Struktur, aber auch Varianten, die aufgrund bionischer Modifikationen und Dimensionsparametrisierung der entworfenen Trennwand innerhalb der Fräserabdeckung entstanden sind.
SCHLÜSSELWÖRTER	Topologische Optimierung, Progressive Milling, DMLS, Metal Additive Manufacturing

Obsah

Seznam obrázků	10
Seznam zkratk	13
Glosář	14
Úvod	15
1 Cíle disertační práce	17
2 Topologická optimalizace frézovací hlavy	18
2.1 Současný stav poznání.....	18
2.2 Řezný nástroj a jeho namáhání	20
2.3 Topologická optimalizace	20
2.4 Přístupy topologické optimalizace	21
2.4.1 „Lattice structures“	21
2.4.2 Bionický přístup.....	22
2.5 Výběr topologie pro vstupní experimenty	23
2.6 Mechanické vlastnosti vytištěného materiálu [22]	24
2.7 Konfigurace frézy a řezné podmínky	27
2.7.1 Obráběný materiál	27
2.7.2 Tvar VBD [31]	28
3 Technické provedení s ohledem na technologičnost konstrukce	29
3.1 Provedení frézy do clusterů	29
3.2 Vzpěra.....	32
3.2.1 Výroba a rozměry vzorků	33
3.2.2 Analýza prutů	34
3.2.3 Mechanické zkoušky	36
3.2.4 Vliv orientace	37
3.2.5 Vliv průměru.....	39
3.2.6 Vyhodnocení	39
3.3 Napojení „lattice“ na obálku a její podíl na únosnost vzorků pro tah. zkoušky	40
3.3.1 Geometrie vzorků	40
3.3.2 Tahové zkoušky [35].....	43
3.3.3 Vliv napojení styčnicků na pevnost	47
3.3.4 Vyhodnocení	50
3.4 Tlumící vlastnosti.....	50

3.5	Optimalizace odlehčené obálky pro MAM.....	52
4	Návrh odlehčené frézy.....	55
4.1.1	Výchozí řezné podmínky	55
4.1.2	Simulační výpočet frézy s lattice strukturou.....	56
4.1.3	<i>Simulační výpočet plné frézy</i>	59
4.1.4	Závěrečné zhodnocení analýz	60
4.2	Výroba odlehčené frézy.....	61
4.2.1	Postup obrobení odlehčené frézy.....	62
4.2.2	Postup obrobení odlehčené frézy.....	63
4.3	Experimentální ověření	63
4.3.1	Stroj.....	63
4.3.2	Nástroj a obrobek	64
4.3.3	Naměřené hodnoty	65
4.3.4	Vyhodnocení	69
5	Další variace návrhu odlehčené frézy.....	70
5.1	Varianty návrhů	70
5.2	Vyhodnocení.....	81
5.3	Výroba varianty 4A8	82
	Závěr	86
8	Citovaná literatura	89
	Publikační činnost doktoranda.....	91

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Řezné nástroje od ISCAR vyrobené MAM [19]	19
Obrázek 2 - Výrazné snížení hmotnosti [20]	19
Obrázek 3 – Rovnice D'Alembertova principu	20
Obrázek 4 – Ukázka přístupu Topologické Optimalizace frézovací hlavy	20
Obrázek 5 – Ukázky hybridního přístupu topologické optimalizace [15]	21
Obrázek 6 – Vliv počtu vzpěr na dominující namáhání vzpěr [14] a) Bend-dominated b) Strength-dominated.....	23
Obrázek 7 – Sférická topologie s přítomnými defekty (nahore).....	24
Obrázek 8 – Zvolená BCC topologie pro vstupní experimenty	24
Obrázek 9 - Srovnání mechanických vlastností konvenčně vyrobeného a vytištěného materiálu 1.2709 dle W.Nr.[34]	25
Obrázek 10 – Ukázka popraskání vlivem relaxace vnitřního pnutí [22].....	26
Obrázek 11 – Výhody a omezení různých tvarů VBD [32]	28
Obrázek 12 – Krychlová topologie; a) v kubické mřížce; b) v rotačním uspořádání.....	29
Obrázek 13 – Provedení frézy do clusterů v řezu s jedním vyňatým clusterem; detail napojení styčnicků	30
Obrázek 14 – Schematické 2D rozložení styčnicků ve dvou sousedních clusterech	31
Obrázek 15 – 3D geometrie navržené topologie	31
Obrázek 16 – Řez odlehčené frézy s detailem na přechod mezi clustery.....	32
Obrázek 17 – Zákl.í stavební buňka gyroidní struktury s proměnným průřezem vzpěr ...	32
Obrázek 18 – Tisková úloha se vzorky pod úhlem 38° a 90° s technologickou obálkou; vlevo – celá tištěná sestava; vpravo – detail obálek.....	34
Obrázek 19 – Rozmístění prutů v obálce	34
Obrázek 20 – Největší průhyb u žíhaného prutu s $\varnothing 0.86$ mm, kontrola na průsvit	35
Obrázek 21 – Zbývající pruty jsou přímé, kontrola na průsvit.....	35
Obrázek 22 – Diferenční analýza rozměrů podél osy prutu vytištěného pod úhlem 38° .	35
Obrázek 23 – Diferenciální analýza nakloněného vzorku o úhel 38° a) Diagram odchyly od průměru 1.080 mm; b) vrchní plocha; c) spodní plocha prutu	37
Obrázek 24 – Diferenciální analýza kolmého vzorkua) Diagram odchyly od průměru 1.098 mm; b) vrchní plocha; c) spodní plocha prutu	37
Obrázek 25 – Pracovní diagram tahových zkoušek.....	38
Obrázek 26 – Orientace vrstev k ose prutů; a) 90° vzorky; b) 38°vzorky	38
Obrázek 27 – Vliv průměru vzorků na pevnost a efektivitu vztaženou k průměru modelové předlohy	39
Obrázek 28 – Metalografický výbrus gyroidní vzpěry	40
Obrázek 29 – Geometrie dutého vzorku pro vyplnění jedním typem z testovaných topologií struktur; a) dlouhá verze; b) krátká verze	40
Obrázek 30 – Geometrie prodlouženého dutého vzorku pro vyplnění jedním typem z testovaných topologií struktur	42
Obrázek 31 – Osazení tahového vzorky v testovacím zařízení, měření deformace pomocí extenziometru a systému ARAMIS DIC.....	43
Obrázek 32 – Souhrnné srovnání výsledků statických zkoušek	44
Obrázek 33 – Vliv vnitřní stavby odlehčené struktury na deformaci; a) BCC; b) Gyroid ...	45
Obrázek 34 – Multi-sekční diagram technického prodloužení podél vzorku s BCC topologií; čas 23-46 s.....	46

Obrázek 35 – Multi-sekční diagram technického prodloužení podél vzorku s gyroidní topologií; čas 30,0-45,4 s.....	46
Obrázek 36 – Technické prodloužení odpovídající konečnému stádiu zatěžování, přibližně 0,2 s před destrukcí a) BCC stadium 46 s; b) Gyroid, stadium 44,3 s.....	47
Obrázek 37 – Lokace přerušení v místě napojení "lattice" struktury a tuhé upínací části	48
Obrázek 38 – Uchycené tahové vzorky k platformě	48
Obrázek 39 – Geometrie vzorků	49
Obrázek 40 – Výsledky z tahových zkoušek vlivu místa napojení.....	49
Obrázek 41 – Homogenní napojení porézního jádra na vnitřní část obálky.....	50
Obrázek 42 – a) model odlehčeného vzorku; b) testovací sestava	51
Obrázek 43 – Oscilační odezva na budící sílu.....	51
Obrázek 44 – Vyhnutí hrany tenké stěna svírající „samopodpěrný“ úhel	53
Obrázek 45 – Vada vzniklá přizvednutím hrany tenkostěnného tělesa.....	53
Obrázek 46 – Vada vzniklá přizvednutím hrany tenkostěnného tělesa.....	54
Obrázek 47 – Složky řezných složek, upravený obrázek Sandvik.....	55
Obrázek 48 – Výpočtový model tvořený z 3D a 1D prvků.....	56
Obrázek 49 – Vazby pro rotačně symetrickou úlohou mezi frézou a upínáčem	57
Obrázek 50 – Uvažované zatěžující stavy.....	57
Obrázek 51 – Napětové rozložení v prvním uvažovaném zatěžujícím stavu.....	58
Obrázek 52 – Pole posunů pro první uvažované zatěžující stav	58
Obrázek 53 – Napětové rozložení v prvním zatěžujícím stavu plné frézy	59
Obrázek 54 – Pole posunů pro první zatěžující stav plné frézy	59
Obrázek 55 – Náměry posuvů vztaheny k ose šroubu a zatěžovací stavy.....	60
Obrázek 56 - Výpočetní model vyrobitelnosti navržené tiskové úlohy pro 3D tisk.....	61
Obrázek 57 – Vytištěná fréza s technologickými přídávky pro dodatečné obrobení	62
Obrázek 58 – Obrobené plochy pro upnutí vytištěného polotovaru.....	62
Obrázek 59 – Hrubovací operace čela frézy ze strany VBD	63
Obrázek 60 – DMG MORI DMU 40 eVo linear [4]	64
Obrázek 61 – Upnutý obrobek na dynamometru s vyfrézovaným vybráním pro najetí frézy do průměru 125 mm	64
Obrázek 62 – Umístění a orientace troj-složkového akcelerometru	65
Obrázek 63 - Naměřené oscilační odezvy	65
Obrázek 64 – Frézovací hlava nad obrobkem z IN718.....	66
Obrázek 65 - Složky řezných sil; a) při prvním přejezdu; b) při posledním přejezdu.....	67
Obrázek 66 - Průběh opotřebení řezného břitů.....	67
Obrázek 67 - Drsnost obrobeného povrchu.....	68
Obrázek 62 - Průběh řezné složky Fx	69
Obrázek 69 – Geometrie varianty A; a) řez v rovině XY; b) řez v rovině perforo. příčky ..	70
Obrázek 70 – Pozměněná geometrie příčky napříč klastry.....	71
Obrázek 71 – Pozměněná geometrie příčky napříč klastry.....	71
Obrázek 72 – Napětová pole jednotlivých variant návrhu	72
Obrázek 73 – Legenda k výpisu získaných hodnot.....	73
Obrázek 74 – Legenda k výpisu získaných hodnot.....	74
Obrázek 75 - Podélný řez variantou 4A8; červeně zvýrazněna bionicky optimalizovaná příčka	76
Obrázek 76 - Podélný řez variantou 4B1; červeně zvýrazněna výztuž dutiny frézy	76
Obrázek 77 - Označení jednotlivých 1D výpočetních elementů	77

<i>Obrázek 78 – Výsledný výpočtový model</i>	<i>79</i>
Obrázek 79 - Podélný řez variantou 4C1; červeně zvýrazněna výztuž dutiny frézy	79
Obrázek 80 - Pootočení příčky na základě výsledků optimalizace ze série B	80
Obrázek 81 - Podélný řez variantou 4C2; červeně zvýrazněna výztuž dutiny frézy	80
Obrázek 82 – Přehled všech variant s nejlepšími výsledky	81
Obrázek 83 – Zaznamenaná entita, která indikuje teplejší oblast s vyšší koncentrací tepla, viz červená oblast	82
Obrázek 78 – Napěťové rozložení ve třech uvažovaných zatěžujících stavech	96
Obrázek 79 – Pole posunů pro tři uvažované zatěžující stavy	98

Seznam zkratk

AM – Additive Manufacturing – aditivní výroba

MAM – Metal Additive Manufacturing – aditivní výroba z kovu

DMLS – Direct Metal Laser Sintering

SW - Software

S-N-O – Stroj – Nástroj - Obrobek

HFC – High Feed Cutting

HPC – High Performance Cutting

VBD – Vyměnitelná břitová destička

BCC - Body Centred Cubic – prostorově středěná mřížka

FEA – Finite Element Analysis – analýza metodou konečných prvků

FEM – Finite Element Method – metoda konečných prvků

STL – Stereolithography; Standart Tessellation Language – pozn. způsob vyjádření povrchu modelu

STEP – mezinárodní standard pro výměnu CAD dat

NURBS – Non-uniform Rational Spline - pozn. způsob vyjádření povrchu modelu

TRL – Technology readiness level

MKP – Metoda Konečných Prvků

OT – Optical Tomography – optická tomografie

3D – Three Dimension – tří rozměrný (model)

ČSN – České normy

CAD – Computer-Aided Design – modelování za počítačové podpory

Glosář

Slovo	význam
Additive Manufacturing	Výroba dílů postupným vrstvením materiálu
Direct Metal Laser Sintering	Jedna z výrobních technologií Additive Manufacturing, založená na principu tavení tenkých vrstev kovového práškového substrátu pomocí vysokovýkonného laserového paprsku
High Feed Cutting	Frézovací metoda, která kombinuje malou hloubku řezu (a_p) s vysokou rychlostí posuvu (v_f)
High Performance Cutting	Technologie obrábění, která se zaměřuje na snížení času obrábění a to především díky vylepšeným řezným schopnostem řezného nástroje
Face Centred Cubic	Plošně středěné uspořádání, obvykle krystalografické mřížky
Finite Element Analysis Finite Element Method	Numerická analýza pevnosti součásti pomocí metody konečných prvků
Stereolithography	Standardní vyjádření povrchu pomocí sítě polygonů, obvykle trojúhelníků
Non-uniform Rational Spline	Plocha tvořená ze sítě parametrických křivek
Topologická optimalizace	Proces snižování hmotnosti s ohledem na pevnostní požadavky součásti
Technology Readiness level	Úroveň připravenosti technologie
Optická Tomografie	Optická metoda, která umožňuje zobrazení strukturální stavby v řezech bez fyzického narušení celku

Úvod

Zájem o zvýšení energetické účinnosti roste hlavně v souvislosti se stále se zvyšujícími požadavky na spotřebu elektrické energie a z toho vyplývající neustálé navyšování znečišťování životního prostředí. Průmyslová výroba je jednou z hlavních činností lidské populace, která vyžaduje velké množství energetických zdrojů kvůli transformaci surovin na výrobky. Odvětví obrábění celosvětově spotřebuje 28 % vyprodukované energie. Při bližší analýze se zjistilo, že 56 % energie z tohoto dílu je spotřebováno obráběním, 25% polohováním a zbývajících 19 % je využito pro pomocné funkce a zařízení, která musejí být neustále zapnuta. [1]

Každé zefektivnění výroby má tak vysoký potenciál pro značnou úsporu energie. Vysoká hmotnost frézovacích hlav o velkých průměrech vyžaduje na roztočení vyšší moment a vyžaduje větší příkon hnacích jednotek vřeten. Dalším aspektem je, že proces obrábění je značně nestálý a v čase proměnlivý děj vlivem neustále se měnících záběrových podmínek. Kolísáním řezné síly, změnou třecích podmínek a proměnlivou tuhostí jsou buzené kmity. Ať se jedná o samobuzené nebo vybuzené kmitání, mají vibrace negativní dopad na tvarovou přesnost obráběného povrchu, trvanlivost nástroje a životnost obráběcího stroje.

Děj kmitání nelze nikdy v soustavě S-N-O zcela potlačit, ačkoliv lze tomuto nežádoucímu jevu předejít vhodným nastavením strukturálních vlastností nástroje, stroje a částečně i obrobku. Proces obrábění se ladí tak, aby se dosáhlo akceptovatelné úrovně vibrací s ohledem na produktivitu. Efektivitou řezného procesu se potom rozumí, že všechny zapojené členy jsou na samotné hranici užitných vlastností. Tento stav není v technické praxi často dosažen a potenciál řezné soustavy tak není plně využit. [2]

Řezná síla, coby projev řezného procesu, je základním předpokladem obrábění. Do řezného procesu vstupuje ale celá řada faktorů- geometrie nástroje, řezný odpor, záběrové podmínky a mnoho dalších. Obvyklé přístupy zvyšování tuhosti nástrojů vedou směrem ke zvyšování hmotnosti, což ale výrazně snižuje dynamiku nástroje, nehledě na nutnost nasazení výkonnějších pohonných jednotek, které jsou dražší a méně energeticky výhodné. Proto do celkového řešení nepromlouvá jen cena nástroje, ale také zvyšující se cena obráběcího zařízení a jeho nákladnější provoz. [2]

Moderní přístupy jdou opačnou cestou, je snaha docílit snížení váhy nástroje a zvýšit jeho efektivitu dostupnými materiály a konstrukčními úpravami. V odborné praxi je tento proces snižování hmotnosti s ohledem na funkčnost součásti označován termínem topologická optimalizace a jedna z jejích metod je odlehčení součásti začleněním porézních struktur do koncepce dílu. Pokud je optimalizace provedena správně, tak zpravidla výsledný produkt vykazuje nezvyklou kombinaci užitných vlastností, jako je vysoká pevnost a tuhost doprovázená relativně nízkou hmotností včetně dobré absorpce kmitů.

Do interakce S-N-O vstupují i omezení řezného nástroje a právě výše uvedené vlastnosti mají vysoký potenciál k zefektivnění procesu frézování, jak je podepřeno rešeršním průzkumem provedeným v tezi, která se zaměřuje na optimalizační řešení čelní válcové frézy porézními strukturami nebo optimalizací rozložení hmoty uvnitř nástroje. V konečném důsledku topologicky optimalizovaná fréza může přispět ke zvýšení dynamiky řezného procesu a celkově k odstranění nežádoucí ztráty stability řezného procesu v dané oblasti použití.

Pro samotnou výrobu progresivního nástroje je nutné využít poměrně novou metodu výroby Metal Additive Manufacturing (MAM), která je schopna produkovat tvarově velmi složité díly, kterými optimalizovaná fréza porézními strukturami bezesporu je. Velkou devizou této metody je, že vývojová odnož MAM, technologie Direct Metal Laser Sintering (DMLS), která bude využívána pro výrobu fréz v rámci této práce, je schopna tisknout konstrukční díly z materiálů, jejichž mechanické vlastnosti jsou v mnoha ohledech porovnatelné s tvářenými ekvivalenty daného materiálu. [22]

Pro vývoj a uvedení takto pokročilého nástroje na trh, je potřeba zodpovědět řadu základní a pokročilých otázek, které jsou spojeny s výrobou odlehčené frézy pomocí DMLS technologie tisku. Proto jsou v práci zahrnuty experimenty, které si stanovují za cíl porovnat konkurenceschopnost navrženého konceptu frézy s konvenčně vyrobeným nástrojem.

1 Cíle disertační práce

Hlavním cílem této předkládané práce je vytvořit odlehčenou čelní válcovou frézu, jejímž cílem je zlepšení provozně-technických vlastností v porovnání s konvenčními obráběcími nástroji. Pro samotné odlehčení budou využity prostředky topologické optimalizace běžně využívané v oblasti aditivní výroby z kovu (MAM). Od speciálního přístupu odlehčení se očekává hypoteticky zvýšení dynamiky řezného nástroje s případnou přidanou hodnotou například ve formě zlepšených útlumových vlastností nástroje.

K dosažení cíle je daná problematika rozložena na dílčí experimenty, které analyzují případný vliv zkoumaných prvků na celek topologicky optimalizované frézy. Těmito prvky mohou být míněny i hypotézy, které vzešly z teze disertační práce. Jednou z hypotéz jsou **tlumící účinky „lattice“ struktury a její vhodnost pro implementaci do řezného nástroje.**

Nedílnou součástí hypotézy je **vytvoření vhodné obálky** frézy pro vyplnění odlehčeného jádra a ověření její rentabilní výroby za použití zvolené výrobní technologie a kovového prášku. Dílčím úkolem je nalézt vhodný způsob, jak **implementovat** zvolenou „lattice“ kubické povahy **do rotačních dílů**, v tomto případě do konceptu odlehčené frézy. Výsledky jsou syntézou potom uplatněny na koncový návrh frézy, jehož funkčnost bude ověřena experimentální metodou.

Dále bude analyzován vytištěný **základní stavební element** „lattice“ struktur, rovný prut o válcovém průřezu. Přičemž analýzy budou zaměřeny na odchylku v geometrických a mechanických vlastnostech od modelové předlohy. Provedeny budou i **mechanické zkoušky**, které by mohly přispět k pochopení, jakým způsobem zvolená topologie „lattice“ ovlivní výsledné chování zkušebních vzorků.

K získání koncového návrhu odlehčené frézy budou využity experimentální metody nebo metody založené na výpočetních analýzách, jako je pevnostní analýzy metodou konečných prvků (MKP/FEA). Přičemž zařazení výpočetních analýz při vývoji frézy značně urychlí proces zlepšování užitečných vlastností frézy.

Vývoj odlehčené frézy je těsně spjat s řešením projektu FV 30149 „3D tisk výpočtově optimalizovaných kovových součástí s využitím technologie DMLS“ Projekt je realizován v období 4/2018 až 12/2020 a na jeho řešení se podílejí firmy Advanced Engineering s.r.o. z Brna a UPa v Pardubicích. Hlavní motivací projektu je zvýšení TRL aditivní výroby a ověření aplikovatelnosti prutových struktur.

2 Topologická optimalizace frézovací hlavy

2.1 Současný stav poznání

Obecné trendy v produktivním obrábění se nesou ve smyslu snižování vibrací a zvyšování dynamiky řezného procesu, což vede k lepší stabilitě a efektivitě řezného procesu. Praktické rady, jak dosáhnout snížení vibrací, jsou uvedeny v bodech níže [16]:

- výběr nejmenšího nebo nejlehčího těla frézy,
- zvolení menšího nastavení úhlu hlavního řezného břitu, nebo zvolení kruhové řezné destičky,
- použití hrubozubé frézy s pozitivní geometrií řezného klínu,
- použití frézy s nepravidelnou roztečí řezných hran na obvodu frézy,
- zvolení těla frézy s vnitřními kanálky chlazení.

Zejména pro odlehčení jsou porézní struktury zajímavým řešením, jak docílit maximálního odlehčení. Často se používají jako odlehčená výplň dílů v místech s výskytem nižší hustoty napětového pole. Běžná inspirace odlehčených struktur se nachází v přírodě. Ovšem průmyslová výroba a jejich konkrétní návrh byl do nedávna velmi obtížný a zdlouhavý. Až s nástupem aditivní technologie výroby z kovu se objevil efektivní způsob, jak tyto začleněné struktury do dílu vyrobit. Za předpokladu, že tisknutý díl je vůči platformě orientován ve vhodném samonosném směru. Pokud jsou topologické úpravy provedeny správně v souvislosti s výrobou 3D tiskem, tak dokončená vrstva dílu poskytuje dostatečnou oporu vrstvě na ní navazující. [17]

Významnými hráči v aditivní výrobě frézovacích systémů jsou Komet a ISCAR Group, kteří používají AM technologii k výrobě nových inovativních řezných nástrojů, viz obrázky 1 a 2. Ta umožňuje kromě rychlejší výroby speciálních nástrojů také vytvářet mnohem složitější tvary, a především začlenit komplikované chladicí kanálky, které by konvenčními metodami byly velmi těžce vyrobitelné. Profil a tvar chladicích kanálků je obzvláště klíčový u řezných nástrojů určených pro HPC (HFC). Na rozdíl od jiných postupů výroby lze snížit celkové náklady na produkci a silně zefektivnit výrobu. [18]



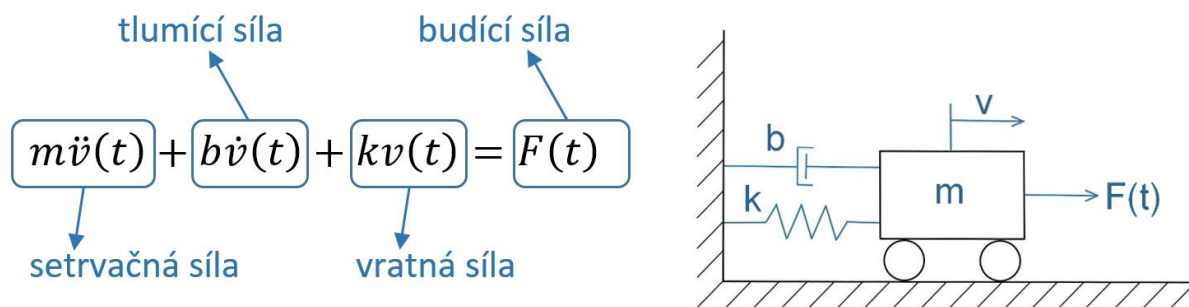
Obrázek 1 - Řezné nástroje od ISCAR vyrobené MAM [19]



Obrázek 2 - Výrazné snížení hmotnosti [20]

2.2 Řezný nástroj a jeho namáhání

Z průzkumu zaměřeného na možnosti topologické optimalizace frézovacího nástroje, který byl proveden v rámci disertační práce, a z teorie obrábění je patrné, že nástroj je komplexně dynamicky namáhán. Proto kromě silových účinků, s kterými se počítá u statických úloh, nabývají na důležitosti setrvačné a tlumící účinky, jak vyplývá z rovnice D'Alembertova principu. Lehké porézní struktury jsou v tomto aspektu stěžejní, jelikož mají přímý vliv na hmotnost frézy, tedy na setrvačné účinky, a kvůli příhradové koncepci budou změněny i útlumové charakteristiky frézy.

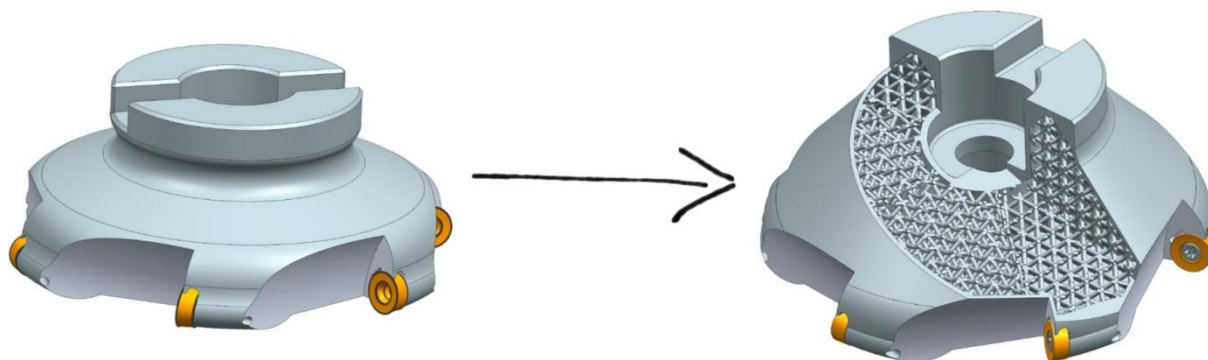


Obrázek 3 – Rovnice D'Alembertova principu

2.3 Topologická optimalizace

V práci se opakovaně zmiňuje termín Topologická Optimalizace (TO). Je to termín označující **systematický proces snižování hmotnosti s ohledem na zatěžující podmínky součásti**. Jelikož zvýšení míry odlehčení součásti se dostává až za podpory složitých algoritmů, jež v sobě zahrnují složité matematické simulace, může být definice TO formulována následovně:

„Topologická optimalizace je matematický přístup aplikovaný pro omezené množství materiálu za účelem získání jeho optimálního rozprostření v dané oblasti.“ [23]



Obrázek 4 – Ukázka přístupu Topologické Optimalizace frézovací hlavy

V kontextu s optimalizací frézovacího nástroje se tedy jedná o proces snížení hmotnosti, aniž by výrazně poklesla tuhost nástroje. Případná nižší tuhost byla kompenzována jinou přidanou hodnotou, jako je schopnost zvýšeného útlumu vibrací. Avšak jak prokázali na vyložení kulové frézy ve svém výzkumu Miyaguchi a spol. [6], nižší tuhost nástroje nemusí být vždy na škodu. Obecně tlumení rázů a vibrací při obrábění je hodnoceno jako všeobecně prospěšné. [7][8]

Snížení hmotnosti má přímý dopad na zvýšení dynamiky řezného procesu a snížení nároků na příkon pohonných jednotek vřeten. Pokud se potvrdí předpoklad sníženého prostupu rázů do vřeten strojů vlivem topologických úprav frézy, znamenalo by to prodloužení servisních intervalů a úměrně tomu by se snížily provozní náklady na údržbu obráběcího centra.

2.4 Přístupy topologické optimalizace

Rozlišujeme dva přístupy topologické optimalizace ve spojitosti s aditivní výrobou z kovu (MAM). Bionický přístup, jehož výstupem jsou tvary připomínající organické struktury, které jsou vytvářeny za podpory složitých matematických výpočtů. Zatímco druhým přístupem jsou odlehčené struktury, které jsou také označovány anglickým výrazem „Lattice Structures“. Na obrázku 5 je potom funkční ukázka hybridní optimalizace. Kdy díl byl nejdříve bionicky optimalizován v SW Inspire a poté ještě odlehčen „lattice“ strukturou v SW OptiStruct. [15]



Obrázek 5 – Ukázky hybridního přístupu topologické optimalizace [15]

2.4.1 „Lattice structures“

„Cellular Lattice“ struktury jsou jedním z efektivních způsobů ke zlepšení rovnováhy mezi hmotností a tuhostí. Tyto struktury nalézají uplatnění hlavně ve vesmírném a leteckém průmyslu. Jejich oblast se nadále rozšiřuje do dalších průmyslových odvětví a přinášejí průlom v navrhování dílů. Lattice struktury lze dobře přizpůsobovat multifunkčním požadavkům, zejména tam, kde je potřeba vyplnit prostor. [14] [27] Tyto prostory lze funkčně vyplnit v závislosti na podmínkách zatížení změnou geometrie topologie základní buňky a její orientace. Posledním prvkem, jenž ovlivňuje konečné vlastnosti, je materiál, ze kterého je struktura vytvořena.

Odlehčené konstrukce jsou v zájmu vědy již staletí. Inspirace je často hledána v přírodních úkazech, jako je stavba kostí nebo atomová mřížka grafenu. V podstatě se vždy jedná o periodicky se opakující malou základní buňku definující geometrii struktury, jež je z makroskopického pohledu homogenní. Jako velmi vhodným nástrojem pro výrobu

odlehčených struktur ze škály kovových materiálů se jeví aditivní technologie založená na principu Power Bed. [28]

Aditivní výroba z kovu může být tedy prostředkem, jak lze vyrábět konstrukční díly s „navrženým“ modulem pružnosti, lokálně proměnnou hustotou, nebo kontrolovanou vnitřní stavbou odlehčené struktury. Což by značně změnilo a rozšířilo postupy v konstruování pokročilých komponent. [28]

V současné době je ovšem aditivní výroba z pohledu leteckého a kosmického průmyslu na nízké úrovni připravenosti (TRL), jelikož na tyto díly jsou kladeny vysoké požadavky na kvalitu a především spolehlivost. Nízká úroveň TRL je zejména způsobena nejistotami v oblasti výsledných mechanických vlastností aditivně vyrobených dílů. Tyto nejistoty nelze zcela odstranit ani z návrhové fáze produktu, jelikož standardní výpočtové a simulační nástroje nejsou schopny postihnout všechny vlivy na kvalitu tištěného dílu. [28]

Přestože výroba odlehčených struktur aditivními technologiemi byla již popsána některými autory, jejich funkční vlastnosti nebyly doposud dostatečně prozkoumány. Navíc úspěšné vyrobení prutových struktur závisí na geometrii a orientaci základní stavební buňky. Některé pruty odlehčené topologie by se mohly více či méně rozměrově odchylovat, nebo by jejich mechanické vlastnosti byly značně odlišné od prutu dle modelové předlohy. [28]

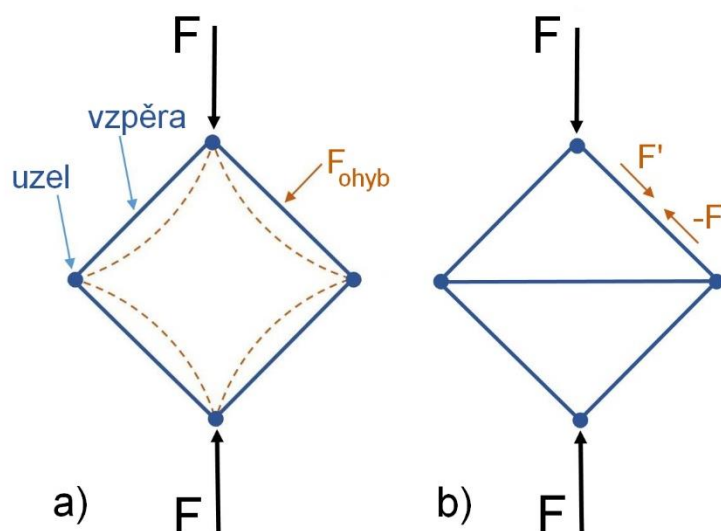
Tato práce se zaměřuje na odlehčené „lattice“ struktury, a to i z toho důvodu, že se jedná o rozsáhlý komplex příčnicků, v němž se má dodaná energie šanci transformovat. Existuje nepřeberné množství druhů topologií a je třeba pro vstupní experimenty vytipovat topologii, od které se budou vyvíjet další experimenty a zpřesnění.

2.4.2 Bionický přístup

Bionický přístup je podmíněný podporou výpočetních algoritmů, které obvykle na základě rozložení napětí v dílu navrhnou co nejefektivnější rozložení hmoty. Tento přístup je také okrajově zahrnut do výstupů disertační práce. Do této kategorie lze taktéž zařadit rozměrovou parametrizaci, která na základě citlivostní analýzy mění vybraný parametr tak, aby podle zadaných podmínek bylo dosaženo maximální funkčnosti omezeného množství materiálu. Více je této problematice věnována kapitola: *5 Další variace návrhu odlehčené frézy*.

2.5 Výběr topologie pro vstupní experimenty

Vnější zatížení nejčastěji generuje ve vzpěrách porézních topologií ohybové nebo axiální namáhání. Na obrázku 6a je znázorněna 2D příhradová struktura, u které vnější silový účinek vyvolává na její vzpěry ohybové zatížení. V tomto případě se jedná o strukturu označovanou jako Bend-dominated. Tyto struktury nedosahují takové efektivity únosnosti vztažené k jednotce hmotnosti, jako v případě Strength-dominated struktur, ve kterých je vnější zátěž transformována na tahové či tlakové zatížení nosníků. [16]



Obrázek 6 – Vliv počtu vzpěr na dominující namáhání vzpěr [14]
a) Bend-dominated b) Strength-dominated

Vliv počtu vzpěr na převládající napětí ve vzpěrách pro 3D příhradové konstrukce popisuje rozšířené Maxwellovo pravidlo [3]. Deshpande a spol. [11] analyzovali tuto rovnici s ohledem na druh zatížení a stanovili, že pokud má struktura efektivně snášet jednosložkové napětí je potřeba, aby měla topologie 6 vzpěr na uzel. V případě kombinovaného zatížení je maximální počet vzpěr určen na 12. Vyšší počet vzpěr je kontraproduktivní, jelikož se ztenčí průměr vzpěry a tím je oslabena konstrukce struktury. [11] Výsledky korelují se závěry Favre a spol. [13], kteří k dané problematice přistupovali za podpory pevnostních analýz metodou konečných prvků.

$$b - 3j + 6 = s - m \quad (1)$$

b....počet vzpěr

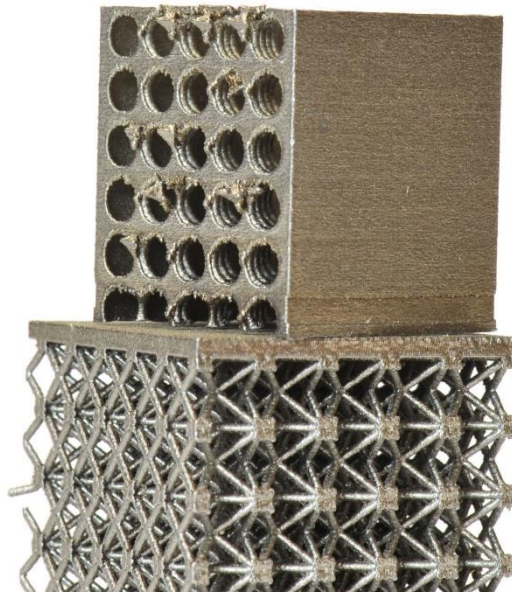
j.....počet kloubů bez třecích účinků

s.....stavy napětí

m...mechanismy

Kritéria výběru

Pro výběr vhodné topologie byla stanovena kritéria. Pro samotnou výrobu aditivní technologií musí zvolená struktura vykazovat samonosnou konstrukci tak, aby její výroba nevyžadovala přidavné podpěrné struktury, jelikož odstranění těchto struktur z „lattice“ jádra je nemožné či velmi obtížné. Z tohoto důvodu je nevyhovující například sférická topologie na obrázku 7, jejíž výroba MAM byla doprovázena defekty. Tyto přítomné defekty zeslabují nosnost celé konstrukce.

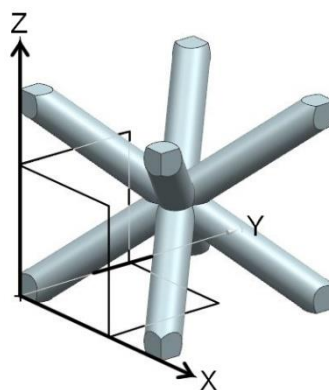


Obrázek 7 – Sférická topologie s přítomnými defekty (nahore)

Pokud se přihlídně i k počtu vzpěr na uzel dle výše uvedeného Maxwellova pravidla a vezme se v potaz tvrzení, že Bend-dominated mají zvýšené předpoklady pro schopnost izolace vibrací. [11][9] Je stanoven počet vzpěr na 8-10, spíš blíže k menšímu počtu.

V neposlední řadě jednoduchost a nízké požadavky na výpočetní výkon pro „vykreslení“ vybrané odlehčené topologie jsou také vítané. Je jimi významně snížena časová náročnost pro modelování návrhu a provedení případných změn, které vyplynou z dodatečných optimalizací konstrukce frézy. Je nutné ovšem podotknout, že náklady spojené s časem stráveným u konstrukce frézy mohou být vzhledem k užitku frézy v konečném důsledku minoritní.

Na základě výše zmíněných kritérií byla zvolena pro vstupní experimenty BCC topologie, která je vyobrazená na obrázku 8. Splňuje všechna kritéria a má 8 vzpěr na uzel. Tato geometrie bude tedy výchozím stavem.



Obrázek 8 – Zvolená BCC topologie pro vstupní experimenty

2.6 Mechanické vlastnosti vytištěného materiálu [22]

Obsáhlé mechanické zkoušky tahem na různých tvarech a rozměrech vzorků provedla a analyzovala ve své disertační práci Ing. Ivana Zetková, Ph.D. Zpracovávala rovněž vlivy kvality vstupního materiálu a následného tepelného zpracování na mechanické vlastnosti.

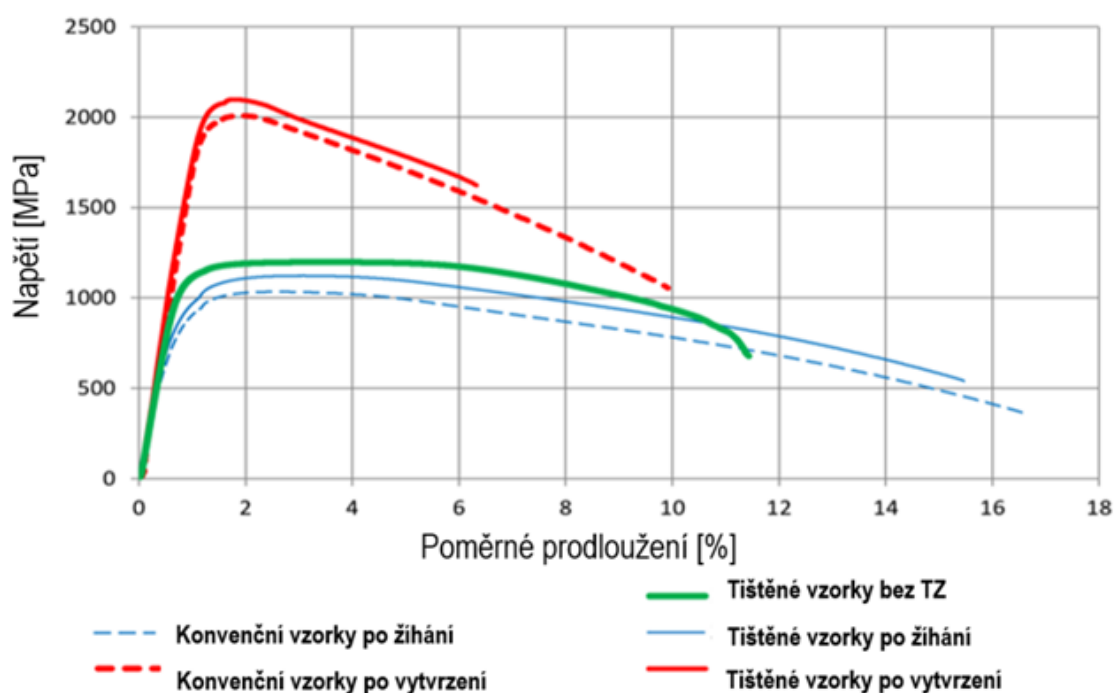
Z výsledků plyne, že rozpouštěcí žihání používané pro snížení pnutí snižuje mechanické vlastnosti tištěné oceli. Především mez kluzu může být nižší, než deklaruje ve svých materiálových datasheetech výrobce. Byl také pozorován do určité míry vliv velikosti vzorku na mechanické vlastnosti. Vyšší hodnoty meze kluzu a pevnosti měly vzorky s menším průměrem krčku ($\varnothing 4$ mm) než větší vzorky ($\varnothing 10$ mm). Mírný vliv orientace se projevil pouze pro mez pevnosti u série s menším průměrem. Mechanické vlastnosti, obzvláště rychlost porušení, byly u obdélníkového průřezu ovlivněny přítomností vměstků a pórů v tištěném materiálu.

Porovnání s konvenčním materiálem bylo nejednoznačné. Jelikož větší vzorky z konvenčního materiálu vykazovaly nepatrně lepší mechanické vlastnosti. U těchto vzorků se projevil pouze vliv průřezu u meze kluzu, kde pro změnu nižší hodnoty byly naměřeny u menších vzorků. Meze pevnosti byly jinak totožné pro obě velikosti.

Naproti tomu, co uvádí výrobce zařízení, se potvrdila skutečnost, že výrobcem doporučené tepelné zpracování má vliv na mechanické vlastnosti, a především snižuje mez kluzu. To bylo potvrzeno u několika testovacích sad.

Vliv orientace tisku na mechanické vlastnosti se projevil zejména u tepelně vytvrzených vzorků, kdy největší vzorky vytištěné ve směru X (tzn. ve vodorovné poloze) měly vyšší pevnost (2020-2040 MPa) oproti vzorkům tištěným pod úhlem 45° a ve směru Z (1960-1980 MPa). Proto díly tištěné pod úhlem budou praskat dříve než součást tištěná vodorovně, která by se teprve začala výrazně plasticky deformovat, jelikož mez kluzu a pevnosti jsou si u tohoto materiálu velikostí velmi blízké.

Kvůli tvarové stálosti, vyšší houževnatosti a dynamické povaze procesu frézování bude tělo odlehčeného rezného nástroje ošetřeno rozpouštěcím žiháním. Na obrázku 9 je převzat graf porovnání mechanických vlastností konvenčního materiálu W.Nr. 1.2709 v podobě VACO 180 a tištěného materiálu obchodně označeného jako EOS MaragingSteel MS1.



Obrázek 9 - Srovnání mechanických vlastností konvenčně vyrobeného a vytištěného materiálu 1.2709 dle W.Nr.[34]

Tyto výsledky jsou obzvláště důležité pro aplikace, kde je nutné deklarovat určité mechanické vlastnosti. Na mechanické vlastnosti tenkostěnných dílů má vliv zejména čistota vstupního materiálu. Nečistoty v recyklovaném prášku totiž způsobují iniciaci trhlin a následné porušení materiálu. V případě sériové výroby odlehčené frézy nebude ale možné vždy tisknout z nového kovového prášku, a to z důvodu ekonomické udržitelnosti. Z tohoto důvodu budou i jednotlivé prototypové odlehčené frézy tištěny z přesévaného prášku.

Regenerace a rozložení částic kovového prášku

Na dvou tahových vzorcích, jejichž přetržené části nebyly symetrické, porušení vzorků nastalo ve zkušební části s vyššími souřadnicemi. Pravděpodobnou příčinou byly nečistoty, které se nacházely převážně v kratší horní části vzorku (s vyšší souřadnicí Z). Tento rozdíl v množství vměstků potvrzuje nerovnoměrnost rozložení prášku v zásobníku stroje. V nižších polohách zásobníku obsahuje prášek výrazně větší podíl menších částic, než je tomu u povrchových vrstev zásobníku.

Dále byl popsán vznik rozdílných částic oproti původnímu novému prášku. Tyto částice byly charakteristické svým hladkým povrchem. Jejich vznik byl doprovodným jevem tavení kovového lože energetickým laserovým paprskem. Tyto částice prošly přes síto během regenerace použitého prášku a byly spékány v následujících tiscích. Bohužel ne vždy došlo k jejich spečení, což se projevilo ve struktuře materiálu jako vměstek. Proto se často stávaly iniciátorem vzniku trhliny vedoucí k lomu. Z těchto důvodů má kvalita prášku vliv na kvalitu tisku.

Tepelné zpracování

Tepelné zpracování je pro takto velký tenkostěnný díl nezbytné, jelikož se během výroby do materiálu zanesou veliké množství vnitřního pnutí. Následkem jeho relaxace by byly deformace nebo dokonce trhliny. Ukázka popraskání dílu vlivem relaxace vnitřního pnutí je na obrázku 10.



Obrázek 10 – Ukázka popraskání vlivem relaxace vnitřního pnutí [22]

2.7 Konfigurace frézy a řezné podmínky

Konfigurace frézy byla navržena s ohledem na předchozí zkušenosti, které jsou nápomocné při výběru geometrie, materiálu VBD a řezných podmínek. Jelikož platí, že každá konfigurace má svoje klady a zápory, je nutné tyto atributy zvážit a nalézt přijatelný kompromis. Teoretická část je věnována shrnutí výchozího nastavení řezných podmínek a úhlu nastavení řezných destiček pro obrábění Inconelu 718.

2.7.1 Obráběný materiál

Inconel 718 patří do třídy materiálů ISO S, což je skupina žáruvzdorných superslitin, která obsahuje slitiny na bázi kobaltu, niklu a titanu. Hlavními znaky této slitiny je vysoká žárupevnost, únavová pevnost a rozměrová stálost. Tato slitina se řadí mezi těžce obrobitelné materiály, jež konvenční metody těžce obrábějí kvůli kombinaci nepříznivých mechanickým vlastností. Jelikož dochází po oddělení třísky ke zpevňování obrobené vrstvy, která se současně plasticky deformuje. Tento jev je patrnější, pokud je použita nízká hloubka řezu. Proto se doporučuje minimalizovat počet přejezdů s využitím tvrdého nástroje. Veliký význam má tepelná úprava obrobku. Kdy normalizační žíhání přispívá k lepší obrobitelnosti. [10]

Obecně se u této slitiny vyskytuje jev nalepování na břit a následná tvorba nárůstku na břitu nástroje, jež je použit pro její obrobení. Teplo generované při obrábění je z velké části předané řeznému nástroji, což je následkem nízké tepelné vodivosti slitiny. Ve slitině jsou také přítomné částice karbidů, což zvyšuje účinnost abrazivního otěru. Tyto jevy spolu s vysokou pevností jsou hlavními důvody velmi obtížné obrobitelnosti a nízké trvanlivosti břitu.

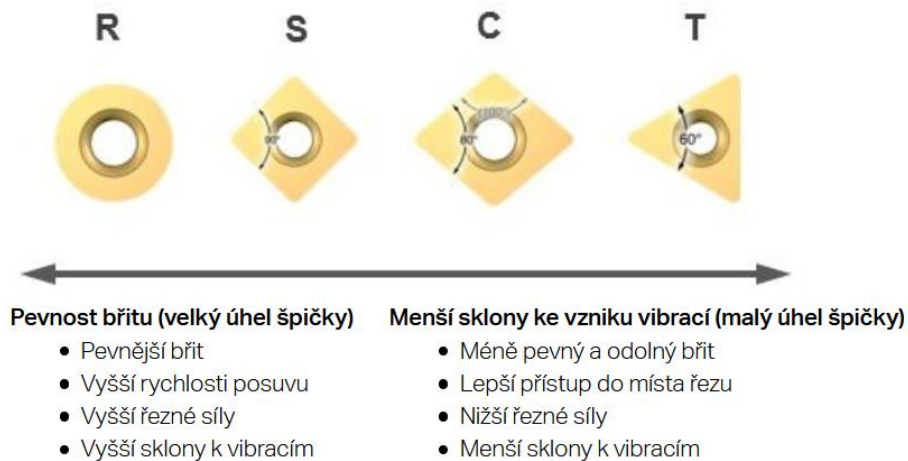
Při zahřátí slitiny na vysokou teplotu se tvoří na povrchu stabilní oxidický povlak, jež chrání materiál a umožňuje použití této slitiny při vysokých teplotách, tlacích a provoz v agresivním prostředí. Největší zastoupení ve slitině má nikl a chrom. Klíčovým prvkem je niob, jenž tvoří s niklem sloučeninu Ni_3Nb , která zvyšuje teplotní odolnost a zvyšuje rozměrovou stabilitu. Mechanické vlastnosti inconelové slitiny jsou v tabulce 1. [29] [30]

Tabulka 1 - Mechanické vlastnosti Inconelu 718 [30]

Vlastnost	Hodnota
Mez pevnosti v tahu	1310 MPa
Mez kluzu v tahu	1110 MPa
Tvrlost	36 HRC
Hustota	8,19 g/cm ³
Teplota tavení	1260-1336 °C
Tepelná vodivost	11,2 W/mK
Použitelnost	-280°C ~ +800°C

2.7.2 Tvar VBD [31]

Tvar zvolené VBD má výrazný vliv na výsledek obrábění, jelikož jeho tvar ovlivňuje pevnost ostří. Destičky s tuhými břity mají obvykle omezený přístup do řezu, proto mají jednotlivé tvary svá omezení. Pokud je tedy požadován dobrý přístup do místa řezu, má to za následek snížení pevnosti řezné hrany. [32]



Obrázek 11 – Výhody a omezení různých tvarů VBD [32]

Pevnost ostří se zvyšuje s vyšším úhlem špičky, což umožňuje zvýšit posuvovou rychlost a břit je schopen odolat vyšším řezným silám. Na druhou stranu toto řešení má ale sklony ke vzniku vibrací. Nižší hodnoty úhlu špičky mají opačný efekt.

Kruhové destičky proto vynikají pevností svojí hrany a při vyšší hloubce řezu mají vyšší odolnost v porovnání s jinými typy VBD. To je předurčuje pro obrábění těžce obrobitelných materiálů. Jejich další výhodou je vysoký počet břitů na jeden kus VBD. [32][5]

Z těchto důvodů byla pro experimenty zvolena kruhová destička od zaběhnutého japonského výrobce OSG Corporation s přesným označením PHOENIX RPTH1204M8EN-SM XC5035. Substrát destičky je tvořen slinutým karbidem. Průměr destičky je 12 mm při tloušťce 4,76 mm. Úhel hřbetu je 11°, přičemž maximální povolené natočení destičky je 8°. Sestavení CVD povlaku VBD tvoří nitrid titanu (TiN) + Ti(CN) + Al₂O₃ + Ti(BN) o celkové tloušťce 6 μm. Tento povlak snáší dobře vyšší pracovní teploty dosahující až 800°C. Destička dosahuje tvrdosti 89,3 HRA.

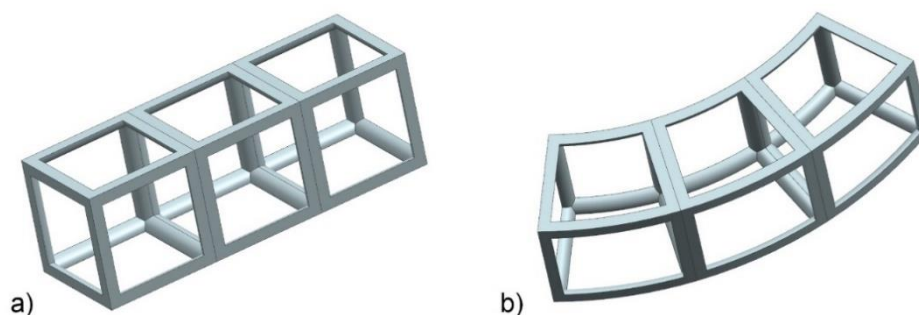
3 Technické provedení s ohledem na technologičnost konstrukce¹

V této kapitole jsou zastoupeny experimenty, které objasňují rozsah a závažnost rizik spojených s aditivní výrobou z kovu a implementace „lattice“ struktur do těla frézy. Mezi sledovanými jsou odchylky vzpěr lattice struktur od tvaru modelové předlohy, vliv způsobu napojení lattice v kritických oblastech, nebo změna mechanických vlastností kovového substrátu po tepelném zpracování pro snížení pnutí. Konstrukční řešení frézy jsou poté navržena tak, aby nejvíce reflektovala výsledky z provedených experimentů.

3.1 Provedení frézy do clusterů

Fréza je rotačního charakteru zatímco „lattice“ struktury jsou kubické povahy. Pokusy o ohnutí kubiky do poloměru měly za následek ohnutí jinak přímých styčniců (vzpěr) struktury, anebo jejich rozcházení v uzlech. V obou případech lze proto očekávat zhoršení celkové únosnosti takto modifikované struktury.

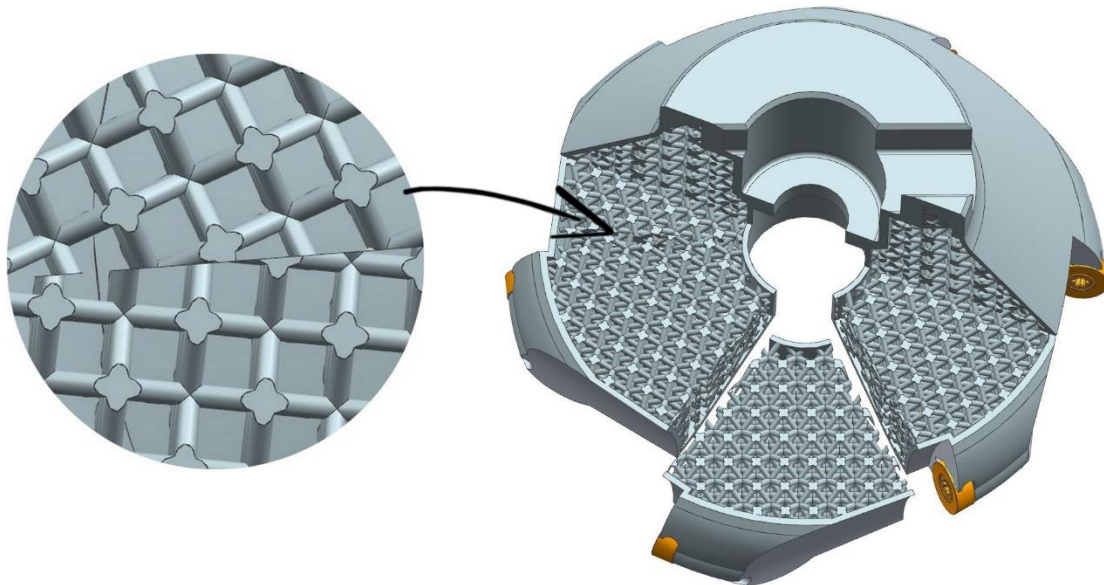
Na obrázku 12 je znázorněna změna kubické topologie do rotačního uspořádání. Modifikace topologie má vliv na změnu tvaru styčniců z přímky na poloměr. Tím se ale změní napěťové poměry ve styčnicích, kdy v případě zatížení podél osy styčniců převládá ohybové napětí nad tahem či tlakem.



Obrázek 12 – Krychlová topologie; a) v kubické mřížce; b) v rotačním uspořádání

Proto je snaha zachovat přímost styčniců v topologii struktury. Jako jedno z řešení se nabízí rozdělit frézu na clustery. Kdy každý cluster roznáší zatížení z jednoho lůžka do těla frézy. Ilustrace rozdělení frézy na clustery je na obrázku 13. Tento koncept se sebou ovšem přináší určitá úskalí, která bude nutné řešit.

¹ Technologičnost konstrukce je v zásadě provedení, které umožňuje výrobu s vynaložením co nejmenší pracovní, respektive nákladů na výrobu
[http://www.kts.tul.cz/content/files/podklady/6_20180101_Technologicnost_konstrukci.pdf]



Obrázek 13 – Provedení frézy do clusterů v řezu s jedním vyňatým clusterem; detail napojení styčnicků

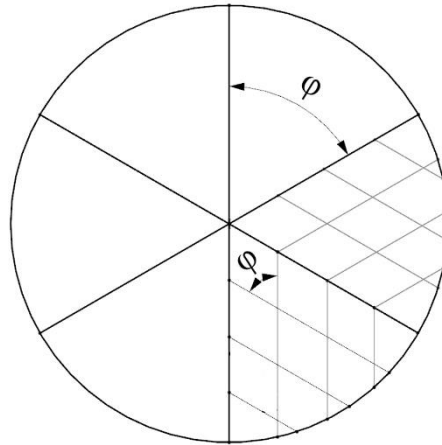
Způsob napojení tak, aby byl zaručen plynulý tok napětí z jednoho segmentu clusteru do dalšího, je jedním z problematických míst. Problematická partie je znázorněna v detailu na obrázku 10, na kterém je vidět, že vzpěry z jednoho clusteru nenavazují na vzpěry sousedícího clusteru. Pokud se mezi clustery vloží plná příčka, je zaručená vyrobitelnost, avšak toto řešení nabourá celistvost „lattice“ jádra, což může přímo ovlivnit výsledné vlastnosti frézy, jako je schopnost zvýšeného útlumu vibrací.

Aby vzpěry z jednoho clusteru navazovaly na vzpěry sousedícího clusteru, byla pro tento účel navržena topologie, která vycházela z kubické buňky BCC. Návrh se odvíjel od počtu potřebných clusterů. Ten je pevně dán zvoleným počtem vyměnitelných břitových destiček. Koncept frézy má 6 destiček, proto pro každý cluster náleží výseč o úhlu 60° , jak vyplývá z dělení 360° počtem VBD. Pokud se počet clusterů změní na 8, změní se úhel výseče na 45° . Je to dáno empirickým vztahem:

$$\varphi = \frac{360^\circ}{n} \quad (2)$$

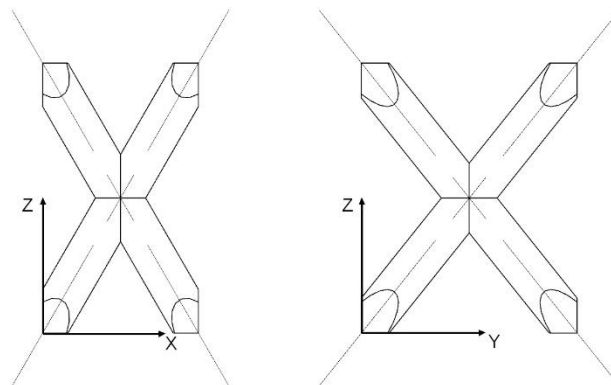
*Kde: φ ...úhel výseče
 n ...počet clusterů na plný kruh*

Tomuto úhlu výseče je nutné přizpůsobit délky hlavních stran BCC topologie tak, aby bylo docíleno rozložení vzpěr dle pravidel uvedených na obrázku 14, na kterém je uveden schematický pohled na uspořádání vzpěr této topologie ve dvou sousedních clusterech. Kopírováním 1 clusteru dle této koncepce do kruhového pole vznikne plynulý přechod napojení. Výška základní buňky (délka ve směru osy z) je poté dána potřebami výrobního procesu či pevnostními požadavky tak, aby úhel styčnicků v základní buňce korespondovalo co nejbližší směru očekávaného zatížení.



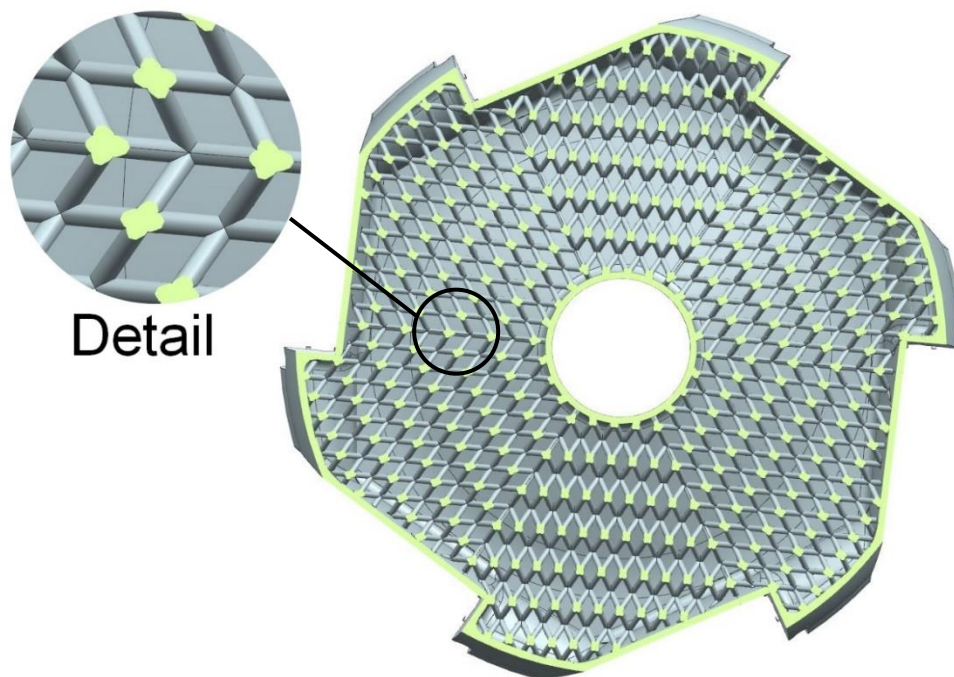
Obrázek 14 – Schematické 2D rozložení styčníků ve dvou sousedních clusterech, rovina XY

Podle této koncepce byla pozměněna původně krychlová základní buňka BCC topologie na kubiku kvádrové koncepce. Změna poměru délek základny buňky je na obrázku 15.



Obrázek 15 – 3D geometrie navržené topologie

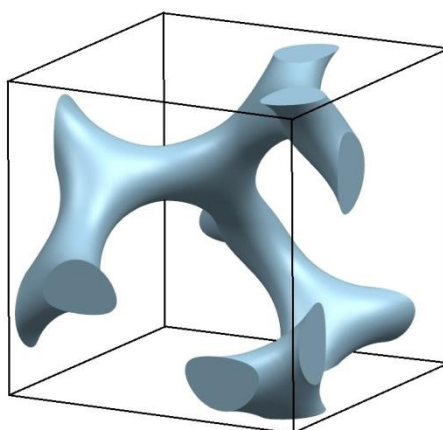
Tato pravidelná porézní struktura byla vložena do vytvořené obálky tělesa frézy, která měla tloušťku 2 mm. Oblast lůžek a unášecích kamenů byla zesílena, jelikož tyto oblasti vyžadují maximální tuhost. Rozhraní clusterů bylo umístěno před lůžko tak, aby za VBD byla co možná největší část porézního clusteru, která pohlcuje rázy a generované napětí. Zvolené seskupení s detailem na přechod mezi porézní částí clusterů je na obrázku 16.



Obrázek 16 – Řez odlehčené frézy s detailem na přechod mezi clustery

3.2 Vzpěra

Základní buňku lattice struktur zpravidla tvoří kruhové pruty. Existují i některé výjimky, jako je gyroidní struktura, jejíž pruty mají složitý prostorový tvar, viz obrázek 17. Pruty jsou tedy nejzákladnějším stavebním prvkem odlehčených struktur. V této části se analýza mechanických vlastností soustřeďuje jen na kruhové pruty s konstantním průřezem. Byly pozorovány rozdíly v geometrii mezi modelovou CAD předlohou a vyrobenými základními elementy struktury, pruty.



Obrázek 17 – Základní stavební buňka gyroidní struktury s proměnným průřezem vzpěr [34]

Aby bylo možné tyto struktury funkčně začleňovat do průmyslových dílů, je nezbytné umět predikovat výsledné mechanické vlastnosti vyrobených těles, a to zejména z hlediska materiálových, tvarových a mechanických vlastností. To je obzvláště složité, jelikož DMLS proces definuje velká kvanta parametrů, které mají přímý dopad na termo-fyzikální děje probíhající během samotné výroby dílu. V konečném důsledku kvalitu a přesnost tištěného

dílu ovlivňuje zejména nastavení procesních parametrů, charakteristiky výrobního zařízení a vstupní materiál ve formě kovového prášku.

Proměnným prvkem v experimentech je úhel tisku² a jejich průměr. Ze srovnání průřezů mezi modelovou předlohou a vyrobeným prutem vyplývá, že vytištěné pruty budou mít nižší tuhost, než je předpoklad plynoucí z CAD modelu. S tímto poznatkem se poté může již počítat během návrhu odlehčovaného dílu tak, že se průměr vzpěr adekvátně zvýší, aby byly splněny pevnostní požadavky na díl.

3.2.1 Výroba a rozměry vzorků

Obecně je Metal Additive Manufacturing (MAM) schopna vyrábět složité tvary. Pokud je však použití podpurných struktur omezené kvůli špatné přístupnosti, malým rozměrům, nebo kvalitativním hlediskům na povrch, je nutné v těchto případech splnit základní požadavek pro vyrobitelnost. Úhel tištěných povrchů od platformy by měl být vyšší než je kritický úhel. To by mělo zajistit spolehlivou výrobu bez vad. Praxe ukazuje, že neexistuje ostrá hranice kritického úhlu. Spíše existuje rozpětí, ve kterém se kvalita tištěných povrchů postupně zhoršuje.

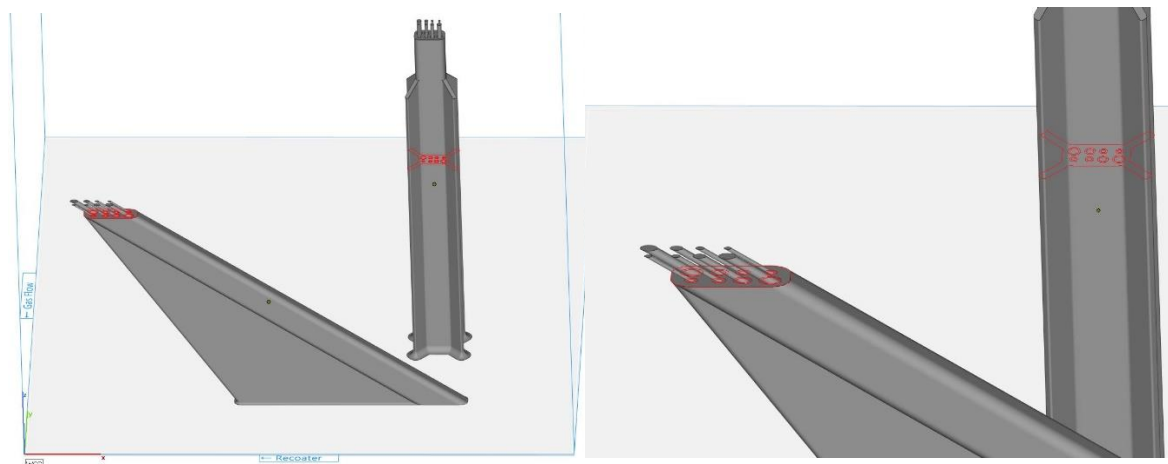
Dobrým příkladem je BCC topologie. Její vzpěry v nejvýhodnější poloze pro tisk svírají 38° vůči rovině strojní platformy MAM zařízení. Ovšem tento sklon je v rozporu se samonosností konstrukce. Úhel samonosné konstrukce by měl být větší než 40°. I přesto, je tato topologie v tiskařské branži velmi používanou, jelikož je její výroba rentabilní.

Modifikovaná geometrie BCC topologie s 38° sklonem byla použita pro odlehčenou frézu. Tato kapitola se zaměřuje na charakterizaci nejzákladnějšího elementu Lattice struktury, na úrovni vzpěry. Cílem je stanovit skutečnou tuhost modifikované BCC topologie s přihlédnutím k pozorovaným defektům v tomto měřítku.

Do experimentů jsou zahrnuté vzpěry s různými průměry a orientací tisku. Rozložení hmoty ve vzpěrách je analyzována pomocí optického skenovacího mikroskopu. Dále jsou vzpěry podrobeny zkoušce tahem a jejich naměřená pevnost je porovnávána s předpokládanou hodnotou. Výsledky měření mohou zlepšit přesnost předpovědi chování MKP analýz těchto struktur.

Dle normy tahových zkoušek ČSN EN ISO 6892-1 má mít vzorek o nestandardních nižších průměrech minimální celkovou délku $L_0 = 120$ mm. Jelikož průměry prutů jsou v rozpětí $\varnothing 0,86$ mm až $\varnothing 1,8$ mm, je poměr průměru k délce vysoký (1:10). Takto tenký a zároveň dlouhý vzorek je pro aditivní výrobu z kovu problematický. Proto byla tisková úloha prutů přizpůsobena. Kolem celého řešení vzorku je vytvořena speciální obálka, která je pro vyrobitelnost tenkého a zároveň dlouhého krčku vzorku zásadní. Navržený model najížděcí série je na obrázku níže.

² Přeloženo z anglického odborného výrazu „building direction“



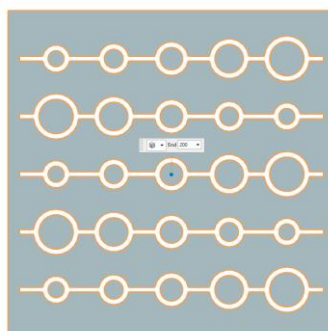
Obrázek 18 – Tisková úloha se vzorky pod úhlem 38° a 90° s technologickou obálkou;
vlevo – celá tištěná sestava; vpravo – detail obálek

Ukázalo se, že pro výrobu je kritický přechod mezi vrchním koncem obálky a pruty, viz vrstva označená červeně na obrázku výše. Vzorky byly umístěny hned vedle sebe, což znamená, že recoater, který se zasekl na tomto přechodu, ovlivnil tisk vzorků i v druhé obálce. To mělo za následek odsazení osy prutů. U skloněných vzorků tento odskok nemá vliv na hodnoty pevnosti prutů, protože odskok byl téměř na jeho horním konci, který byl v upínací části trhačického zařízení. Navíc prodloužení prutů nad obálku sloužilo pouze pro vytáhnutí prutových vzorků z klece obálky. Nicméně u druhé sady, která rostla kolmo z platformy, nastalo odsazení v trhačí části.

Během vytahování vzorků tištěných pod úhlem 38° se vyskytly obtíže, i přes to že mezi obálkou a prutem byla vůle 0,35 mm na poloměr prutu. S ohledem na tyto poznatky byla tisková úloha pozměněna, aby byly tyto rizikové faktory potlačeny.

3.2.2 Analýza prutů

Druhá série vzorků sestávala z prutů o průměrech: $\varnothing 1,8$ mm, $\varnothing 1,5$ mm, $\varnothing 1,19$ mm, $\varnothing 1$ mm, $\varnothing 0,857$ mm. V každé obálce bylo obsaženo pět opakování od každého průměru. U každé řady série má obálka dělicí rovinu. Jen po obvodu jsou segmenty obálky spojeny tenkou stěnou o tloušťce 0,3 mm. Tudíž přesahy prutů nad obálku nejsou nutné. Po odbroušení této tloušťky po stranách se obálka rozpadne a je možné vyjmout prutové vzorky bez jejich ovlivnění ohybem nebo poškozením. Mezery v celém vzorku jsou jednotné 0,3 mm. Průřez konceptu obálky je na obrázku 19.



Obrázek 19 – Rozmístění prutů v obálce

Vyrobilo se celkem tři sady prutů pod úhlem 90° a 38° . Rozdíl tkví v jejich následujícím tepelném zpracování. Jedna sada je úplně bez dodatečného tepelného zpracování, je tedy ve výchozím stavu. Další je po tepelném žihání pro snížení pnutí. Poslední je po žihání ještě tepelně vytvrzena.

Je zajímavé, že po odstranění obálek byly prohnuté pouze 38° vzorky ze sady, které byly tepelně zpracovány žiháním pro snížení pnutí. Toto ohnutí je zřejmé obzvláště na nejtenčích vzorcích a se zvyšujícím průměr míra ohnutí klesá.



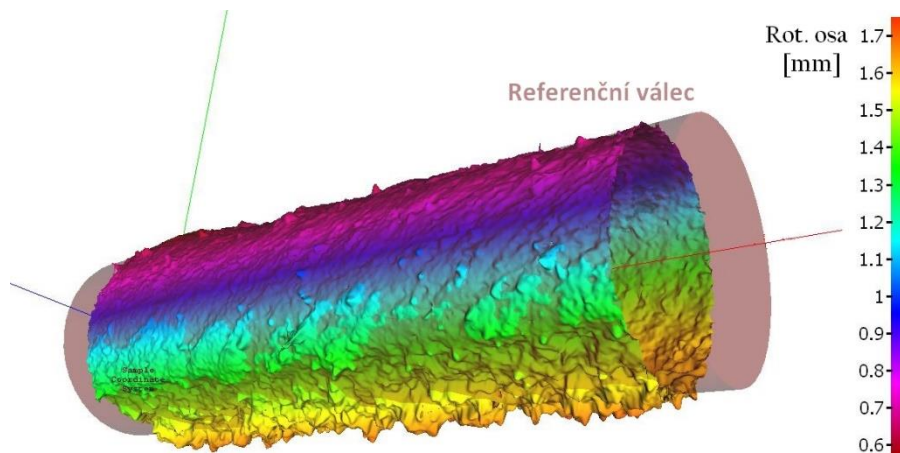
Obrázek 20 – Největší průhyb u žihaného prutu s $\varnothing 0.86$ mm, kontrola na průsvit

Všechny pruty byly vizuálně zkontrolovány nožovým pravítkem na průsvit. Tato kontrola potvrdila, že se již neobjevilo osazení na žádných vzorcích, jako tomu bylo na zkušební sérii. Ostatní vzorky napříč sadami vykazovaly dobrou přímost.



Obrázek 21 – Zbývající pruty jsou přímé, kontrola na průsvit

Odchytky v geometrii byly analyzovány na optickém zařízení Alicona IFM4. Ze 3D snímků je zřejmé, že geometrie skutečného prutu se odlišuje od jeho modelové předlohy. Scan znázorňující změny v geometrii je na obrázku 22.



Obrázek 22 – Diferenční analýza rozměrů podél osy prutu vytištěného pod úhlem 38°

Modelová předloha je válcového charakteru, zatímco skutečný tvar se od této geometrie odlišuje. Na horní ploše vytištěného prutu materiál lehce přebývá, v místě kde se na horní ploše uzavírá průřez prutu. Zatímco na spodní ploše ubývá. Rozdíly jsou poměrně velké vzhledem k průměru $\varnothing 1$ mm prutu. Tímto je oslabená nosnost skutečného prutu od modelu. Proto byl připraven experiment pro ověření, o kolik se skutečná nosnost prutů liší.

Pro další analýzy byly vybrané vzorky naskenovány objektivem IFM G4 5x. Odchylna měření s tímto objektivem o pětinašobném zvětšení je $0,005 \mu\text{m}$, jak deklaruje kalibrační protokol. Povolená tolerance pro tento objektiv je $0,015 \mu\text{m}$. Skenování bylo provedeno pomocí softwaru IF Laboratory Measurement Module a vyhodnocení výsledků pomocí MeasureSuite.

3D sken umožňuje vnější charakterizaci vzpěr a určuje minimální průřez v monitorované oblasti. Porozita materiálu může kolísat v závislosti na orientaci a procesních parametrech. Zůstává však typicky nižší než 1%. [33] Vzpěry lze s ohledem na tuto skutečnost považovat za téměř konzistentní.

3.2.3 Mechanické zkoušky

Jak znázorňuje obrázek 23c, kvalita spodního povrchu nakloněného vzorku je zhoršená a chybí zde kovový substrát. Tento jev je způsoben nedostatečnou podporou spodních vrstev a částečně i kvůli jen částečně nataveným částicím prášku, které se přitavily ke spodnímu povrchu vzpěry. Suard, M. a kol. [26] dospěl k podobným závěrům. Navíc pozoroval také, že příčina drsného povrchu vzpěr vzniká na rozhraní mezi roztavenými vrstvami. Zvlnění drsnosti je orientováno kolmo na směr výstavby s periodou asi $40 \mu\text{m}$, což je tloušťka vrstev.

To jsou hlavní důvody, proč se očekává omezená tuhost skutečné vzpěry. Protože část hmoty chybí, a tudíž nemůže přispět k tuhosti. Vzpěry bez sklonu (směr tisku 90°) vykazují pouze propadliny na přechodech mezi vrstvami.

Minimální tuhost a tedy skutečný průřez vzorků lze odvodit z vepsané kružnice diagramů na obrázcích 23 a 24. Algoritmy softwaru vyhodnotí průměr vzpěry a vytvoří jeho osu ze skenu dlouhého 3 mm. Vložený povrch je vytvořen vložením válce do naskenovaného povrchu. Minimální a maximální vrcholy obálky jsou zaznamenány v diagramu (viz obr. 23a a 24a). Skenovaná část vzpěr uprostřed vzorků jsou reprezentativní pro celý vzorek vzpěry.

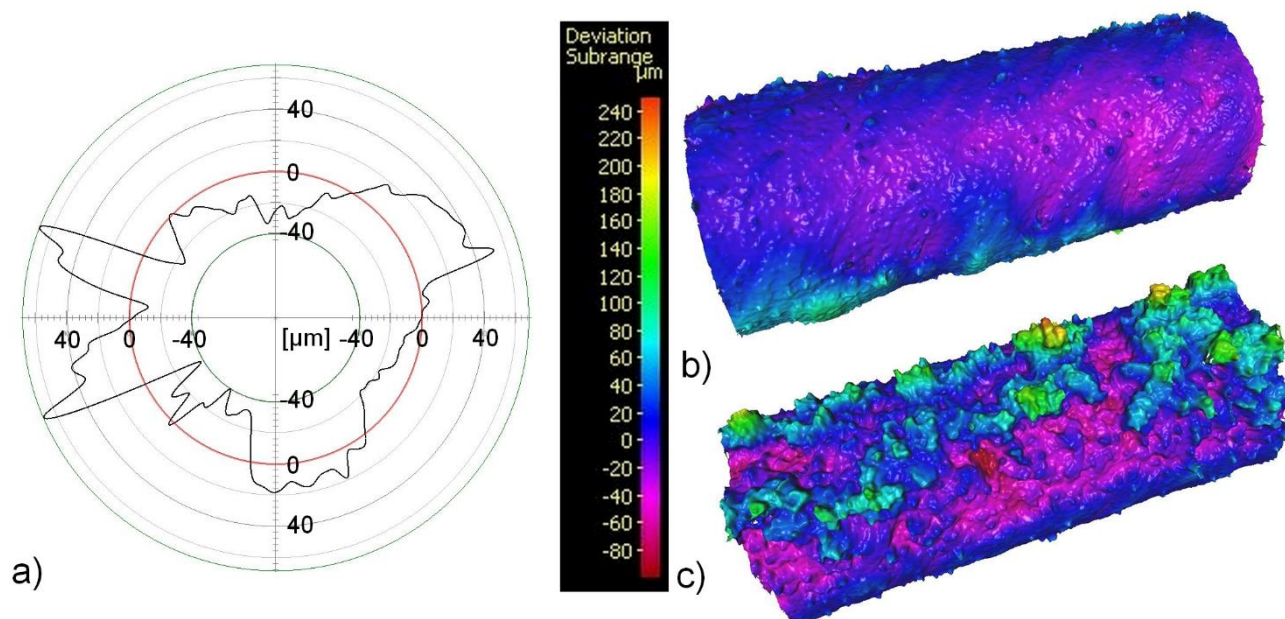
Poměr efektivního objemu je dán poměrem vepsané kružnice k průměru CAD modelu, viz vzorec 3. Podobný postup byl použit pro predikci minimální tuhosti podle Suard, M. et al. [26]. Mez pevnosti by měla být o tento poměr menší, než je teoreticky možné dosáhnout u CAD modelu. Vlastnosti vyrobeného materiálu DMLS technologií jsou následující: mez pevnosti 1170 MPa a mez kluzu 1060 MPa . Tyto hodnoty byly převzaty z práce Zetkové, I. [22]. Tahové vzorky v této práci byly vyrobeny za stejných podmínek, jako jsou vzpěry. Tvar tahových vzorků byly v souladu s normou ČSN EN ISO 6892-1 a jejich průměr byl D4. Skutečná mez pevnosti je dána vzorcem 4.

$$\varphi = \frac{S_{\text{vepsané plochy}}}{S_{\text{CAD}}} [\%] \quad (3)$$

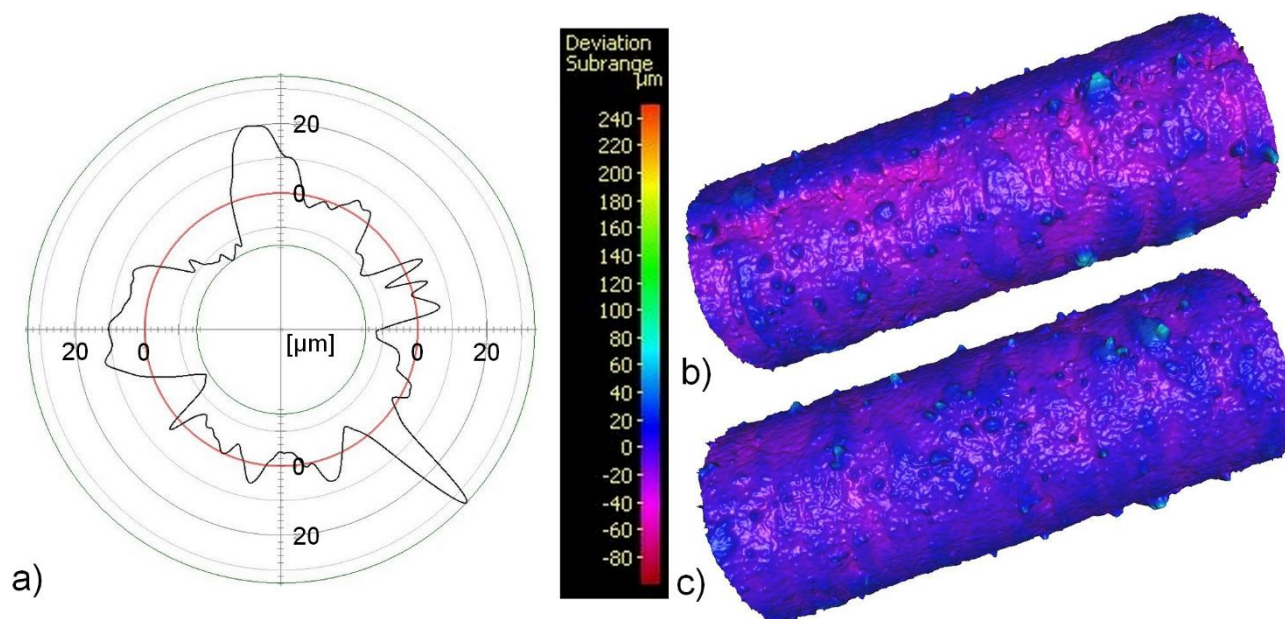
$$Rm_{\text{skutečné}} = \varphi \cdot Rm_{\text{CAD}} [\text{MPa}] \quad (4)$$

3.2.4 Vliv orientace

Povrchová kvalita včetně tvaru tištěných dílů pomocí DMLS závisí na jejich orientaci. Stejný trend lze pozorovat u „lattice“ struktury. Skeny vzorků pod sklonem 38° a 90° jsou na obrázku 23 a 24. Oba vzorky mají stejný průměr CAD předlohy 1,19 mm. Poměr efektivního objemu k objemu CAD je 90 % pro vzorek 38°, zatímco vzorek 90° má 92 %. Vyšší přesnosti je dosaženo u svislého vzorku než u vzorku stavěného pod úhlem. To bylo potvrzeno Suardem, M. a kol. [38] také. Měřila se drsnost povrchu na horní straně nakloněné vzpěry. Jeho hodnoty byly Ra 7,7 μm, Rq 9,4 μm a Rz 45,0 μm. Zatímco vertikální vzorek dosáhl Ra 4,7 μm, Rq 5,9 μm a Rz 31,0 μm. Tyto parametry také potvrzují rozdíly mezi vzorky.



Obrázek 23 – Diferenciální analýza nakloněného vzorku o úhel 38°
a) Diagram odchylky od průměru 1.080 mm; b) vrchní plocha; c) spodní plocha prutu

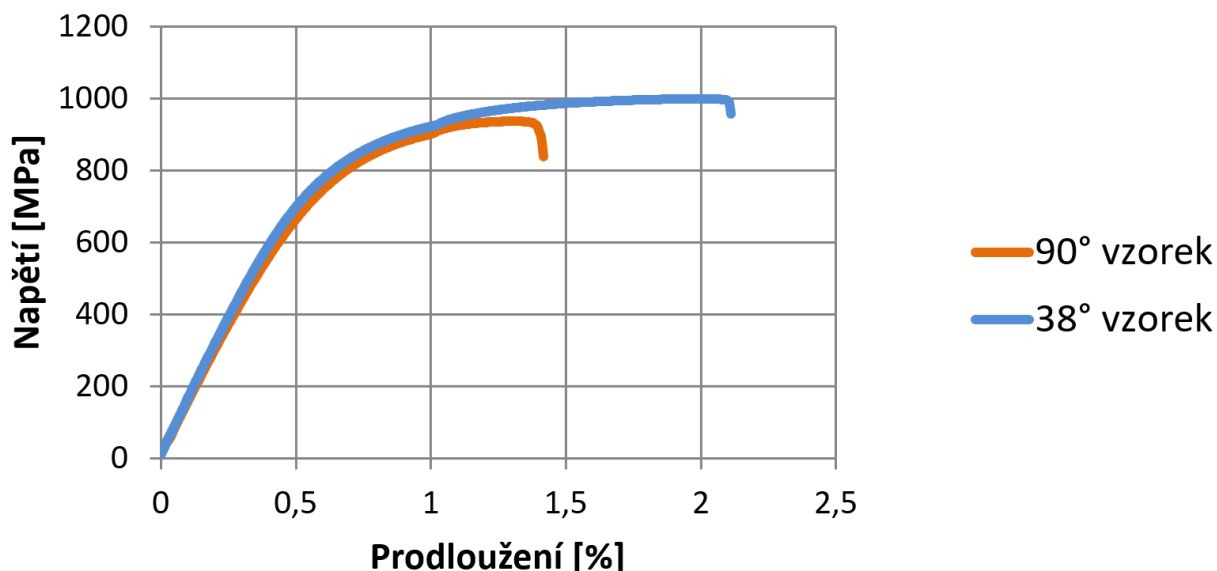


Obrázek 24 – Diferenciální analýza kolmého vzorku
a) Diagram odchylky od průměru 1.098 mm; b) vrchní plocha; c) spodní plocha prutu

Vše naznačuje, že vzorky pod úhlem 38° by měly vykazovat horší mechanické vlastnosti než vertikální vzorky vzpěr. Protože velké množství kovového substrátu chybí na spodní tisknuté straně všech nakloněných vzorků. V důsledku je v těchto vzpěrách přítomen menší účinný průřez a vyšší pórovitost. Pro ověření tohoto předpokladu byly provedeny tahové zkoušky na zařízení Zwick / Roell Z005.

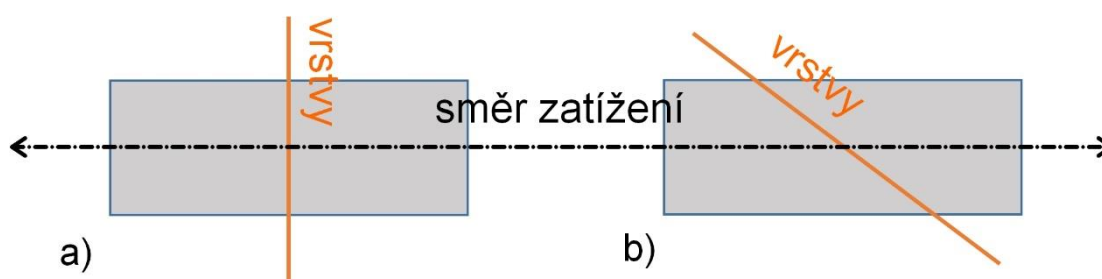
Pro věrohodnost výsledků měla každá sada jmenovitého průměru 5 opakování. Průměr vzpěry 1,19 mm je referenční, jelikož tento průměr bude použit v odlehčené fréze. Vzorky byly navrženy v souladu s normou ČSN EN ISO 6892-1. Poměr průměru k délce převyšuje 1:10. Proto je pracovní délka vzorků (L_0) 100 mm a nejnižší celková délka vzorků (L) byla větší než 120 mm.

Zkoušky tahem prokázaly rozdíly mezi vzorky. Svislé vzorky dosáhly meze pevnosti při tahu 929 MPa (79% účinnosti). Zatímco šikmé vzorky měly větší tvarovou odchylku od modelu CAD, ale měly vyšší pevnost 996 MPa (85% efektivnosti). Toto pozorování je v souladu s výsledky disertační práce Ing. Ivany Zetkové, Ph.D. [34] Získané závislosti napětí-deformace jsou na obrázku 25. Tyto hodnoty však neodpovídají vypočítanému meznímu napětí ($R_{m\text{skutečné}}$), které jsou pro kolmý vzorek 1076 MPa a pro šikmý vzorek 1053 MPa.



Obrázek 25 – Pracovní diagram tahových zkoušek

Tahové zkoušky přinesly rozkol mezi očekávanými výsledky a naměřenými hodnotami. Nakloněné vzorky mají sice vyšší odchylku v geometrii, ale jejich orientace vrstev k ose zatížení poskytuje vyšší nosnost. Navíc průřez 38° vzorků není ve srovnání s 90° vzorky o tolik oslaben vlivem zhoršené geometrické přesnosti na spodní ploše. Orientace vrstev ve vzorcích je znázorněn na obrázku 26.

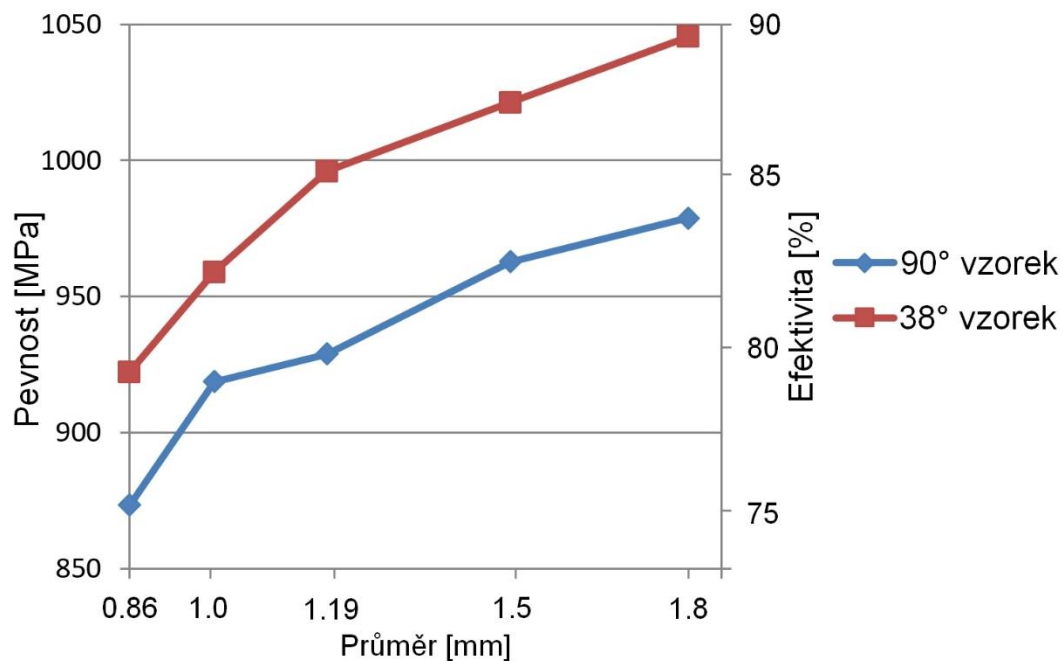


Obrázek 26 – Orientace vrstev k ose prutů; a) 90° vzorky; b) 38° vzorky

3.2.5 Vliv průměru

Významnost průměru je definována opět tahovými zkouškami. Naměřené hodnoty mezi pevnosti s účinností je uvedena na obrázku 27. Tíštěné vzorky dosáhly nižších hodnot pevnosti, což se odráží na účinnosti. Plná 100% účinnost je mez pevnosti o napětí 1170 MPa (R_{mCAD}).

I zde se potvrdilo, že pevnost tíštěného materiálu závisí na směru výroby vzorků. Vliv směru výroby byl konzistentní v celém rozsahu zkoušek. Navzdory vyšším geometrickým odchylkám skloněných vzorků měly tyto vzorky vyšší nosnost než 90° vzorky v průměru o 5 %. Dále bylo vysledováno, že mez pevnosti se zvyšovala s větším průměrem. Nejvyšší rozdíl mezi pevnostmi vzorků s rozdílnými průměry byl stanoven na 125 MPa.



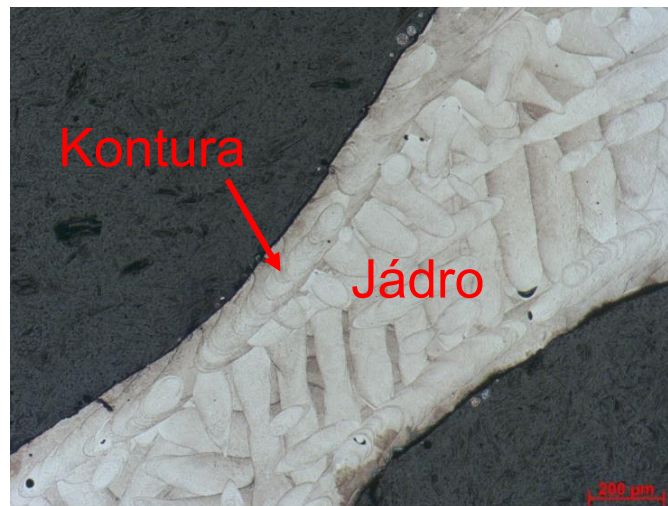
Obrázek 27 – Vliv průměru vzorků na pevnost a efektivitu vztahenou k průměru modelové předlohy

3.2.6 Vyhodnocení

Orientace prutových vzorků má vliv na geometrii a nosnost vzorků. Vzorky stavěné pod úhlem mají sice větší geometrickou odchylku od modelové předlohy a kvalitativně horší spodní povrch tisknutých vzorků, za to mají v porovnání s kolmými vzorky v průměru o 5 % vyšší pevnost i přes menší funkční průměr prutů. Nabízí se vysvětlení, že hlavním původcem tohoto chování byla orientace vrstev, které jsou v případě nakloněných vzorků blíže skluzové rovině.

Změna pevnosti se změnou průměrů prutů je zapříčiněna tím, že u menších průměrů má větší podíl na degradaci pevnosti vady na povrchu vzorků. Navíc se se změnou průměru mění i zastoupení „skin“ a „core“ taveného oblasti prutů. Vnější plocha prutů, kontura, je totiž během výroby MAM tavena jiným setem procesních parametrů než jádro prutu „core“. Parametry pro „skin“ jsou odladěny, aby povrch dílů měl dobře slitý hladký povrch s nízkou drsností. Zatímco jádro dílu „core“ tvoří nosnou kostru dílu s důrazem na mechanické vlastnosti. Se zmenšujícím se průměrem se zastoupení „skin“ objemu zvyšuje na úkor objemu „core“. Proto větší průměry prutů dosahují vyšší pevnosti.

Na obrázku 28 je snímek naleptaného metalografického výbrusu vzpěry gyroidní struktury. Na obrázku lze rozlišit rozdílně tavené oblasti vzpěry. Kontura pohledové obálky vzpěry je obtažena nízkou energií laseru, zatímco jádro je šrafované vyšší dodanou energií. Každá z vrstev jádra je pootočená o 67° vůči předešlé vrstvě. Tímto je dosaženo větší homogenity staveného materiálu.

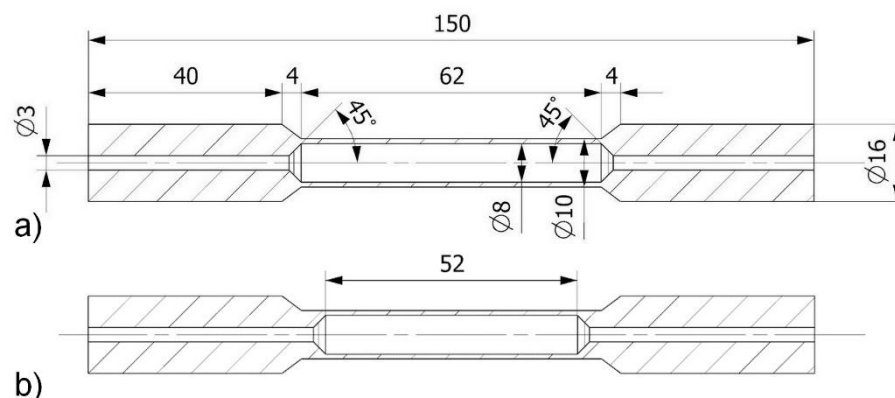


Obrázek 28 – Metalografický výbrus gyroidní vzpěry

3.3 Napojení „lattice“ na obálku a její podíl na únosnost vzorků pro tahové zkoušky

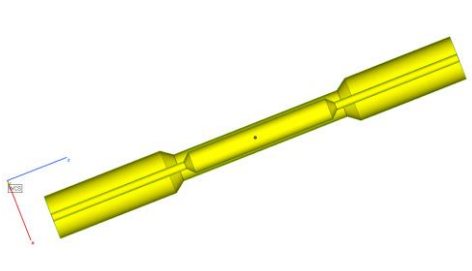
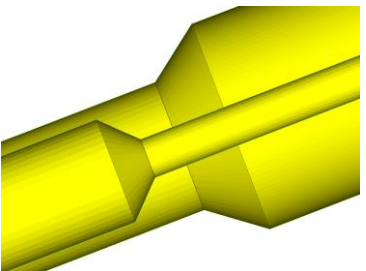
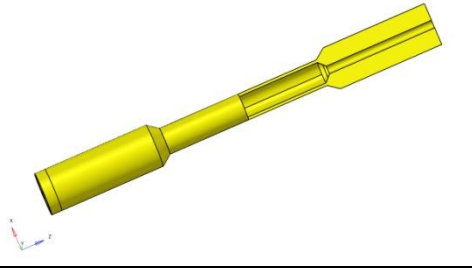
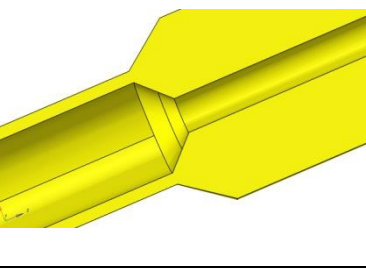
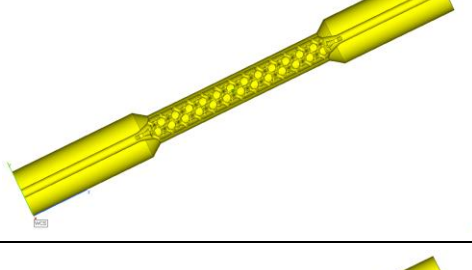
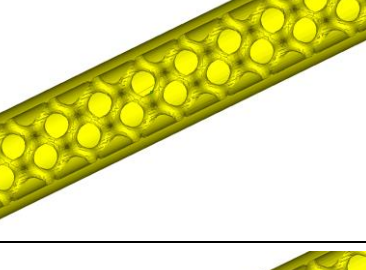
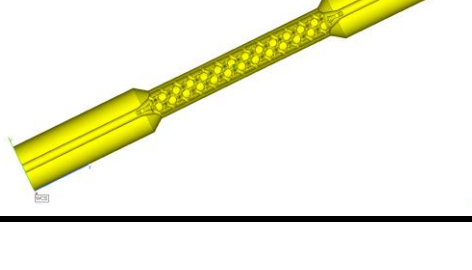
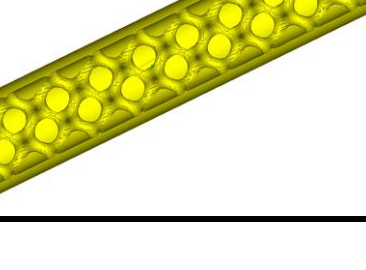
3.3.1 Geometrie vzorků

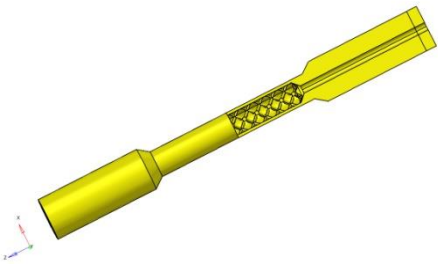
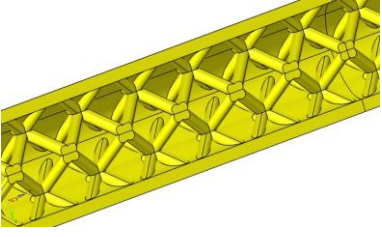
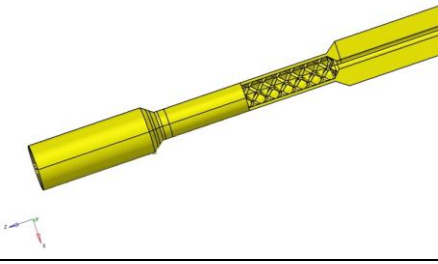
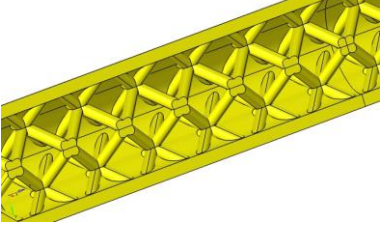
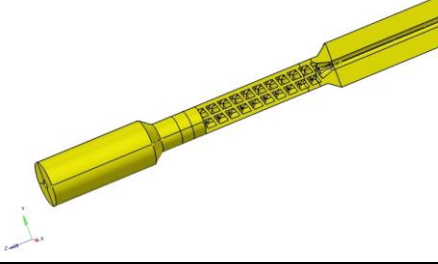
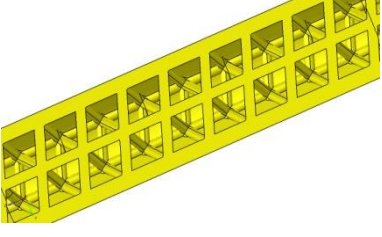
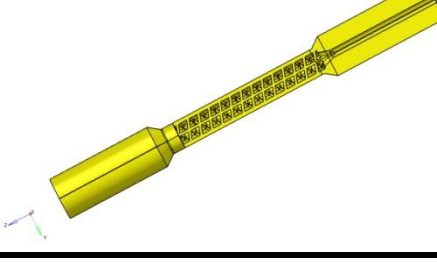
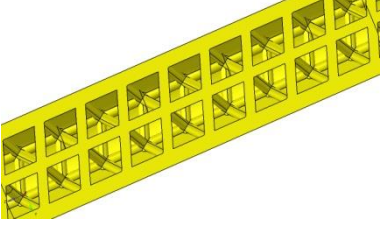
V této části je sledován způsob deformace dutých tahových vzorků, jež byly vyplněny „lattice“ strukturou. Geometrie vzorků je uvedena na obrázku 29. Středem upínací části vzorků je veden otvor o $\varnothing 3$ mm pro vysypání nespečeného prášku. Pro experimenty vznikl také vzorek, který zachovává stejné rozměry až na výjimku zkrácení dutiny z 62 mm na 52 mm. Tyto vzorky jsou označovány jako „kratší“ varianta.



Obrázek 29 – Geometrie dutého vzorku pro vyplnění jedním typem z testovaných topologií struktur;
a) dlouhá verze; b) kratší verze

Statické zkoušky byly provedeny na 2 představitelích „lattice“ struktur, jejichž základní buňka měla rozměry 5x5x5 mm (x, y, z). Prvním představitelem byla výchozí BCC topologie a pro srovnání byla použita gyroidní topologie. Obě topologie mají stejný objemový poměr, což znamená, že všechny vzorky s totožnou obálkou mají stejnou hmotnost. U BCC vzorků byl testován vliv různé orientace během tisku vzorků. Vzorky byly zpracovány tepelným žháním pro snížení pnutí. Na obrázku 30 je výčet vzorků s detailem na orientaci „lattice“ výplně. Úhel u označení struktury udává polohu vzorku při výrobě. Úhel 90° je uveden u vzorků, které byly vyrobeny svisle, tzn., že osa vzorků je kolmá na vrstvy. Zatímco zbylé vzorky byly tištěny pod úhlem 45°.

Vzorek	Pohled	Název vnitřní struktury	Detail vnitřní struktury
Vzorek 1-3		- Krátká obálka	
Vzorek 4-6		- Dlouhá obálka	
Vzorek 7-9		GYROID 90° Dlouhá	
Vzorek 10-12		GYROID 90° Krátká	

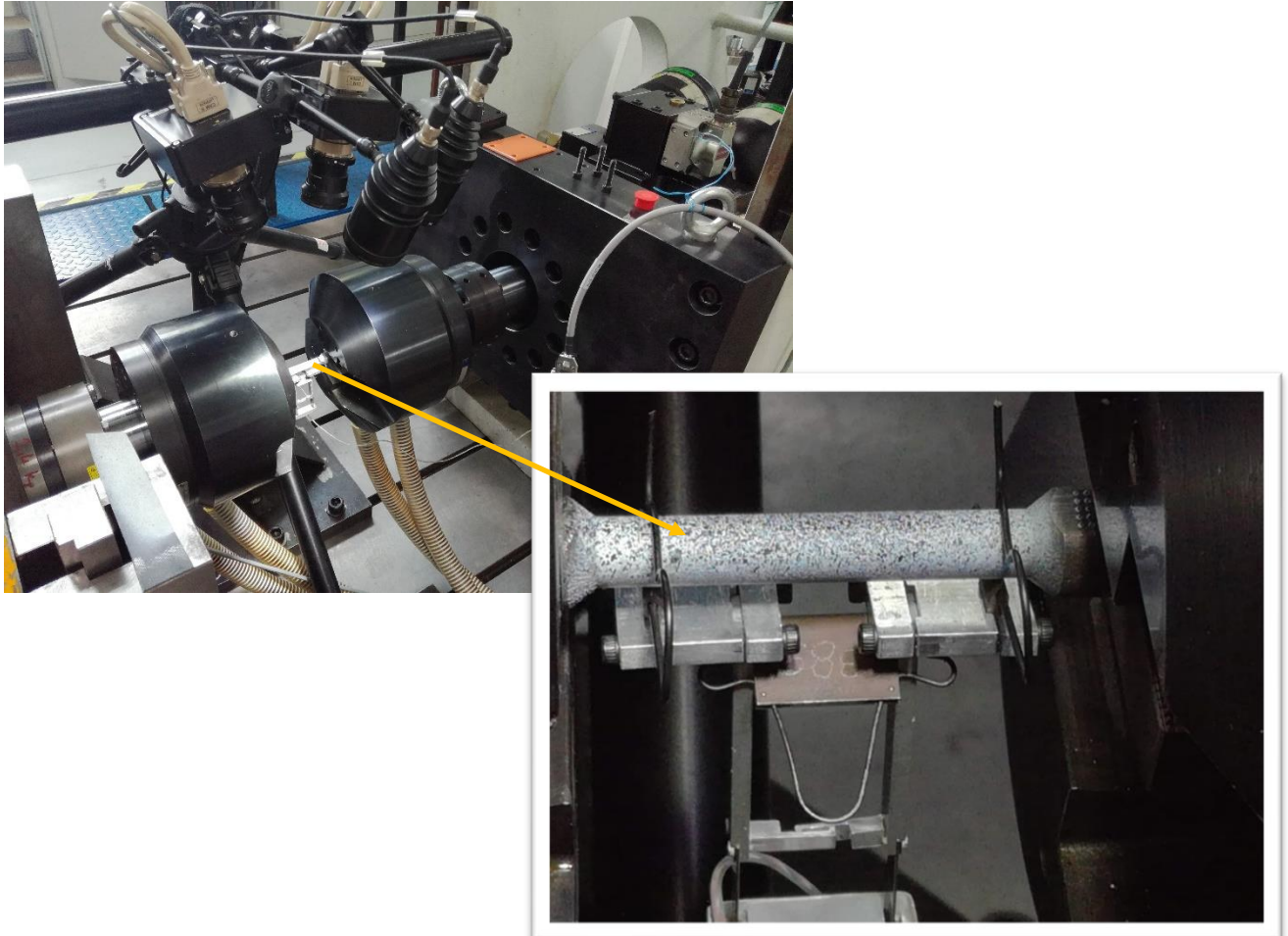
Vzorek 13-15		BCC 90° Krátká	
Vzorek 16-18		BCC 90° Dlouhá	
Vzorek 19-21		BCC 45° Krátká	
Vzorek 22-24		BCC 45° Dlouhá	

Obrázek 30 – Geometrie prodlouženého dutého vzorku pro vyplnění jedním typem z testovaných topologií struktur

Obálka vzorků pro BCC 45° a GYROID 90° byla poupravena, jelikož v ose vzorků byla vzpěra, kterou bylo potřeba ukotvit k obálce kvůli tisknutelnosti. Výhodou gyroidní struktury je samonosná topologie, která je tisknutelná v jakékoliv orientaci. Zatímco BCC topologie byla ve vzorcích orientována tak, aby respektovala zásady tisknutelnosti.

3.3.2 Tahové zkoušky [35]

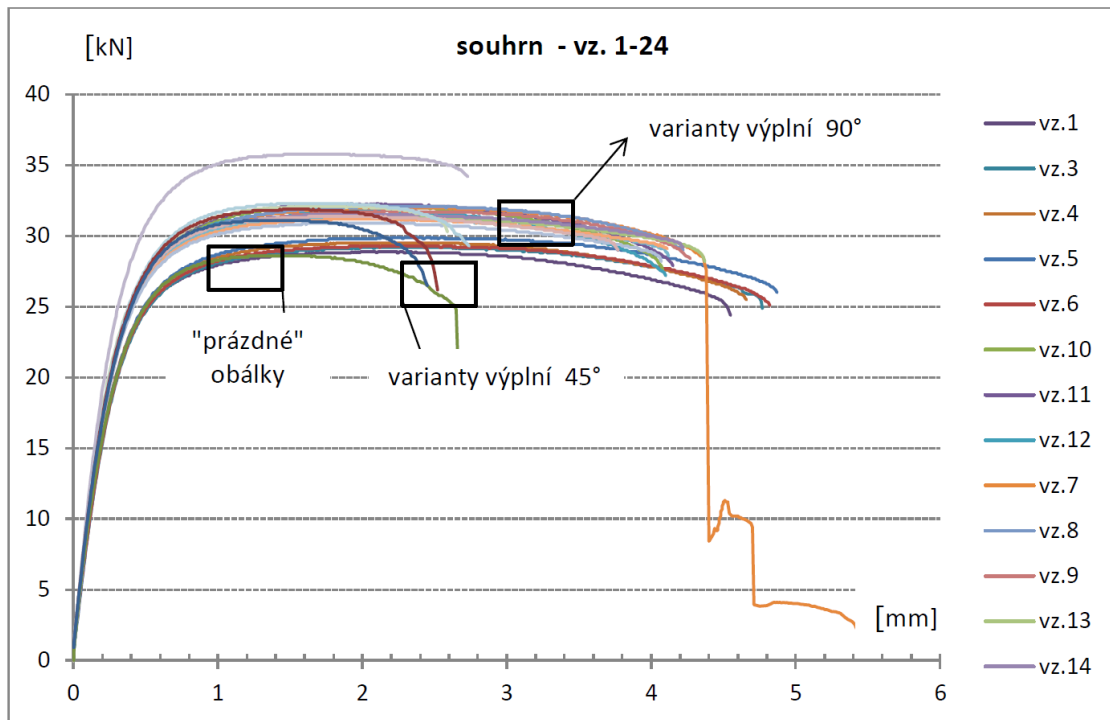
Vzorky byly vystaveny tahovým zkouškám, během nichž byla deformace vzorků snímána pomocí extenziometru a současně systémem ARAMIS DIC pro kontinuální mapování heterogenního rozvoje deformace či napjatosti. Měřicí sestava je na obrázku 31. Výsledky vznikly ve spolupráci s prof. Evou Schmidovou a spol., UPCE [35].



Obrázek 31 – Osazení tahového vzorku v testovacím zařízení, měření deformace pomocí extenziometru a systému ARAMIS DIC

Výsledky statických tahových zkoušek vypovídají o zanedbatelném vlivu délky obálky u vzorků tištěných s orientací 90° . U vzorků s orientací 45° bylo naměřeno mírné zvýšení pevnosti u kratší varianty oproti delší ovšem při výrazném zvýšení rozptylu pevnosti vzorků u obou variant 45° vzorků s BCC strukturou.

Mírně vyšší pevnost byla pozorována u vzorků s gyroidní výplní než s BCC topologií. U delší obálky byl tento rozdíl výraznější. Celkové srovnání na obrázku 32 a v tabulce 2 poukazuje, že zpevnění u obou typů výplně je doprovázeno poklesem tažnosti a dochází k vícenásobné lokalizaci deformace. U obou délek obálek byl zjištěný podstatný vliv orientace tisku na deformaci. Navýšení pevnosti bylo u obou variant výplní relativně nízké.



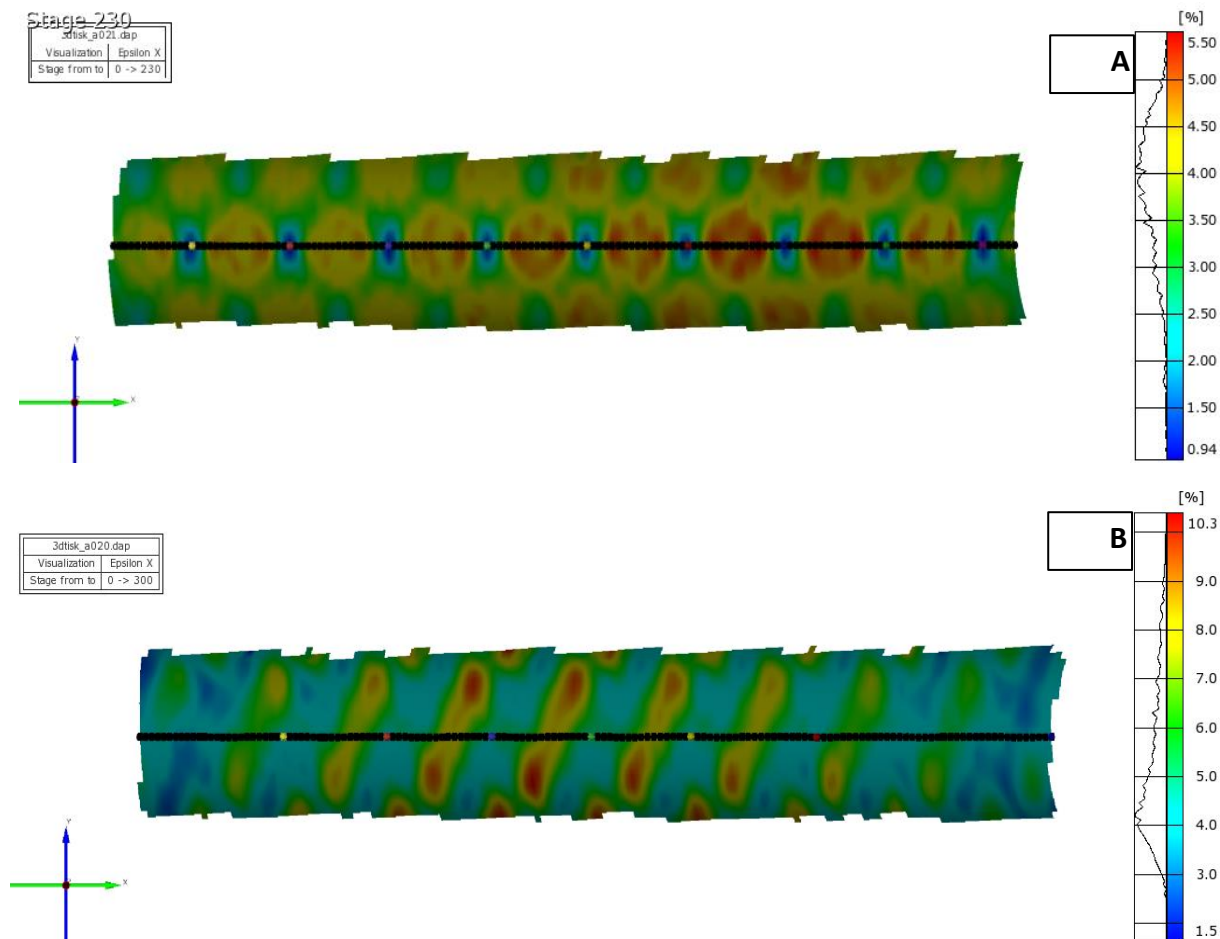
Obrázek 32 – Souhrnné srovnání výsledků statických zkoušek

Tabulka 2 – Souhrnné srovnání výsledků statických zkoušek

	Číslo vzorku / F_{max} [kN]			průměr
	1	2	3	
Krátká obálka	28,9	-*	29,2	29,1
Dlouhá obálka	4	5	6	
	29,5	29,9	29,3	29,6
Dlouhá obálka Gyroid	7	8	9	
	32	32,1	31,8	32,0
Krátká obálka Gyroid	10	11	12	
	32,1	32,3	31,8	32,1
Krátká obálka BCC 90°	13	14	15	
	31,4	31,5	31,3	31,4
Dlouhá obálka BCC 90°	16	17	18	
	31,2	30,9	31,4	31,2
Krátká obálka BCC 45°	19	20	21	
	32,1	35,8	32,3	33,4
Dlouhá obálka BCC 45°	22	23	24	
	31,9	28,6	31,1	30,5

-* vz.2 bez záznamu zkoušky

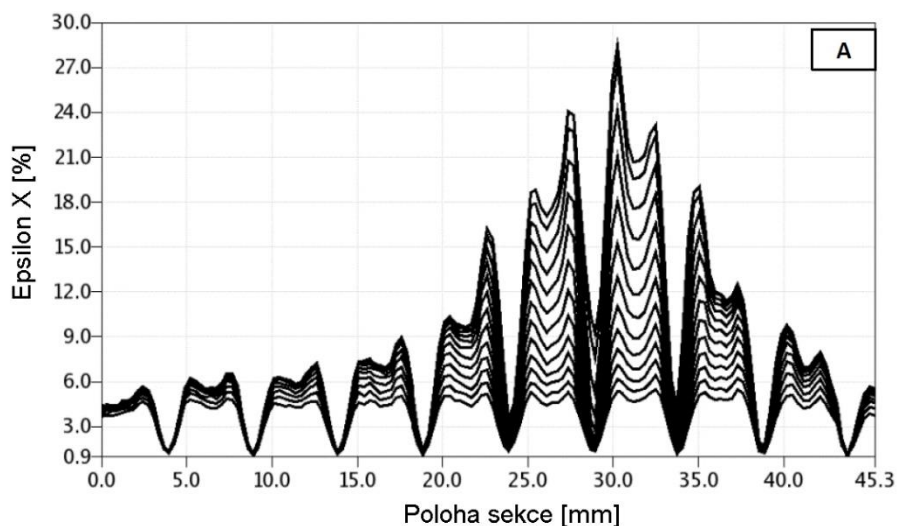
Na obrázku 33 je patrný vliv vnitřní stavby odlehčené struktury na deformaci. Prezentované stádium zátěže odpovídá úrovni zatížení, při kterém již dochází k výraznějším projevům lokalizace deformace právě v okolí místa lomu.



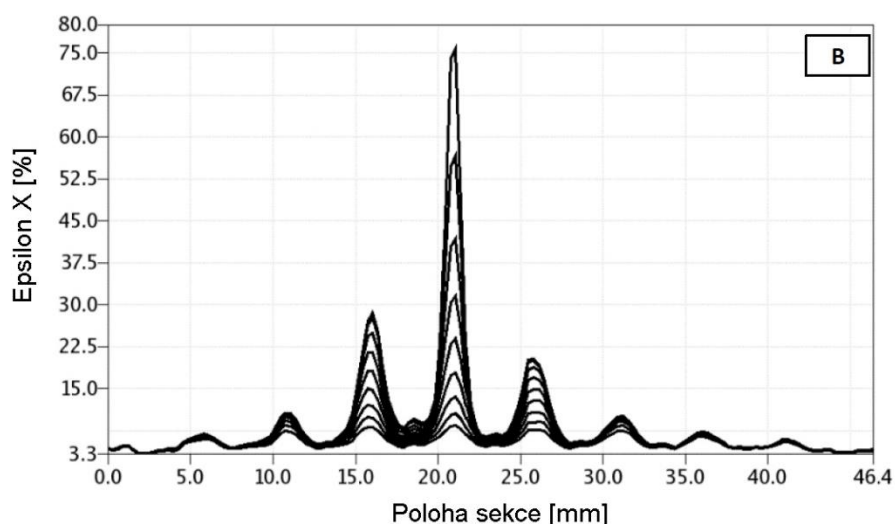
Obrázek 33 – Vliv vnitřní stavby odlehčené struktury na deformaci; a) BCC; b) Gyroid

Kvantitativní vyhodnocení bylo nutno opřít o definice vztažné linie bodů v ose měřeného vzorku. Linie bodů je znázorněna na obrázku 33, kde jsou také zvýrazněny body v lokálních minimech deformací. Počet bodů v linii byl omezen počtem prvků, ze kterých je sestavena výpočetní maska.

Po délce linie (na Obr. 33 černá linie) bylo vyšetřeno technické prodloužení (Epsilon X), která dokumentuje intenzitu deformace. Časově odstupňované křivky od stádia počátku lokalizace deformace až po stádium bezprostředně před destrukcí vzorku jsou na obrázcích 34 a 35. V místě největšího technického prodloužení nastal lom.



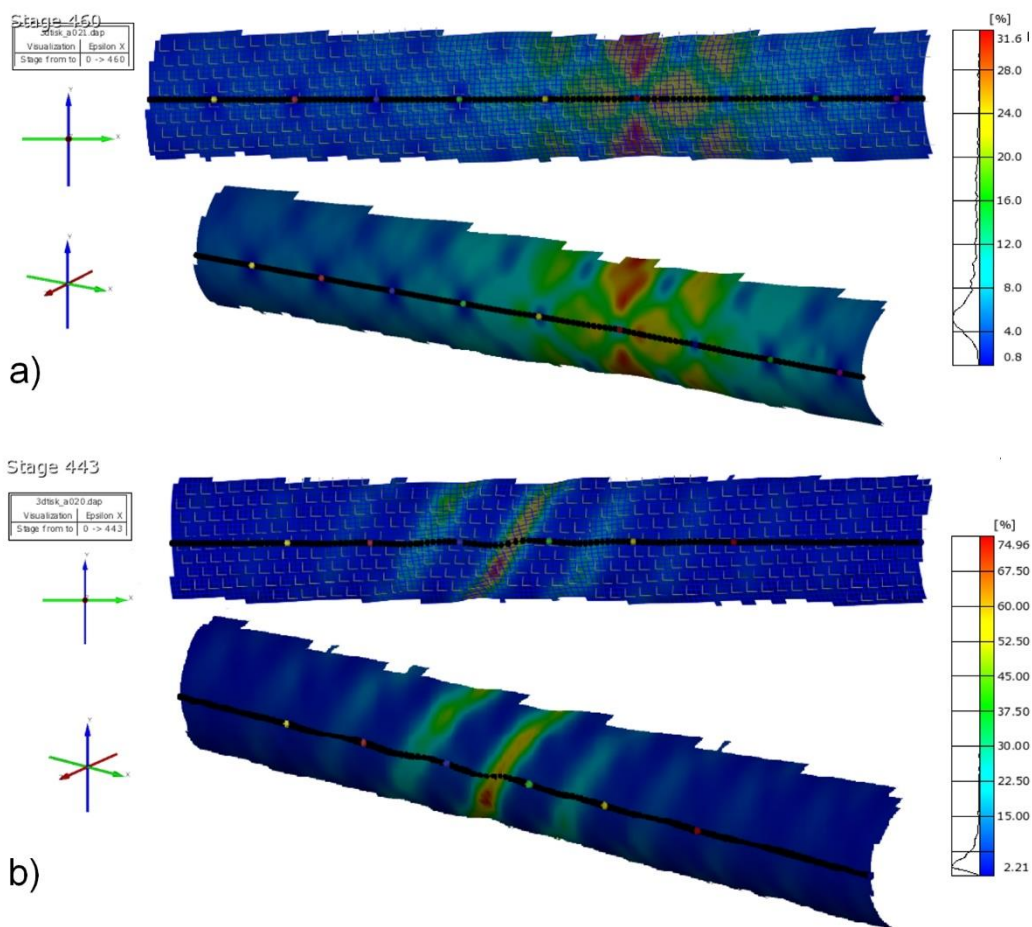
Obrázek 34 – Multi-sekční diagram technického prodloužení podél vzorku s BCC topologií; čas 23-46 s



Obrázek 35 – Multi-sekční diagram technického prodloužení podél vzorku s gyroidní topologií; čas 30,0-45,4 s

Srovnání ukazuje na podstatný rozdíl ve vlivu vnitřní topologie struktury na lokalizaci deformace do lomu. Výrazně většího technického prodloužení v místě lomu je dosaženo u gyroidní struktury při přibližně stejném celkovém prodloužení vzorku u srovnávaných technologických variant vzorků (měřeno extenzometrem).

Technické prodloužení, které odpovídá konečnému stádiu zatížení, je na obrázku 36. Mapy povrchových deformací odpovídají stavu těsně před porušením, tj. přibližně 0,2 s před porušením. Zakřivení sledované linie bodů je projevem mírného zaškrcení vzorků.

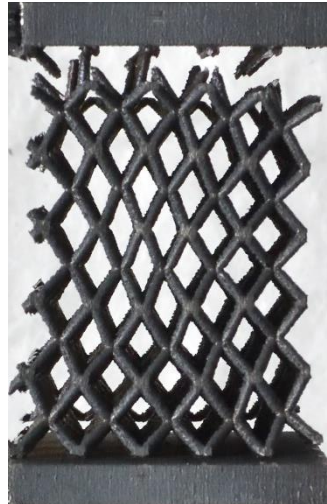


Obrázek 36 – Technické prodloužení odpovídající konečnému stádiu zatěžování, přibližně 0,2 s před destrukcí
 a) BCC stadium 46 s; b) Gyroid, stadium 44,3 s

3.3.3 Vliv napojení styčnicků na pevnost

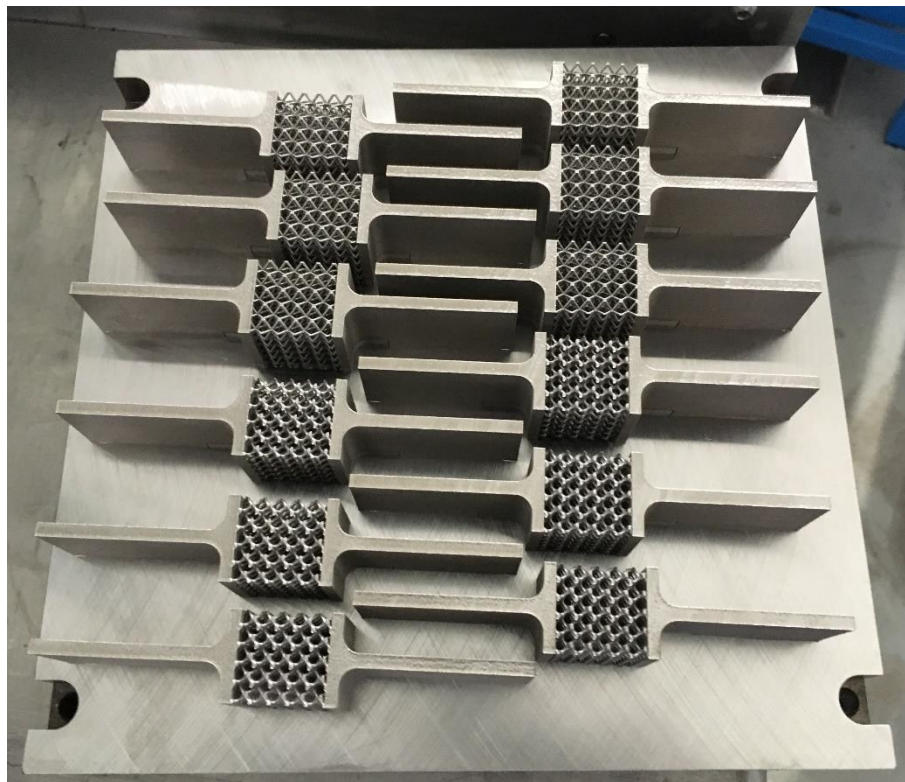
Koncept frézy je postaven na obalových plochách frézy, které vyplňují „lattice“ jádro struktury. Tato obálka nejen, že slouží jako nosná kostra, ale také propojuje volné konce vzpěr „lattice“ jádra na přechodu obálka, jádro.

Experimenty tahových zkoušek porézních struktur prokázaly, že se vzorky přetrhávají na rozhraní odlehčeného jádra a plného materiálu, jak je ukázáno na obrázku 37. V místě napojení je přechod mezi dvěma rozdílně tuhými systémy. Na jedné straně tuhý monolit, v tomto případě upínací částí vzorku, a na druhé straně méně tuhá „lattice“ struktura. Vliv napojení dvou rozdílně tuhých soustav může snížit celkovou únosnost odlehčené frézy během řezného procesu, který vystavuje frézu dynamickému namáhání.

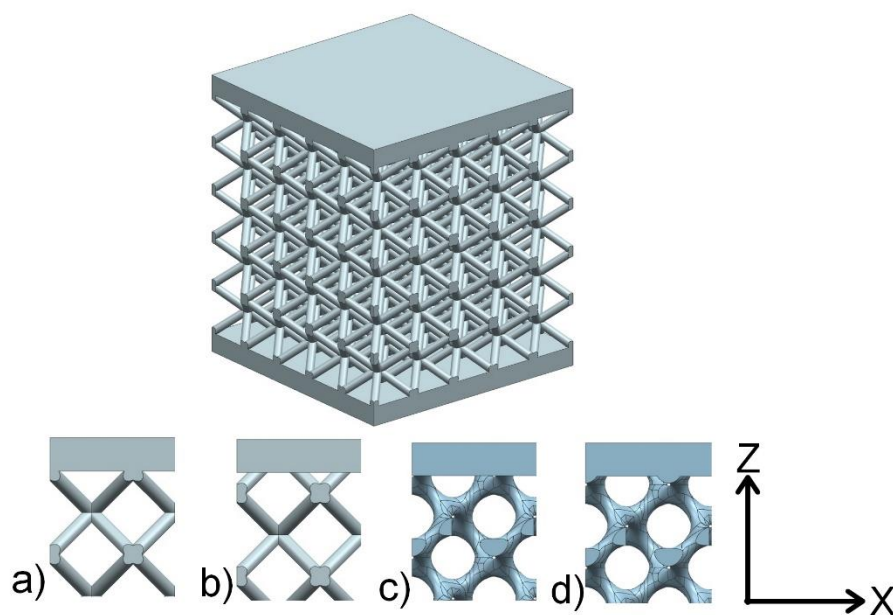


Obrázek 37 – Lokace přerušení v místě napojení "lattice" struktury a tuhé upínací části

Proto byl navržen experiment, který hodnotí vliv místa napojení styčnicků na pevnost vzorku. Z těchto důvodů byly navrženy a vytištěny tahové vzorky, viz na obrázku 38. Vliv byl hodnocen na BCC a gyroidní topologii. Pro každou topologii byla vybrána nejvíce rozdílná místa přechodu napojení do tuhé upínací části vzorku. Detail zvoleného místa napojení je na obrázku 39. U BCC topologie se vzdálenost místa napojení lišila o půlku velikosti základní buňky, tj. 2,5 mm. V prvním případě přímo v uzlu styčnicků (viz obrázek 39a) a ve druhém případě v půlce styčnicků (obrázek 39b). U gyroidní struktury bylo zvolení nejvíce rozdílného napojení o poznání složitější. Nakonec vzdálenost mezi nejvíce rozdílnými napojeními byla vyhodnocena ve vzdálenosti 0,75 mm (viz obrázek 39c a 39d).

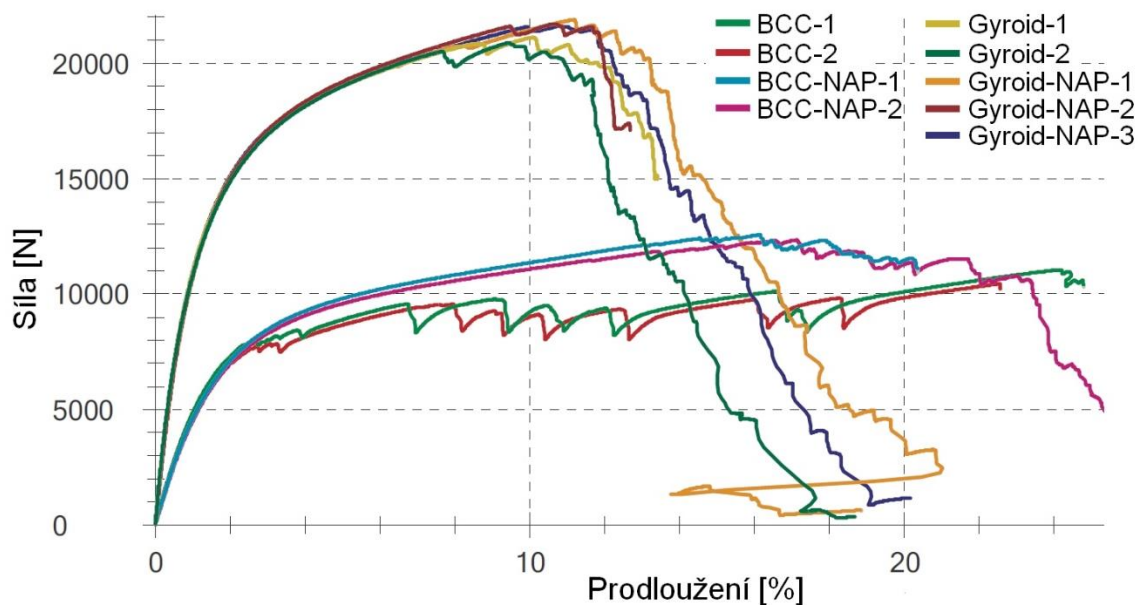


Obrázek 38 – Uchycené tahové vzorky k platformě



Obrázek 39 – Geometrie vzorků a) BCC napojení v uzlu; b) BCC napojení v půli styčnicků (BCC-NAP); c) Gyroid napojení v uzlu; d) Gyroid napojení (Gyroid-NAP) ve vzdálenosti 0,75 mm od uzlu

Každý vzorek byl testován se dvěma opakováními na zkušebním stroji Zwick/Roell Z250. Objemový podíl pevné fáze a velikost základní buňky byly pro obě topologie nastaveny totožně. „Lattice“ jádro obsahovalo základní buňky v rozložení 5x5x5 (x, y, z). Opakování vykazovala velkou míru podobnosti. Nejvíce se vliv napojení projevil u BCC topologie, u které se změnil nejvíce průběh deformační křivky. Vyšší pevnosti by mohlo být dosaženo přidáním zaoblení na styčnicku v místě napojení, viz žlutě vyznačená oblast na detailu obrázku 41.

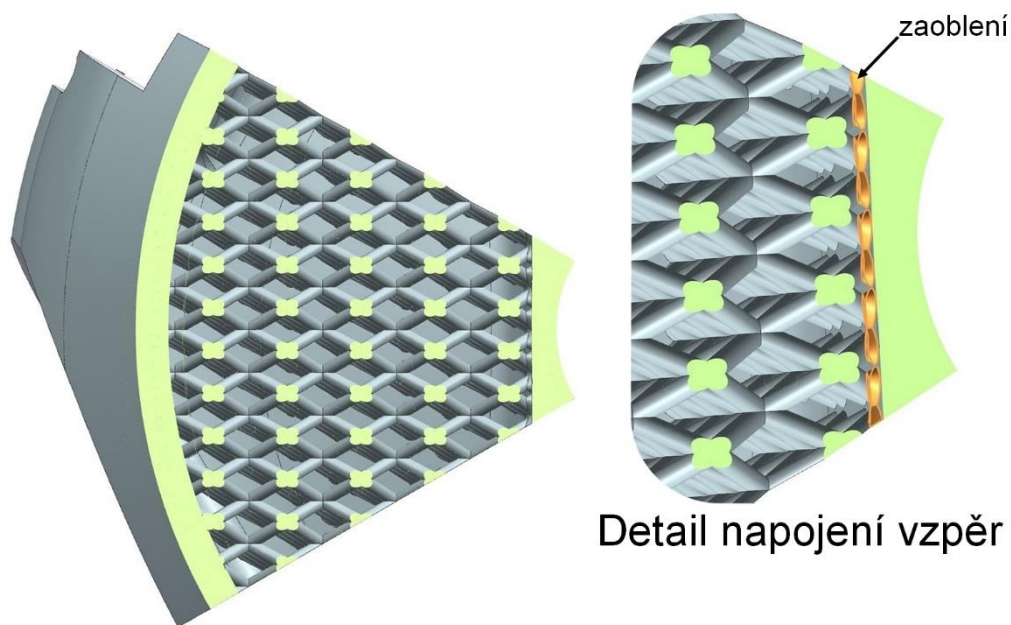


Obrázek 40 – Výsledky z tahových zkoušek vlivu místa napojení

3.3.4 Vyhodnocení

Rovnoměrnější deformace byla pozorována u BCC topologie. Což se jeví pro aplikaci frézy výhodně, protože se zatížení v těle frézy může rovnoměrněji rozložit a tím lépe eliminovat rázy a vibrace v odlehčeném „lattice“ jádře. Proto byla BCC topologie v následujícím experimentu vystavena silovému buzení a záznam oscilační odezvy byl zajištěn pro zjištění útlumové charakteristiky této struktury.

V přechodu mezi obálkou a odlehčenou strukturou se spojují dva různě tuhé systémy. Což dokládá i skutečnost, že během tahových zkoušek docházelo k přerušení vzorků právě na rozhraní „lattice“ jádra a tužší upínací části (viz obrázek 37). Z důvodu zesílení napojení „lattice“ na obálku frézy u středu frézy, byla plocha obálky zploštěna a přechod zesílen přidáním zaoblení na styčnicích, které prostupují do obálky. Tím je docíleno stejnoměrného napojení a je redukována koncentrace napětí v důsledku spojení dvou rozdílně tuhých systémů. Na obrázku 41 je v detailu znázorněn způsob napojení porézního jádra na vnitřní část obálky.

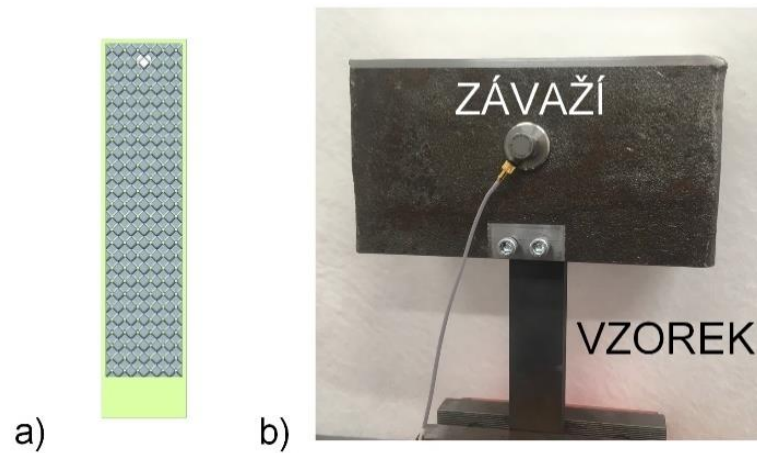


Obrázek 41 – Homogenní napojení porézního jádra na vnitřní část obálky

3.4 Tlumící vlastnosti

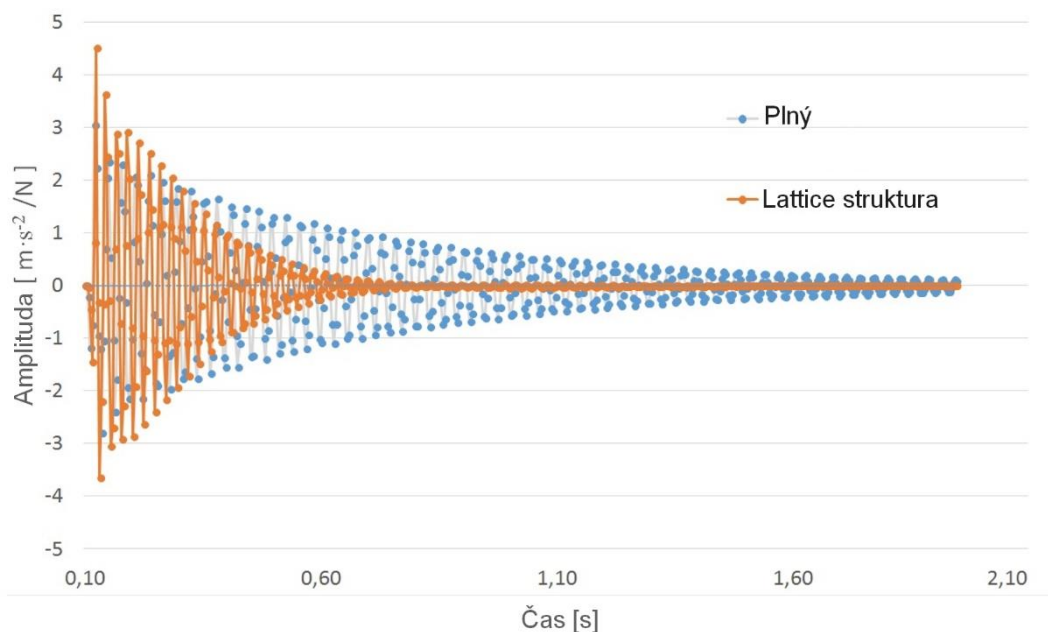
Lattice struktury mohou být považovány za systém vzpěr, na které lze nahlížet jako na pružící elementy. Studie [21] uvádí, že „lattice“ struktury mohou být dobrými absorbátory energií. Tyto struktury jsou také popsány jako dobré vibrační izolanty. Vystává tedy otázka, jestli zvolená BCC topologie vykazuje tlumící vlastnosti. Proto byl proveden experiment k nalezení odpovědi.

Experimentální vzorky měly rozměry 144 mm x 33 mm x 18 mm. Přičemž jedno těleso bylo plné a druhé bylo vyplněno BCC strukturou s velikostí buňky 5 mm o objemovém podílu pevné fáze 13,5%. Tloušťka obálky experimentálního tělesa byla 1,5 mm vyjma upínací části dlouhé 13 mm, která byla plná kvůli tuhosti upnutí. Na obrázku 42a je model odlehčeného vzorku v řezu. Zatímco na obrázku 42b je testovací sestava pro měření vlastních frekvencí.



Obrázek 42 – a) model odlehčeného vzorku; b) testovací sestava pro zjištění oscilační odezvy

Váha referenčního plného vzorku byla 0,66 kg. Zatímco odlehčený vážil 0,28 kg. Tudíž plný vzorek byl 2,36 těžší než odlehčený. Pro měření vlastní frekvence bylo použito výrazně těžší břemeno o hmotnosti 12,95 kg, aby se mohly zanedbat hmotnosti vzorků. K měření kmitání bylo použito zařízení od Brüel & Kjaer: akcelerometr 4533-B-001, rázové kladivo 8206-003 a modul 3160-A-042. Frekvenční rozsah této měřicí soustavy je 0,2 Hz až 12,8 kHz a rezonanční frekvence akcelerometru je 38,7 kHz, což je daleko za hranicí vlastních frekvencí vzorků. Testované sestavy byly upnuty ve svěráku tuhého lože frézky. Akcelerometr byl připevněn k břemenu, 65 mm od horní hrany testovaných vzorků v jejich ose. Naměřené oscilační odezvy jsou patrné na obrázku 43.



Obrázek 43 – Oscilační odezva na budící sílu

Analýza kmitů objasňuje tlumící charakteristiky BCC topologie. Výsledky poukazují na lepší tlumící vlastnosti odlehčeného vzorku v dané sestavě v porovnání s plným vzorkem. Odezva je popsána pohybovou rovnicí tlumeného kmitání (4). Kde součinitel tlumení určuje rychlost útlumu.

$$A(t) = A_0 \cdot e^{-\gamma t} \quad (4)$$

A₀...amplituda

e... Eulerovo číslo

γ.....součinitel útlumu

t.....čas

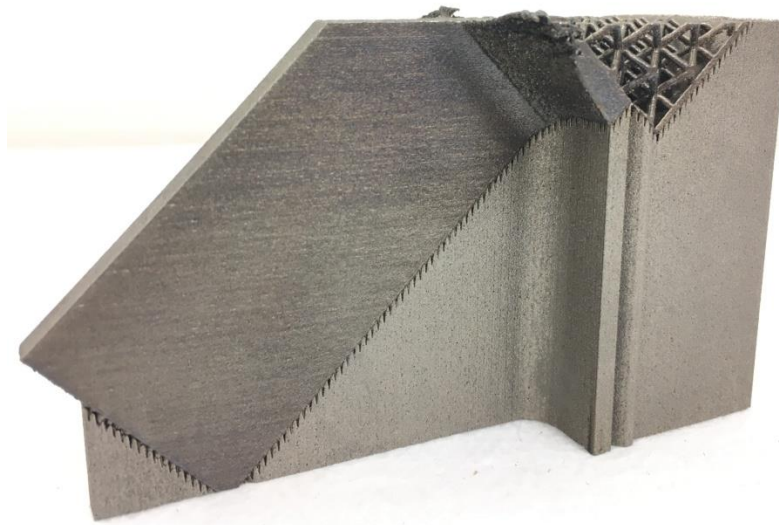
Plný vzorek měl součinitel tlumení roven 1,7, zatímco odlehčený vzorek 5,3. Z výsledku tedy plyne, že odlehčený vzorek s 2,36x nižší hmotností se započtením tuhé upínací části má 3,1x lepší útlum než plný vzorek. To znamená, že vzorek s lattice potřebuje 3,1% kratší čas do ustálení do stabilizovaného stavu bez oscilací.

Tento experiment tedy potvrzuje předpoklad zlepšení útlumových charakteristik „lattice“ struktury a tlumící vlastnosti mohou být dále zlepšeny vyplněním volného prostoru lattice strukturu viskoelastickým materiálem. Studie [25] potvrdila, že tímto byla efektivně snížena amplituda vzorku bez významného posunu vlastní frekvence vzorku. Vyplnění volného prostoru lattice ovšem zvyšuje hmotnost a je v rozporu s jednou z největších výhod implementace lattice struktur, a to snížení hmotnosti celé sestavy.

3.5 Optimalizace odlehčené obálky pro MAM

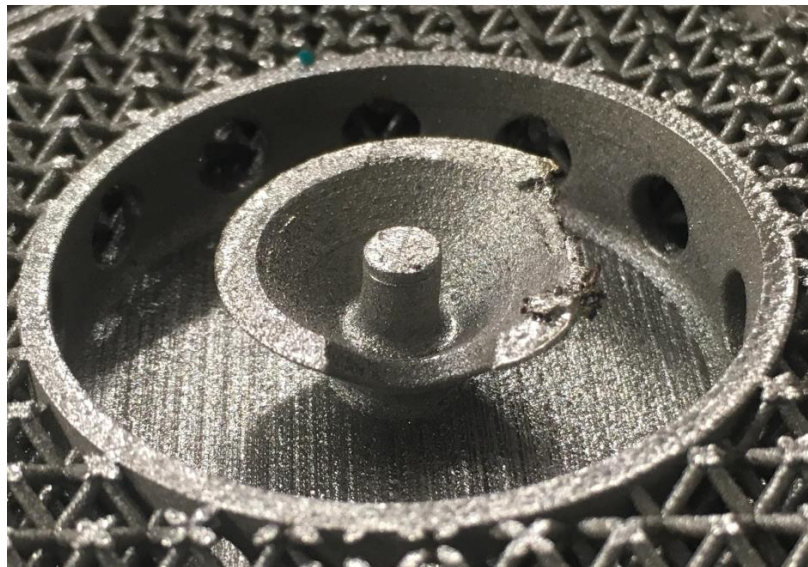
Geometrie obálky byla uzpůsobena pro aditivní výrobu. Byla hledána vyváženost mezi užitností tvaru pro účely frézování a vyrobitelností. Obálku lze označit za tenkostěnné těleso, které bude podepřeno z vnitřní části „lattice“ strukturou.

Tenké stěny, které svírají se stavební platformou všeobecně uznávaný samonosný úhel 45°, mohou být ovšem problematické na výrobu. Ačkoliv splňují jednu ze základních tiskařských pravidel. Jak demonstruje ukázka na obrázku 44, na kterém je stěna o tloušťce 2 mm a sklonu 45°. Na stěnu z odvrácené strany navazuje BCC topologie. Jak si lze všimnout hrana stěny se během tisku začala zvedat nad aktuálně tavenou vrstvou, což mělo za následek defekt a kolizi s nanášečem práškového lože, recoaterem.



Obrázek 44 – Vyhnutí hrany tenké stěna svírající „samopodpěrný“ úhel

Vzednutá hrana stěny je častá příčina defektů tištěných tenkostěnných dílů aditivní výrobou z kovu. Kritické je obzvláště prvotní místo dotyku tištěné oblasti dílu s recoaterem. Další ukázka je na obrázku 45. K přizvednutí hrany došlo v místě prvotního dotyku geometrie s recoaterem.

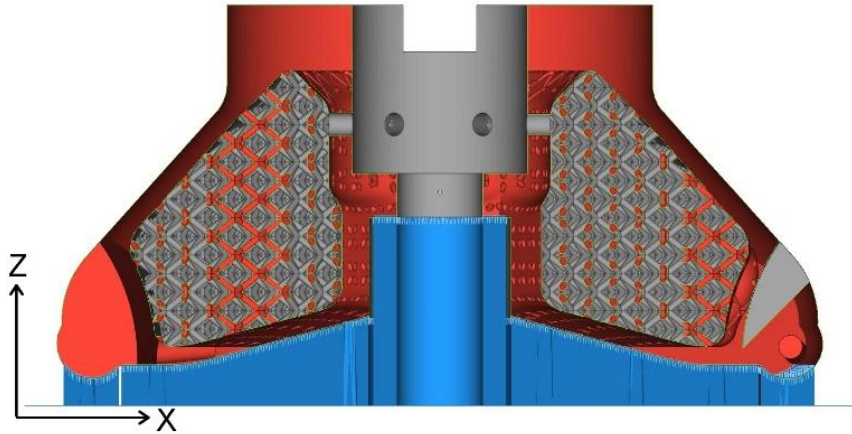


Obrázek 45 – Vada vzniklá přizvednutím hrany tenkostěnného tělesa

Fréza během její výroby bude polohována tak, že její osa bude kolmá na stavební platformu stroje. Tím je blíže docíleno ideálního stavu homogenity mechanických vlastností pro jednotlivá lůžka frézy, protože jednotlivé tavené vrstvy budou kolmé na její osu. Jde tedy o to, aby každé lůžko mělo v ideálním případě totožné vlastnosti jako všechna ostatní. Jiná poloha frézy by způsobila naklonění vrstev a každé lůžko by mělo jiné podmínky výroby, z případných ovlivňujících podmínek mohou být uvedeny rozdílná hladina výroby nebo orientace tisku.

Navržený tvar s technologickými podpěrami je zobrazen v řezu na obrázku 46. Celý koncept je navržen tak, aby jeho konstrukce byla samonosná, což snižuje nároky na množství

podpěrných struktur, a splňovala funkčnost. Jediná plocha, která vyžaduje technologické podpěrné struktury je spodní plocha frézy. Tyto struktury mají za úkol podepření plochy s malými úhly vůči platformě, ukotvují frézu ke stavební platformě a odvádějí teplo během výroby pryč z dílu do strojní platformy.



Obrázek 46 – Vada vzniklá přizvednutím hrany tenkostěnného tělesa

Dále byl na všechny plochy přidán technologický přírůstek pro finální obrobení vnějších ploch fréz a jejich lůžek. Aby bylo možné přesně obrobit lůžka a vyrobit závitové díry pro šrouby VBD. Byla také předtištěna díra s rovným dnem, což eliminuje vychýlení úzkého vrtáku o průměru 3 mm z osy předpokládané závitové díry. Toto řešení vzniklo v návaznosti s předešlými zkušenostmi spojené s obráběním lůžek.

4 Návrh odlehčené frézy

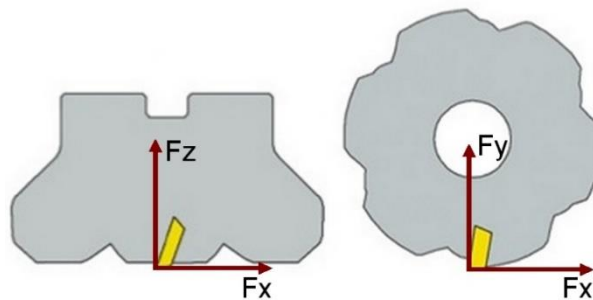
Vývoj řezných nástrojů je poháněn potřebou po produktivitě a efektivitě. Kontinuální zlepšování je v tomto ohledu nezbytné a počítačové simulace jsou v tomto ohledu velmi prospěšné. Pro odlehčenou frézu byla použita modifikovaná BCC topologie. Nicméně nalezení vhodné topologie se provádí na principu pokusu a omylu. [14] Výraznému zefektivnění je v tomto případě dosaženo zavedením analýz konečných prvků. Hodnoty napětí a posunutí jsou základními hodnotícími parametry, které jsou doplněné o analýzy vlastních frekvencí. Hodnoty napjatosti a posunutí jsou srovnány s výsledky plné frézy.

Než byla odlehčená fréza puštěna do výroby, byla její funkčnost ověřena pevnostními analýzami v programu OptiStruct, jehož jádro řešiče je založeno na Nastranu. Zasiťování modelu bylo provedeno pre-procesorem HyperMesh. Analýzy proběhly ve spolupráci s Advance Engineering, s.r.o. [24]

4.1.1 Výchozí řezné podmínky

Nastavení řezných podmínek má velký dopad na konečný výsledek obrábění. Existují obecná doporučení, která ovšem neberou v potaz celou řadu faktorů, jež mohou ovlivnit výsledek. Pro výchozí stav byly vybrány řezné podmínky z testování velikostně podobné frézy. Obráběný materiál, typ VBD a jejich nastavení jsou totožné. Pro predikci chování návrhu odlehčené frézy byly převzaté naměřené složky řezných sil.

Silové složky byly experimentálně změřené na fréze o stejném průměru, geometrií břitových destiček a obráběcími podmínkami pro prvotní experimenty. Řezné síly pro pevnostní analýzy byly vynásobeny koeficientem 2 kvůli zaručení bezpečnosti. Poté velikosti složek řezných sil byly následující: $F_x = 980$ N, $F_y = 550$ N a $F_z = 660$ N. Vektory řezných složek jsou zřejmé z obrázku 47. Řezné podmínky jsou uvedeny v tabulce 3.



Obrázek 47 – Složky řezných složek, upravený obrázek Sandvik

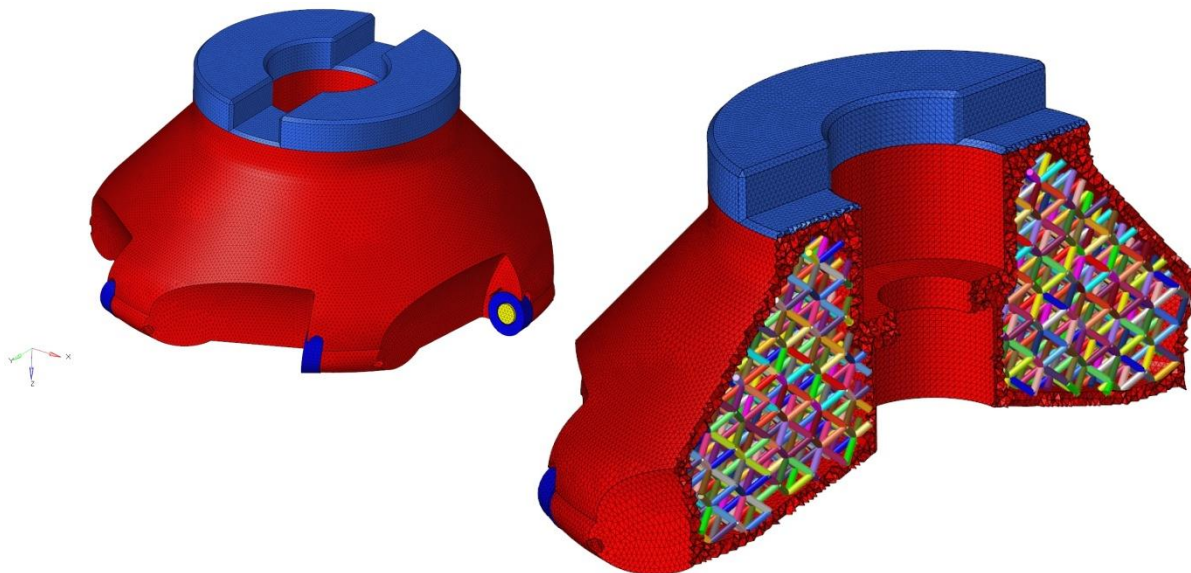
Tabulka 3 – Nastavení řezných podmínek

		Hodnota
Řezná rychlost	v_c [m/min]	20
Posuv na zub	f_z [mm]	0,18
Radiální hloubka řezu	a_e [mm]	37,5 mm (30% $\varnothing D$ frézy)
Axiální hloubka řezu	a_p [mm]	0,5
Úhel nastavení hlavního ostří	K_r [°]	Kruhová destička
Vnitřní tlak tech. kapaliny	p [MPa]	20
Koncentrace tech. kapaliny	Π [%]	6,5

4.1.2 Simulační výpočet frézy s lattice strukturou

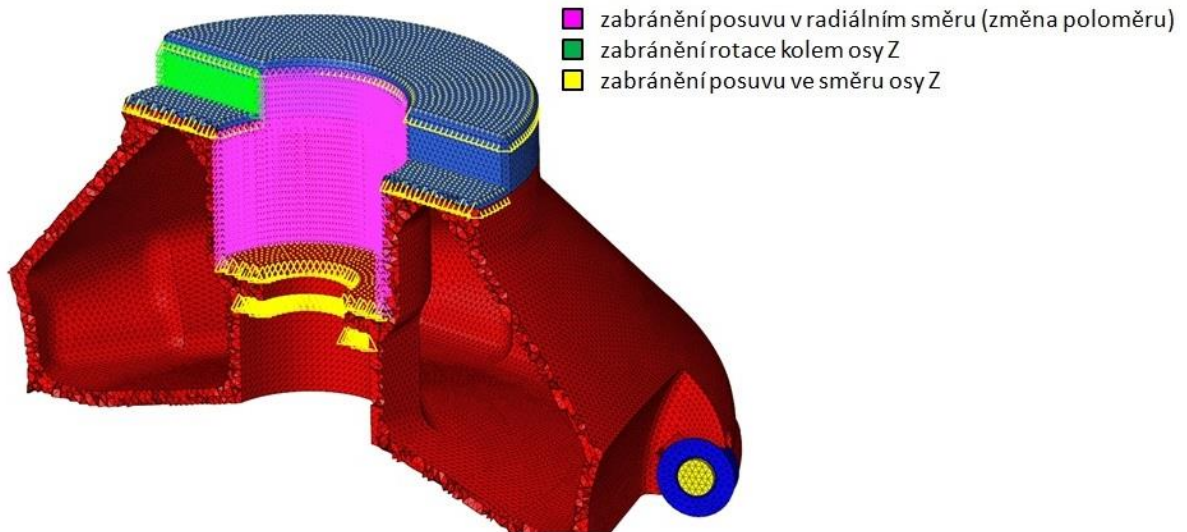
Cílem tedy bylo provést statickou analýzu v lineární oblasti deformací, která je uvnitř tvořena pravidelnou lattice strukturou, navrženou pro účely této rotační frézy. Pro vstup sloužila CAD data ve formátu STEP a byly uvedeny zatěžující podmínky.

Výpočetní model byl tvořen z 3D prvků TETRA4, což jsou čtyřstěny, pro veškerý objem kromě lattice části. Pro lattice část byly použity 1D prvky CBEAM. Takto navržený model značně šetří časovou a výpočetní náročnost analýz. Model složený výhradně z 3D prvků by významně navýšil nároky na tyto prostředky (tj. na výpočetní čas a výkon). Zasiťovaný model je na obrázku 48.



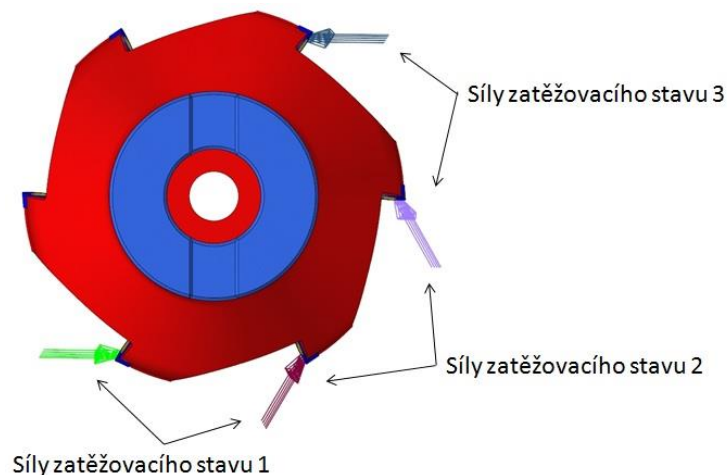
Obrázek 48 – Výpočetový model tvořený z 3D a 1D prvků

Na hranicích mezi jednotlivými komponentami byly modelovány TIE kontakty, které zaručují přenos smykových i normálových sil. Stejně tak zaručují, aby i vzájemná pozice kontaktních ploch zůstala zachována. Uchycení modelu na straně vřetena frézovacího stroje bylo provedeno podle okrajových podmínek (dle obrázku 49), které simulovaly rotačně symetrickou úlohu.



Obrázek 49 – Vazby pro rotačně symetrickou úlohu mezi frézou a upínačem do vřetene

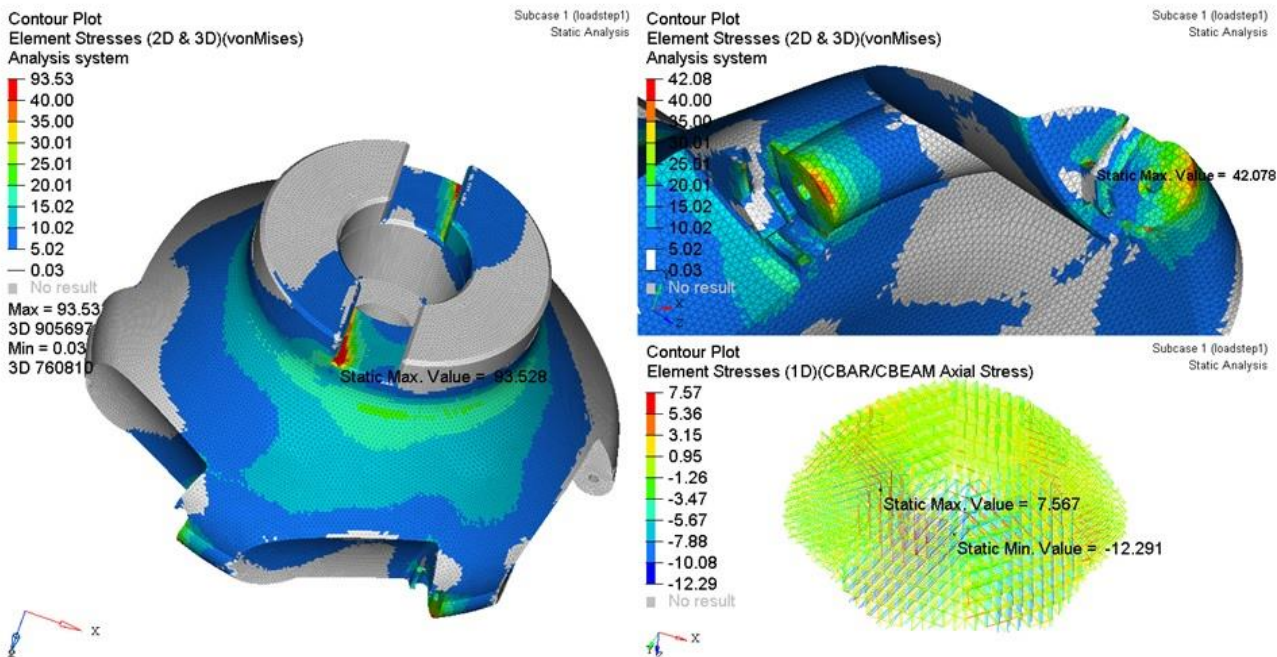
Zatížení bylo na model vneseno podle tabulky 3. Celkem byly uvažovány tři zatěžovací stavy. Ve všech bylo uvažováno stejné silové zatížení na dva sousední řezné břity. Rozdíl byl v poloze párů břitů vůči poloze drážky pro unášecí kameny.



Obrázek 50 – Uvažované zatěžující stavy

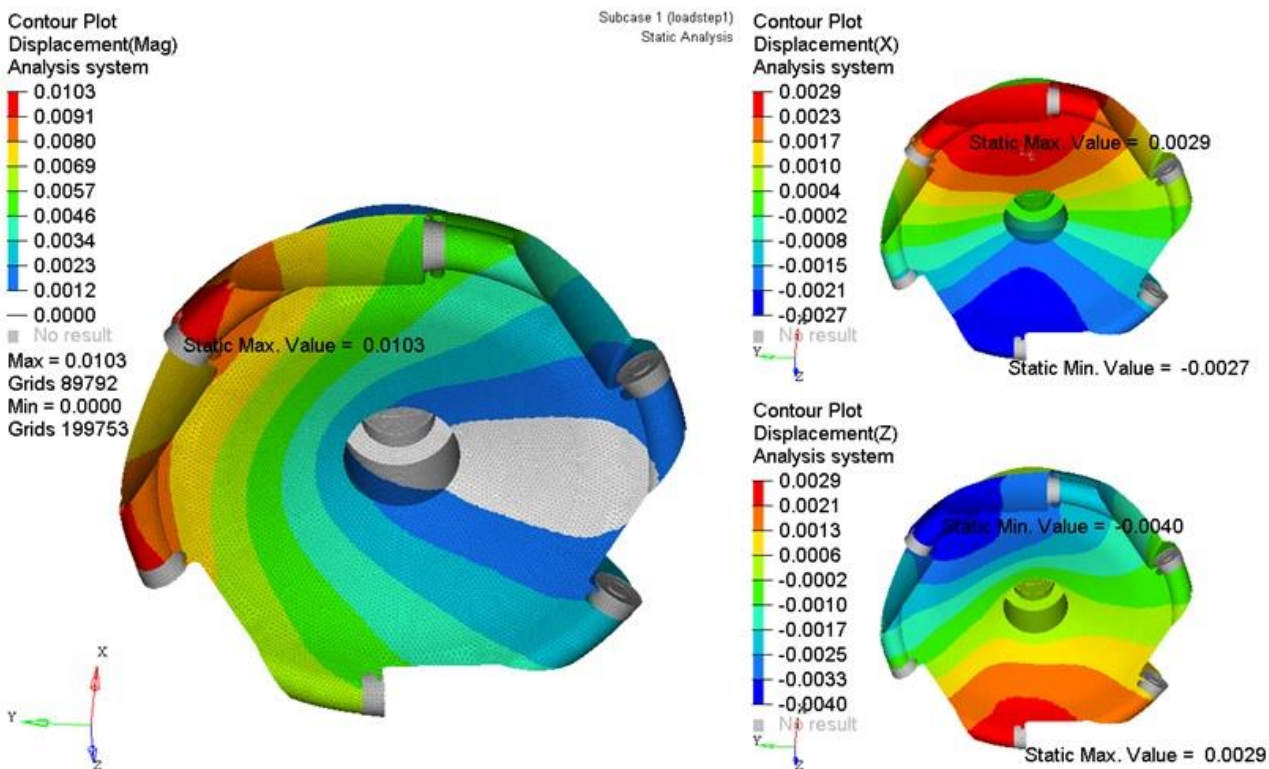
Výstupem ze statické analýzy provedené v programu OptiStruct byla pole posuvů a napětí. Přičemž napětí na VBD a jejich uchycení šroubem nebylo vyhodnocováno. Napěťové stavy a pole posuvů jsou patrné z rozložení polí na následujících obrázcích. Souhrn výsledků pro všechny zatěžující stavy je v Příloze č. 1: *Výsledky zatěžujících stavů pevnostních analýz odlehčené frézy.*

Zatěžovací stav 1:



Obrázek 51 – Napětové rozložení v prvním uvažovaném zatěžujícím stavu

Zatěžovací stav 1:

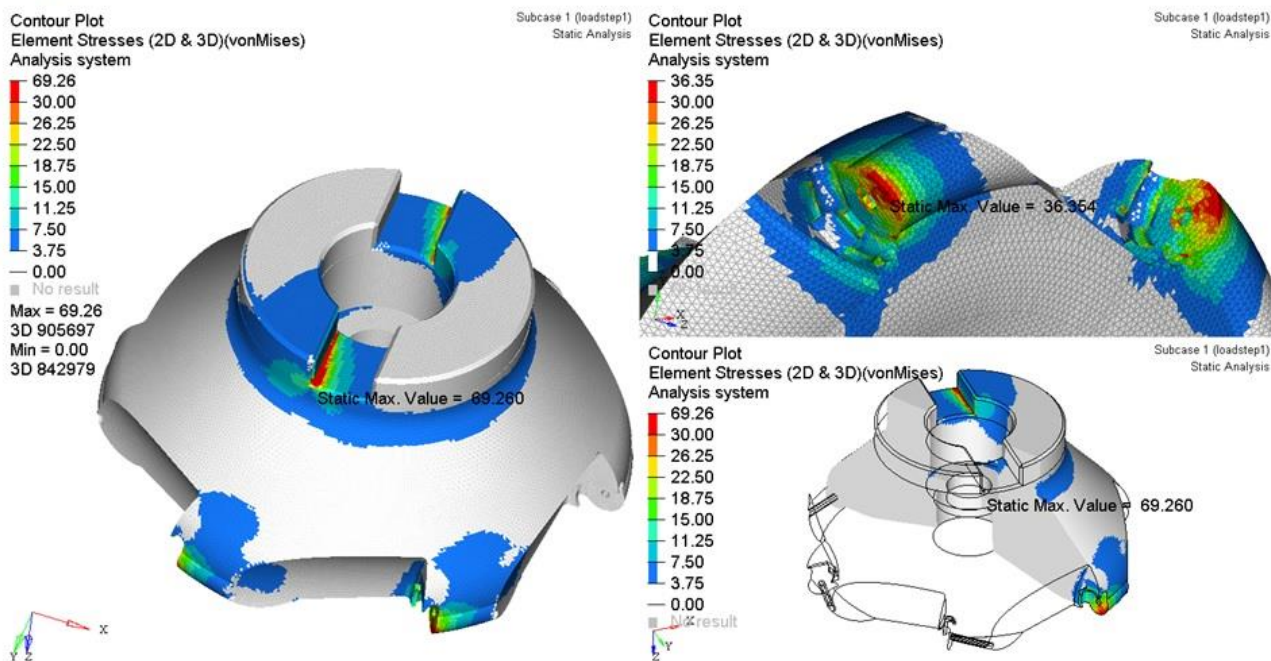


Obrázek 52 – Pole posunů pro první uvažované zatěžující stav

4.1.3 Simulační výpočet plné frézy

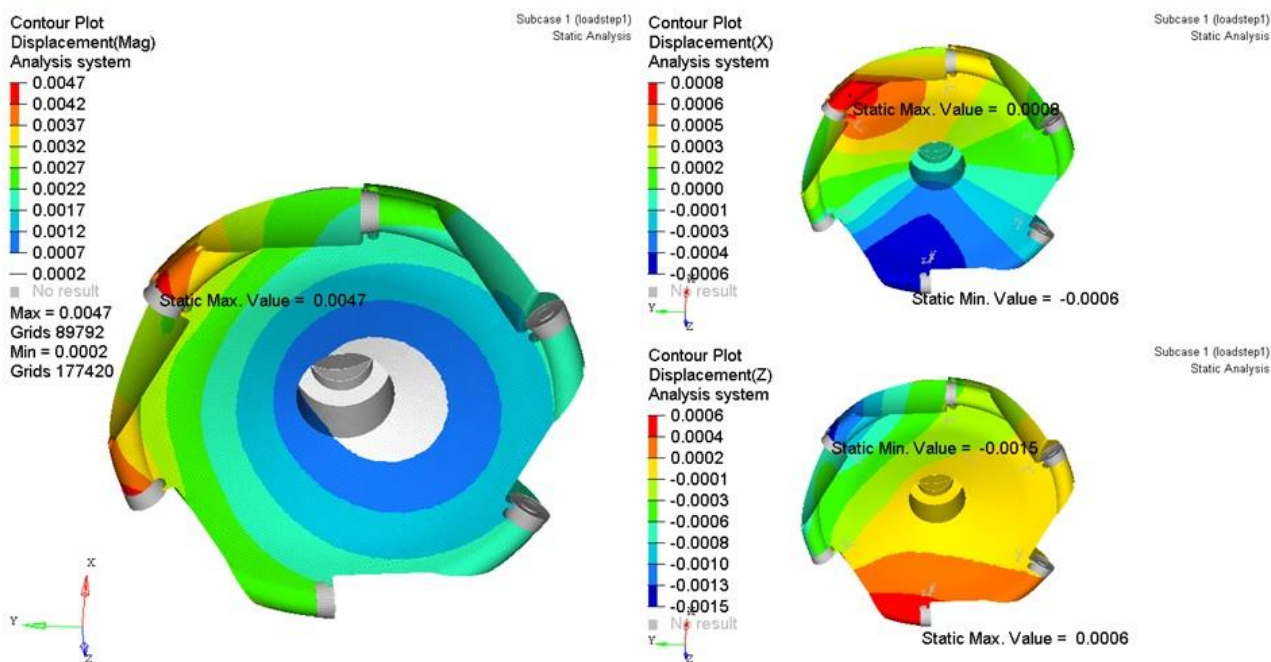
Analýza byla doplněna o srovnávací výpočet plné verze frézy. Všechny parametry, jako okrajové podmínky, kontakty a zatížení, včetně postupu výpočtu zůstaly zachovány. Napětový stav vybraného zatěžujícího stavu je na obrázku níže. Dále navazuje obrázek polí posuvů.

Výpočetní model II - zatěžovací stav 1:



Obrázek 53 – Napětové rozložení v prvním zatěžujícím stavu plné frézy

Výpočetní model II - zatěžovací stav 1:



Obrázek 54 – Pole posuvů pro první zatěžující stav plné frézy

4.1.4 Závěrečné zhodnocení analýz

Všechny tři zatěžovací stavy u odlehčené frézy vykazují podobné chování v rámci posuvů a deformací. Maximálního napětí 93,5 MPa bylo dosaženo v oblasti nasazení hlavy na upínací trn. V místě VBD dosahuje maximální napětí hodnot 42,5 MPa. Napětí na „lattice“ struktuře v prvním zatěžujícím stavu dosahovalo 12,6 MPa, ovšem ve styčnicích může toto napětí dosáhnout až čtyřnásobku, 50,4 MPa.

Pro referenční plnou frézu platí, že všechny tři zatěžovací stavy vykazují podobné chování v rámci posuvů a deformací. Maximálního napětí 71,3 MPa bylo dosaženo opět v oblasti nasazení hlavy na upínací trn. V místě VBD dosahuje maximální napětí hodnot 36,5 MPa.

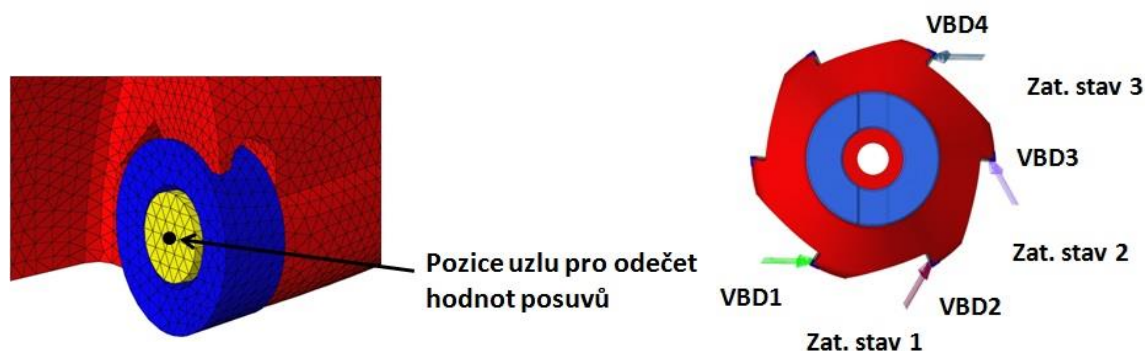
Přímé srovnání poodhalí, že u modelu s „lattice“ strukturou dochází v oblasti upínání trnu k vyšším napětím než u plné varianty. Nárůst špičky napětí u „lattice“ varianty činí 31% oproti plné variantě. V oblasti VBD je pak nárůst celých 16%. Na základě těchto výsledků byl splněn předpoklad, že plná varianta je tužší a bude vykazovat nižší deformace než odlehčená varianta.

Nižší tuhost odlehčené frézy je dobře patrná z hodnot posuvů pro první zatěžující stav. Zde je deformace v ose Z pro „lattice“ variantu nižší, nicméně v radiálním směru je deformace pro odlehčenou frézu řádově vyšší. Dosažené hodnoty posuvů jsou zobrazeny v následující tabulce. Hodnoty posuvů jsou naměřeny na středu šroubu (viz obrázek 55).

Tabulka 4 – Hodnoty posuvů pro zatěžující stavy

Model	Zatěžující stav	VBD 1		VBD 2		VBD 3		VBD 4	
		r	z	r	z	r	z	r	z
Lattice	1	-0,958	-0,270	1,891	-3,585				
	2			-0,937	-0,440	1,986	-3,326		
	3					-0,878	-0,162	1,970	-3,419
Plná	1	-0,007	-0,378	0,575	-1,098				
	2			0,071	-0,553	0,521	-0,899		
	3					-0,011	-0,319	0,514	-0,925

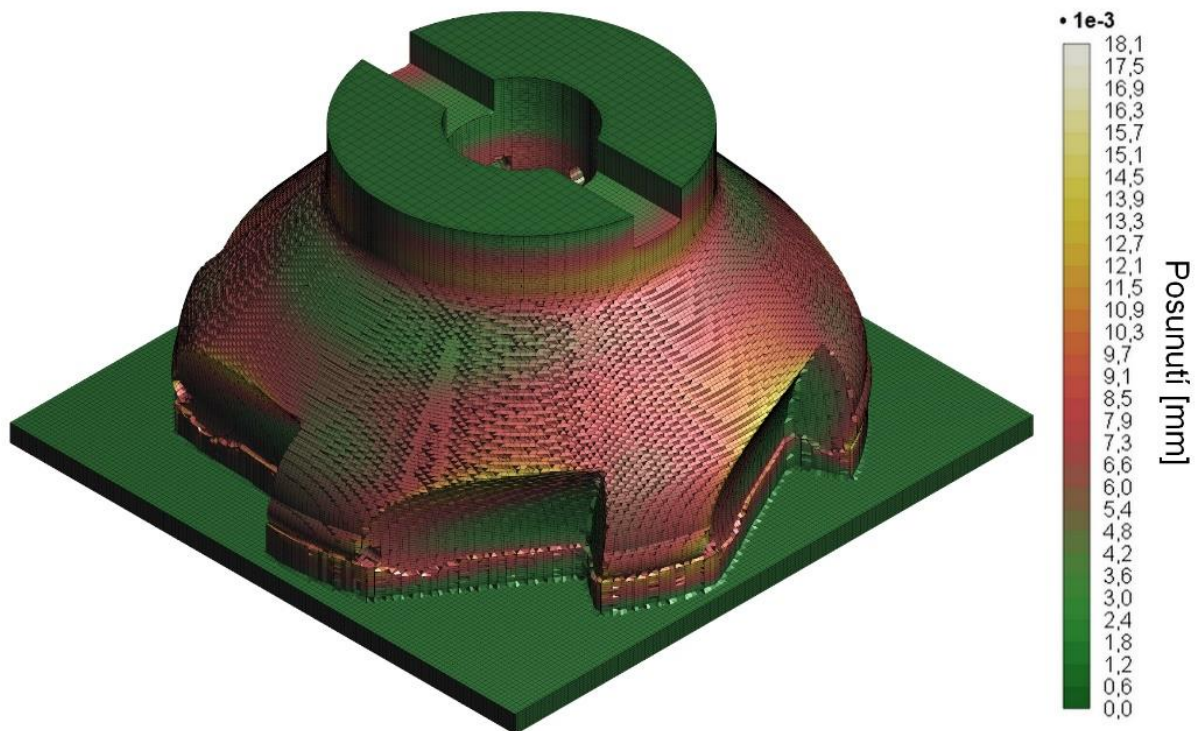
Pozn.: hodnoty jsou udány v μm
r – posuv v radiálním směru (změna poloměru)
z – posuv ve směru osy z



Obrázek 55 – Náměry posuvů vztahy k ose šroubu a zatěžovací stavy

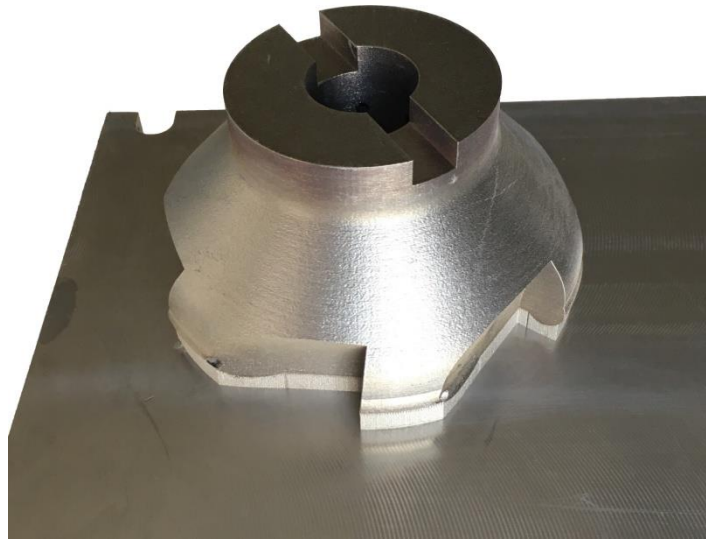
4.2 Výroba odlehčené frézy

Návrh odlehčené frézy „lattice“ strukturou byl analyzován na možný výskyt defektů při výrobě. Analýza byla provedena v programu Amphyon, přičemž byl využit již předdefinovaný profil, který tento program nabízí pro výrobní stroj EOS M290 a vstupní materiál 1.2709 dle evropské klasifikace. Vypočtené posuvy (maximum 0,02 mm) se nevymykají hodnotám obvyklým pro takto rozměrné těleso. Tudíž návrh s modelem dle obrázku 46 je vhodný pro zvolenou technologii výroby s minimálním rizikem vzniku defektů.



Obrázek 56 - Výpočetní model vyrobitelnosti navržené tiskové úlohy pro 3D tisk

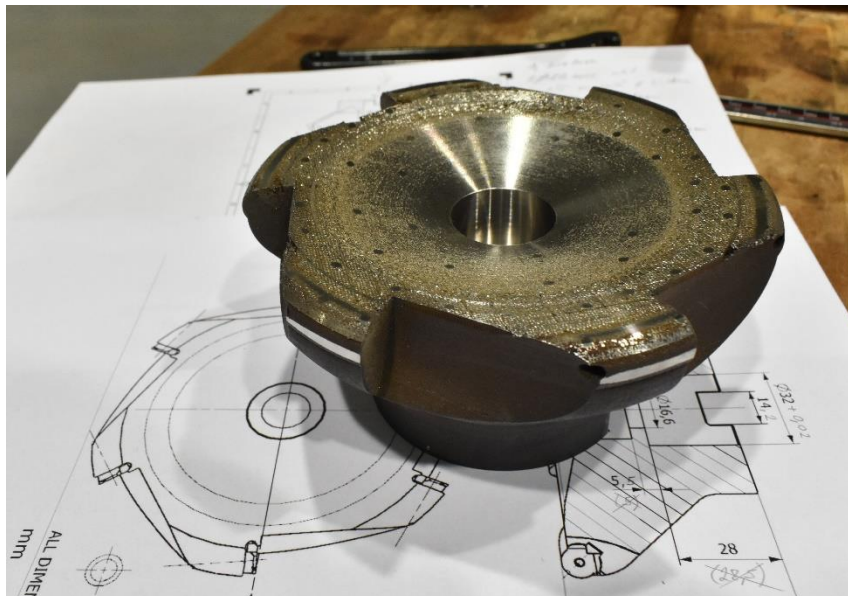
Výroba byla uskutečněna na výrobním zařízení EOS M 290 se sériovým číslem 2071. Nastavení výrobních podmínek bylo následující. Jako profil použitý pro tavení kovového prášku byl použit defaultní set pro materiál EOS MaragingSteel MS1, jehož parametry pro tavení core jsou výkon laseru 285 W a rychlost skenování 960 mm/s. Tloušťka vrstvy byla 40 μ m. Výsledný vytištěný díl je na obrázku 57. Fréza byla odříznuta od strojní platformy pásovou pilou a následně byly její plochy obrobena na čistý rozměr dle následujícího postupu.



Obrázek 57 – Vytištěná fréza s technologickými přídávky pro dodatečné obrobení

4.2.1 Postup obrobení odlehčené frézy

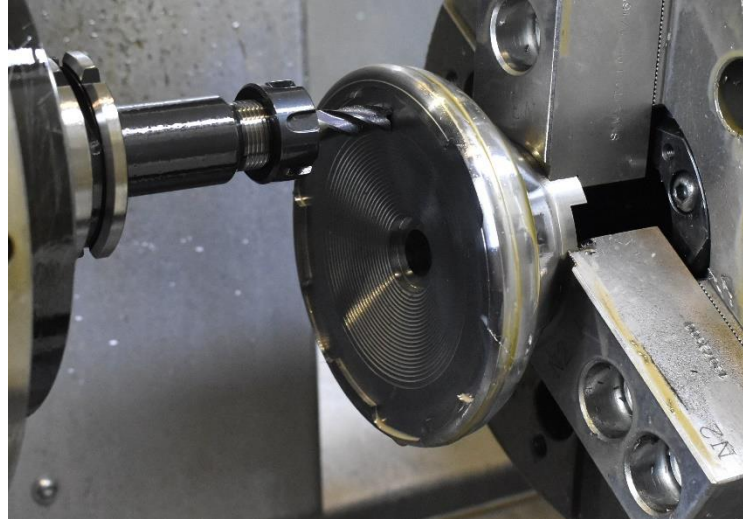
Tělo frézy bylo uchyceno do sklíčidla za průměr 70,3 mm, jeho osa byla vystředěna podle úchylkoměru, přičemž bylo dosaženo házení do 0,1 mm. V tomto upnutém stavu byl přesně obroben $\varnothing 26$ mm se dnem díry a průchozí dírou o $\varnothing 16,6$ mm. Dále byl sražen nejvyšší průměr frézy a přilehlá oblast z čela tak, aby vznikla dostatečná ploška pro přesné přeupnutí. Také byly soustružením sraženy technologické podpurné struktury 3D tisku. Pro tyto operace byl použit číslicově neřízený soustruh Rudý proletář 16K20. Čistá váha bez podpor je 1.83 kg. Pro následující operace byl použit CNC soustruh DMG MORI CTX beta 1250 TC.



Obrázek 58 – Obrobené plochy pro upnutí vytištěného polotovaru

4.2.2 Postup obrobení odlehčené frézy

Po upnutí do sklíčidla stroje byla obrobena vnější kontura na čistý rozměr. V následující operaci byl použit vrták o $\varnothing 26$ mm pro předhrubování díry a následně tato díra byla soustružnickým nožem pro vnitřní průměry obrobena na čistý rozměr 32,02 mm. Drážky pro unášecí kameny trnu byly obrobena frézou o $\varnothing 10$ mm.



Obrázek 59 – Hrubovací operace čela frény ze strany VBD

Pro zachování co nejvyšší souososti byl polotovár frény převzat příslušným cyklem do protivřetena. Čelo frény ze strany VBD bylo předhrubováno frézou o $\varnothing 10$ mm a soustružnickým nožem byl obrobena tento povrch na finální rozměr. Navrtávák připravil vedení pro vrták o $\varnothing 3,3$ mm, který dokončil otvor pro odlehčení VBD. Jako poslední byla dokončena lůžka pro VBD. Podobným postupem byla vyrobena i plná fréza s tím rozdílem, že polotovarem pro její výrobu byla kulatina z materiálu 42CrMoS4 (15 142 dle ČSN) o $\varnothing 130$ mm a délky 85 mm.

4.3 Experimentální ověření

Ověřování funkčnosti odlehčené frény bylo provedeno během obrábění obrobku z IN718. Hodnotícími parametry byly zvoleny rezné síly, povrchová drsnost a míra opotřebení břitu kruhové vyměnitelné destičky.

4.3.1 Stroj

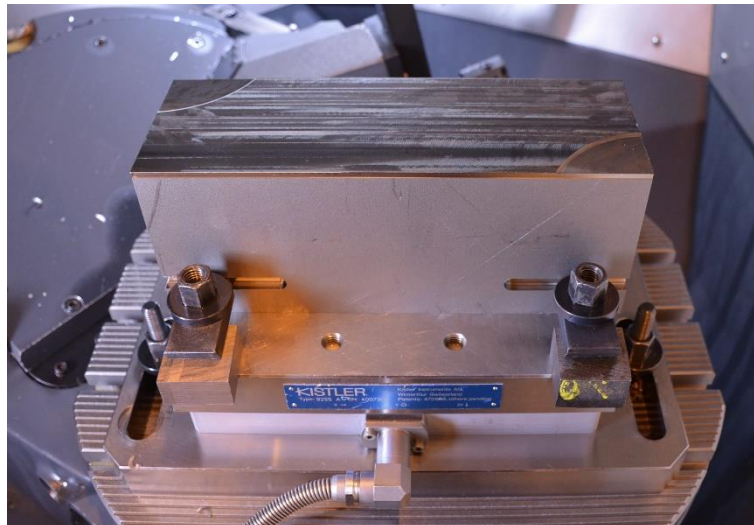
Pro experimentální testování bylo použito frézovací centrum DMG MORI DMU 40 eVo linear. Stroj je pravidelně servisován, a jelikož se nevyužívá pro velkosériovou výrobu, je ve velmi dobrém technickém stavu.



Obrázek 60 – DMG MORI DMU 40 eVo linear [4]

4.3.2 Nástroj a obrobek

Pro upnutí obrobku o hmotnosti 49 kg byly použity upínky. Pro upnutí fréz do stroje byl použit stejný typ upínače HSK-A63 s příčnou unášecí drážkou. Na protilehlé strany obrobku bylo vyfrézováno odlehčení tak, aby fréza zajížděla do jmenovitého průměru frézy a byl tak eliminován vliv způsobu nájezdu na trvanlivost břitu VBD.



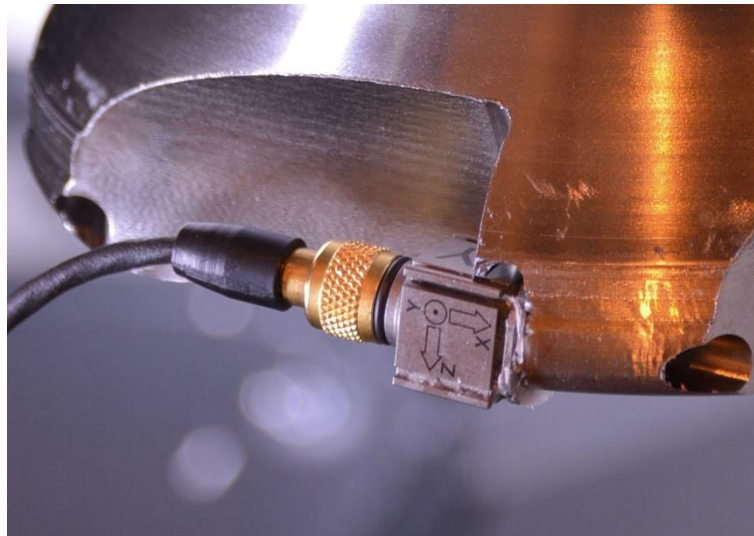
Obrázek 61 – Upnutý obrobek na dynamometru s vyfrézovaným vybráním pro najetí frézy do průměru 125 mm

Na odlehčenou frézu byly přes šroubky usazeny kruhové destičky. Odchylky v rozměrech a úhlech vyrobených fréz od modelové předlohy byly změřeny pomocí univerzálního měřicího zařízení Zoller Genius 3. Ze změřených hodnot bylo stanoveno házení VBD v radiálním a axiálním směru. V radiálním směru byla maximální absolutní odchylka řezných hran vyhodnocena na 0,069 mm (pro plnou frézu 0,124 mm) na poloměru frézy. Zatímco v axiálním směru byl naměřen nejvyšší rozdíl mezi VBD 0,069 mm (pro plnou frézu 0,041 mm). Tyto odchylky jsou způsobené převážně tím, že se jedná o prototypovou výrobu. Vytvořený CNC program a použité nástroje včetně zvolených provozních podmínek nemusí zcela odpovídat požadavkům obráběného materiálu.

4.3.3 Naměřené hodnoty

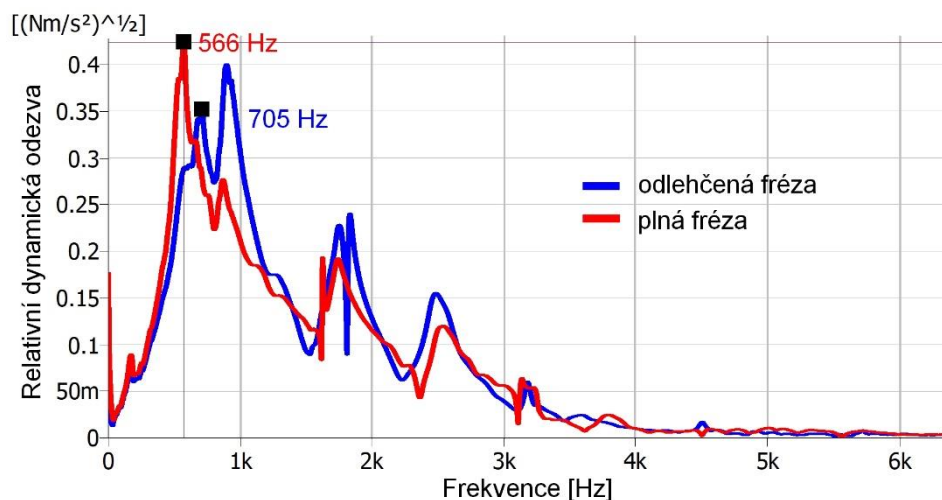
Vlastní frekvence

Měření rezonančních kmitočtů bylo provedeno ve vřetenu frézovacího centra DMG MORI DMU 40 eVo linear. K měření kmitání bylo použito zařízení od Brüel & Kjaer. V jeho sestavě byl použit tří složkový akcelerometr 4524B, rázové kladivo 8206-003 a modul 3160-A-042. Frekvenční rozsah této měřicí soustavy je 0,2 Hz až 12,8 kHz a rezonanční frekvence akcelerometru je 18 kHz pro směr x , což je daleko za hranicí vlastních frekvencí měřených fréz. Tudíž se jednalo o vyhovující měřicí soustavu pro měření frekvencí. Akcelerometr byl připevněn voskem v oblasti VBD lůžek. Orientace os akcelerometru byla dle obrázku 62.



Obrázek 62 – Umístění a orientace troj-složkového akcelerometru

Naměřené oscilační odezvy jsou na obrázku 63. První rezonanční frekvence odpovídá řezné rychlosti 7050 m/min pro odlehčenou variantu frézy. Plná fréza měla rezonanční frekvenci posazenou o $\frac{1}{4}$ níže. Což odpovídá řezné rychlosti 5660 m/min. V každém případě jsou tyto řezné rychlosti daleko nad provozními. Vlastní frekvence nastává při nižších frekvencích u plné frézy než u odlehčené varianty.

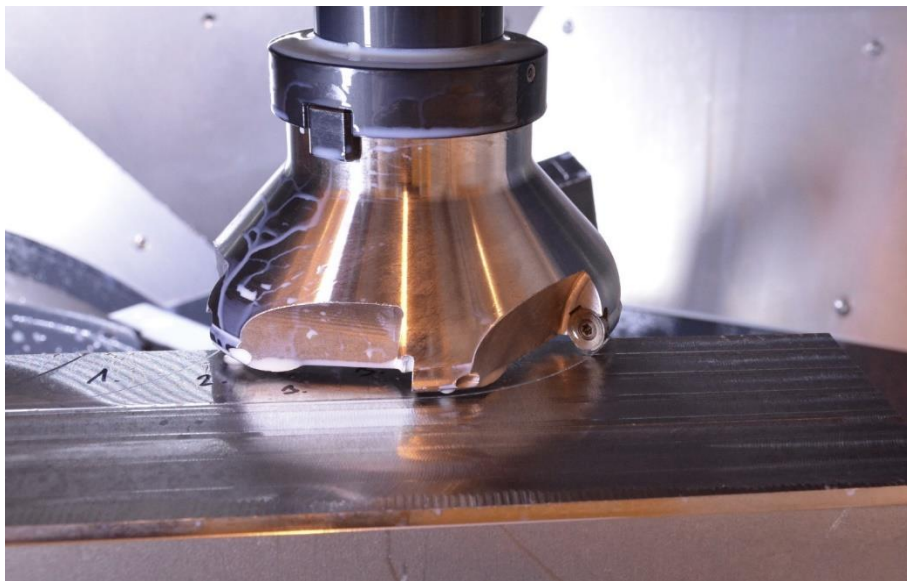


Obrázek 63 - Naměřené oscilační odezvy

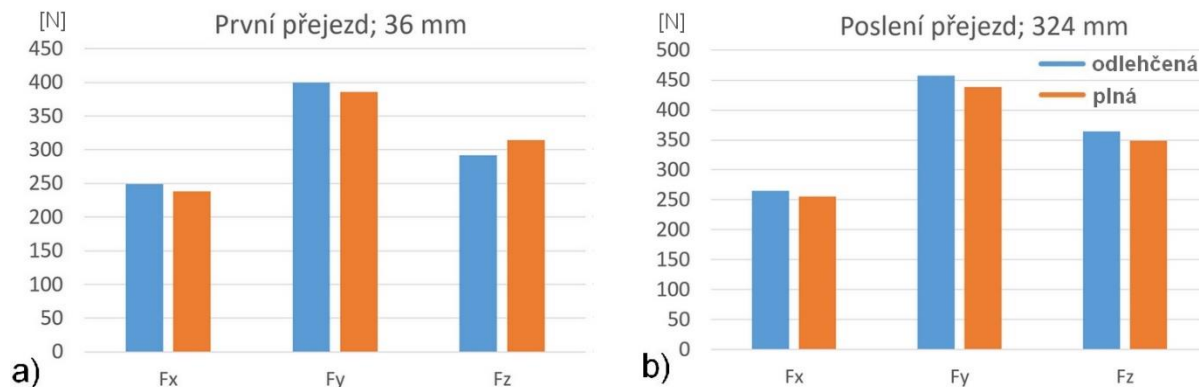
Řezné síly a opotřebení břitu VBD

Pro měření silových složek během obrábění byl použit dynamometr KISTLER typu 9255. Experiment měl dvě fáze. V první fázi byly použity řezné podmínky dle Tabulky 3. Přičemž frézovací hlava byla osazena pouze 1 VBD a záběr byl redukován na 30%. Radiální hloubka řezu a_e byla tedy 37,5 mm. Míra opotřebení břitu byla měřena po 4 minutách, tj. po ujetí 36 mm vzhledem k řezným podmínkám. Naměřené hodnoty složek řezné síly F_x , F_y a F_z jsou uvedeny na obrázku 65. Průběh opotřebení v průběhu experimentu je zaznamenán na obrázku 66. Míra opotřebení byla měřena mikroskopem Blickle Multicheck PC500.

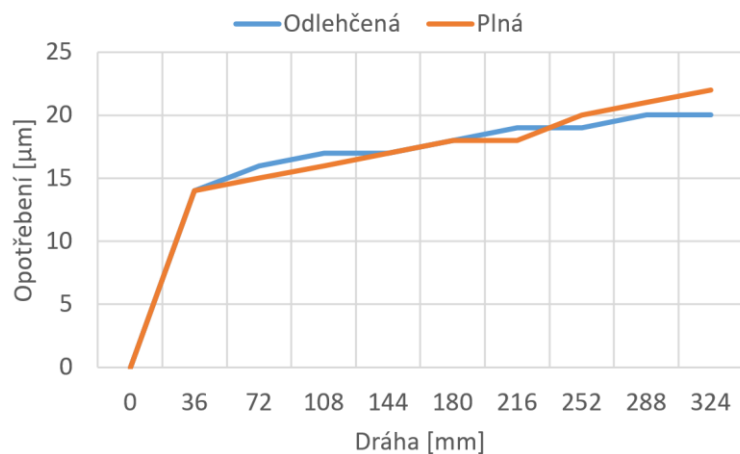
Složky řezných sil u obou variant jsou si velmi podobné. Nepatrné rozdíly v hodnotách mohou být způsobeny nejistotami měření. Velmi podobný u obou variant byl i průběh opotřebení sledované řezné hrany VBD.



Obrázek 64 – Frézovací hlava nad obrobkem z IN718



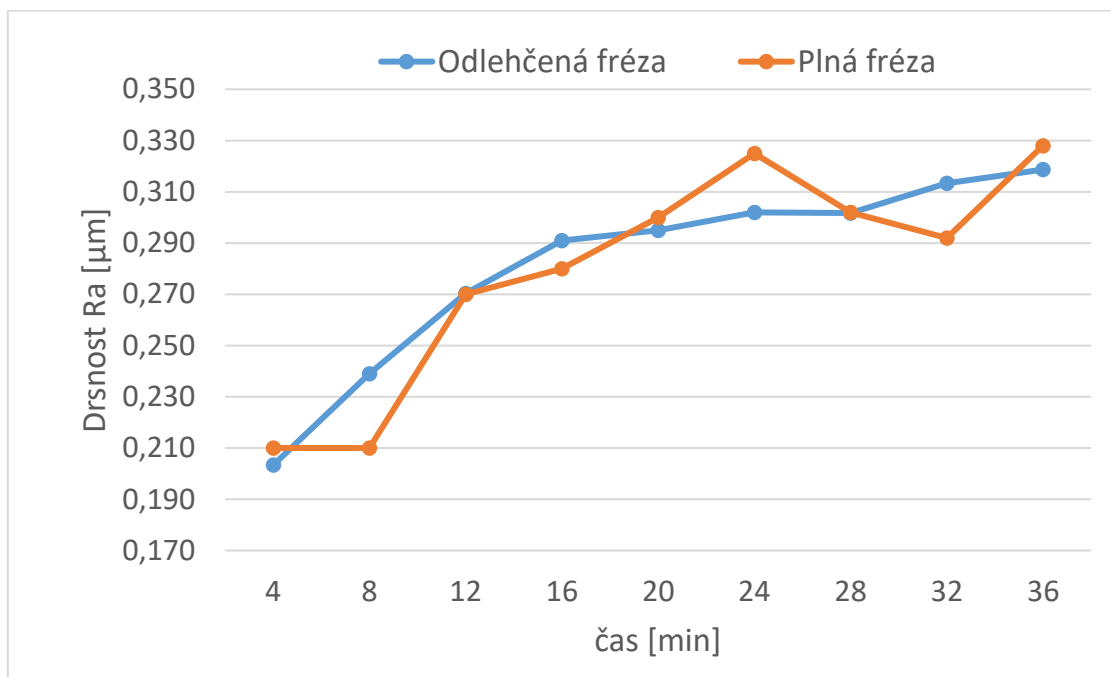
Obrázek 65 - Složky řezných sil; a) při prvním přejezdu; b) při posledním přejezdu



Obrázek 66 - Průběh opotřebení řezného břitu

Kvalita obrobeného povrchu

Parametry obrobeného povrchu byly po každém ujetí kontrolní vzdálenosti měřeny přenosným drsnoměrem Mahr MarSurf M 300 s 5 µm hrotem. Hodnota RSm není ve většině případů nižší než 130 µm, což značí vhodně zvolený průměr hrotu. Pro nižší hodnoty je vhodnější použít průměr hrotu 2 µm. Naměřené hodnoty jsou na obrázku 67.



Obrázek 67 - Drsnost obrobeného povrchu

Ve druhé fázi byla fréza osazena plným počtem VBD. V tomto případě byla hodnota záběru 70%, což je 90 mm. Tato fáze byla ovšem jen doplňková a výsledky byly zatížené výrobními odchylkami, které vznikly během obrobení lůžek VBD. Míra házení lůžek je patrná z průměrů řezné hrany VBD vůči ose frézy (radiální házení) a z axiální vzdálenosti od souřadnicového systému měřícího stroje, jež byl Zoller Genius 3.

Tabulka 5 - Změřená házení lůžek

	Odlehčená fréza		Plná fréza	
	RAD [mm]	AXIAL [mm]	RAD [mm]	AXIAL [mm]
1. VBD	64,746	122,058	64,814	122,063
2. VBD	64,717	122,056	64,705	122,046
3. VBD	64,677	122,035	64,711	122,022
4. VBD	64,678	122,048	64,690	122,022
5. VBD	64,743	122,104	64,744	122,057
6. VBD	64,742	122,068	64,719	122,045

4.3.4 Vyhodnocení

Na základě řezných podmínek byla stanovena doba, po kterou byl řezný břit v řezu. Tato doba byla stanovena na 0,221 vteřiny z empirického vztahu dle vzorce (5).

$$\omega = \frac{v}{r} = \frac{\varphi}{t}; \quad [rad/s] \quad (5)$$

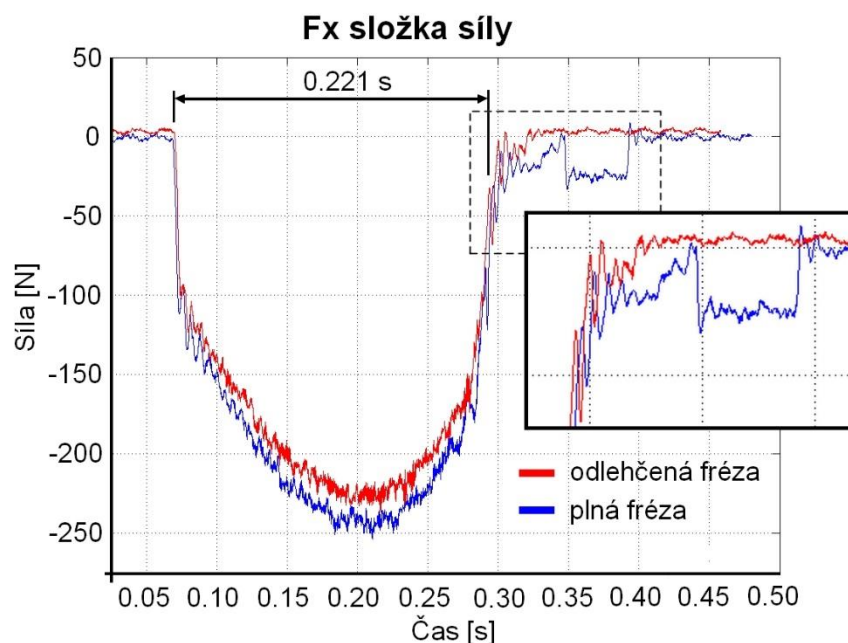
ω úhlová rychlost

v rychlost

r poloměr frézy

φúhel opásání (TEA)

Analýza složky F_x řezné síly detekovala anomálie mimo úhel opásání, jak je znázorněno na obrázku 62. Podobné chování bylo sledováno i v ostatních složkách řezné síly F_y a F_z . Tento silový výchvív může být následkem nižší tuhosti odlehčené verze frézy a anomálie je záznamem relaxace elastické deformace, která vznikla napružením frézy v oblasti řezu.



Obrázek 68 - Průběh řezné složky F_x

S plným počtem osazených VBD je důležitá přesnost obrobení jednotlivých lůžek pro VBD. Během změření radiálního a axiálního házení (viz tabulka 5) byla zjištěna maximální odchylka ve velikosti 0,069 mm pro oba směry, což představovalo 38% hodnoty posuvu na zub. Proto výsledky experimentu s plným počtem VBD nejsou věrohodné a nebudou uvedeny.

Výstupem tohoto experimentu jsou upřesněné silové složky, kterým je vystavena fréza s definovanými parametry. Tyto složky budou sloužit jako vstup pro pevnostní analýzy nových úprav na těle frézy a pro vznik úplně nových variant.

Dále je z experimentu zřejmé, že dosažená přesnost obrobení lůžek je nedostatečná vzhledem k záměru použití a budou hledána opatření k zabezpečení dostatečné přesnosti výroby.

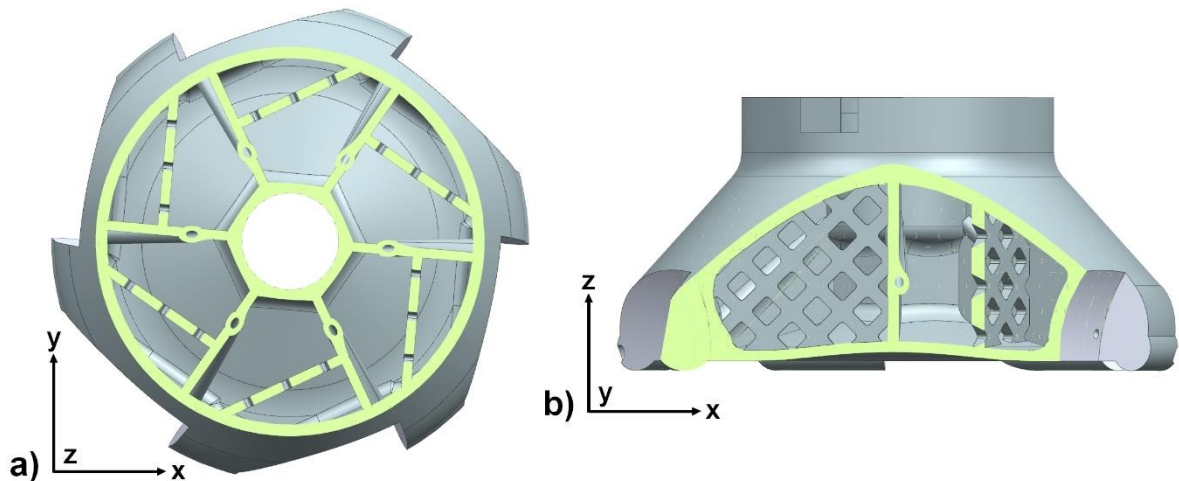
5 Další variace návrhu odlehčené frézy

5.1 Varianty návrhů

Srovnávací varianta

Pro další variantu frézy byla navržena varianta s příčkami uvnitř frézy. Pro návrh byla využita stávající obálka frézy. Mezi sousedními clustery byla vložena plná příčka o tloušťce 2,5 mm. Do této stěny na rozhraní clusterů byly začleněny chladicí kanálky. Toto řešení je výhodné pro případné budoucí vyplnění lattice strukturou, jelikož není v tomto případě nutné řešit plynulé navázání příčniců lattice struktury na rozhraní clusterů.

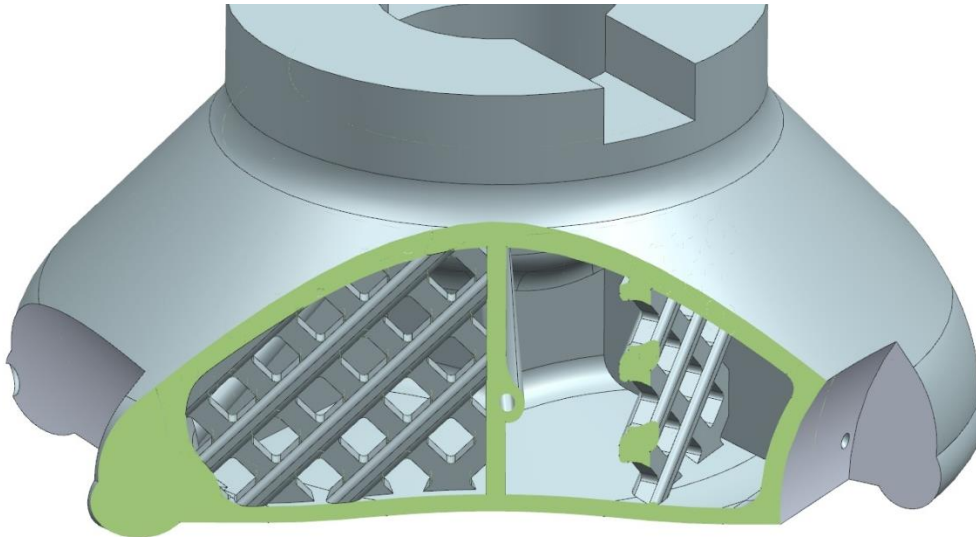
Do prázdného prostoru clusteru byla orientována perforovaná příčka v co nejbližším směru naměřeného vektoru řezné síly v rovině xy a zároveň tak, aby byla rovnoběžná s osou z . Polohování a způsob perforace je znázorněn na obrázku 69. Perforace příčky je vytvořena z důvodu možnosti vysypání kovového prášku ze všech dutin frézy. V další variantě bude příhradová konstrukce příčky geometricky optimalizovaná.



Obrázek 69 – Geometrie varianty A; a) řez v rovině XY; b) řez v rovině perforované příčky

Vstupní varianta 1

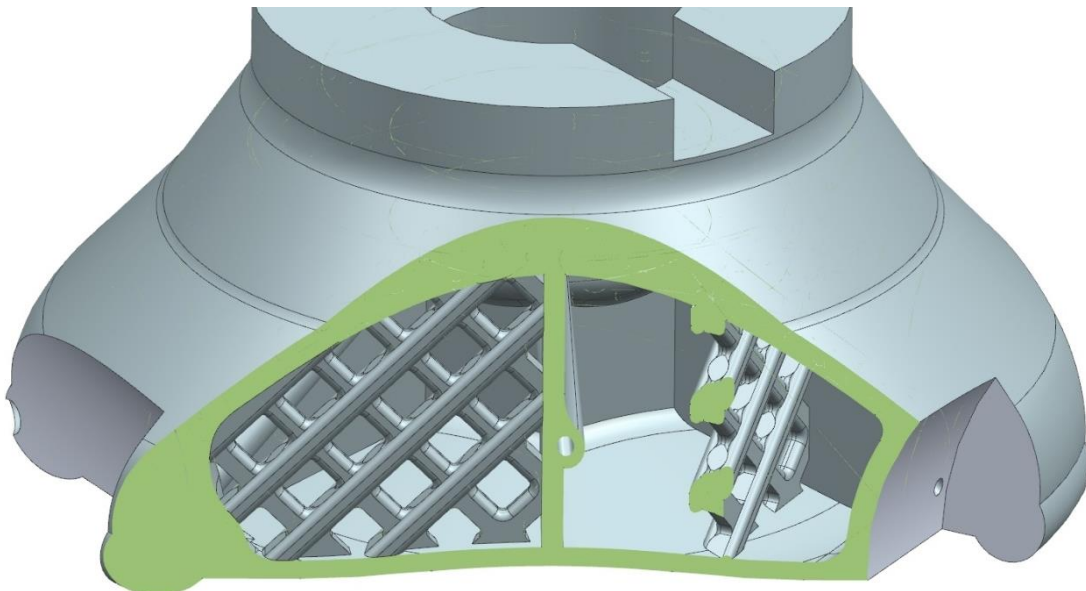
Tato varianta vznikla úpravou perforované příčky, u které byly zesílené styčníky ve směru lože VBD do obálky. Jakým způsobem to bylo provedeno, blíže vysvětluje obrázek 64. Tato varianta zvyšuje hmotnost o 3%.



Obrázek 70 – Pozměněná geometrie příčky napříč klastry

Vstupní varianta 2

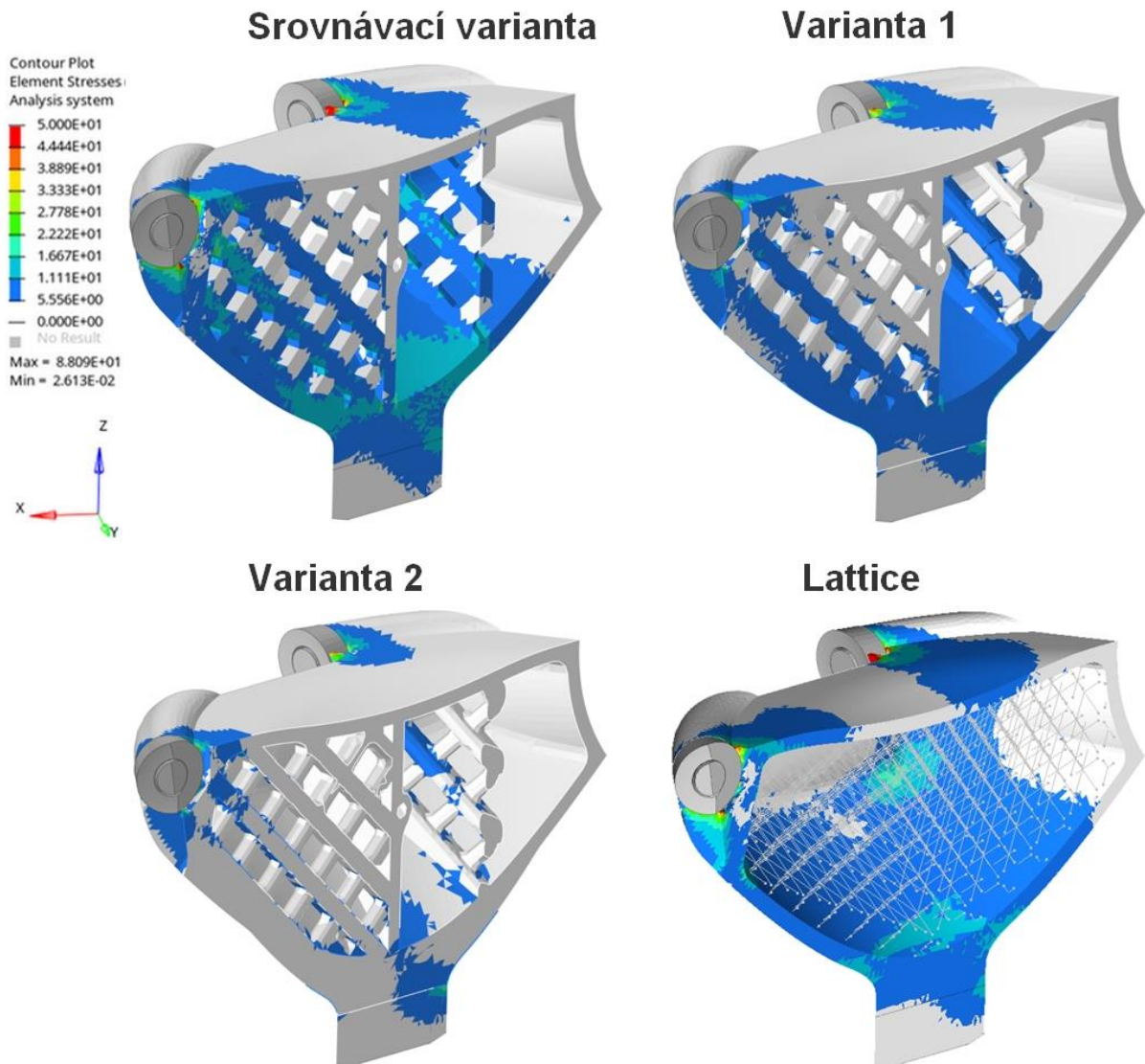
Varianta 2 oproti variantě 1 přidává materiál v přechodu vnější obálky s upínací částí k zařízení frézovacího stroje. Tato varianta zvyšuje hmotnost o dalších 4%. Úprava byla motivována snížením napětí, které byly dle předchozích simulací v tomto místě predikovány.



Obrázek 71 – Pozměněná geometrie příčky napříč klastry

Statické analýzy pevnosti

Napětové pole se vlivem rozdílů v geometrii variant mění. Jejich rozložení je na obrázku 72. Ve srovnávací variantě napětí nabývá vyšší lokální intenzity než u ostatních variant. Varianta 1 demonstruje, že zesílení styčnicků ve vybraném směru má pozitivní vliv na rovnoměrnější rozložení napětových polí. Tuhost jednotlivých variant je hodnocena opět na základě posuvů v radiálním a axiálním směru, viz tabulka 6. Pozice uzlu pro odečet posuvů je opět v ose VBD.

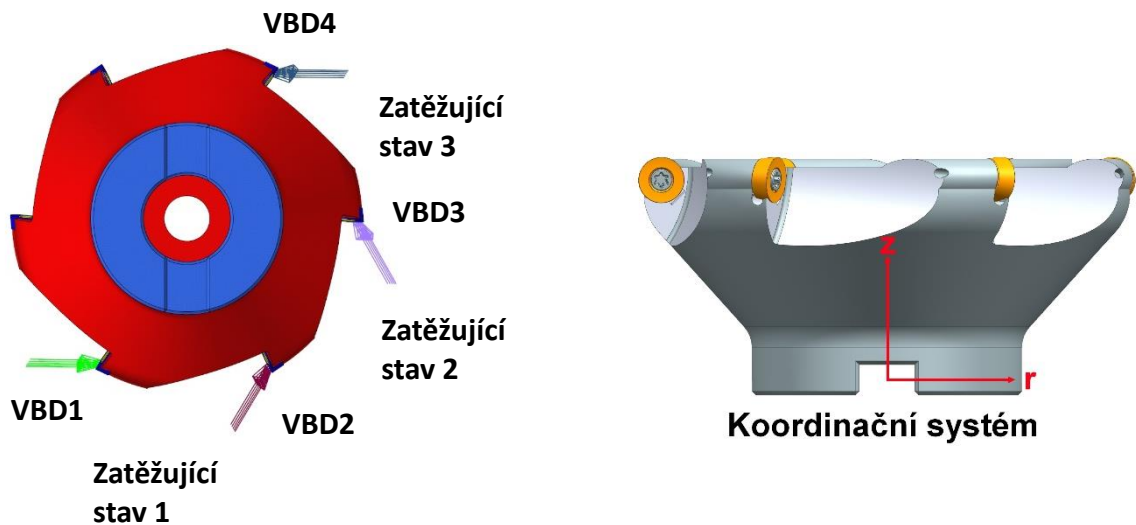


Obrázek 72 – Napětová pole jednotlivých variant návrhu

Tabulka 6 - Výpis získaných hodnot posuvů

Model	Zatěžovací stav	VBD 1		VBD 2		VBD 3		VBD 4		Hmotnost těla
		r	z	r	z	r	z	r	z	
Plný design	1	-1.467	-0.741	-1.011	-1.309					2.74
	2			-1.409	-0.873	-1.052	-1.146			
	3					-1.474	-0.690	-1.056	-1.170	
Lattice design	1	-4.057	-0.663	-1.802	-3.265					---
	2			-4.011	-0.799	-1.705	-3.062			
	3					-3.976	-0.577	-1.747	-3.133	
Srovnávací varianta	1	-4.709	-0.131	-2.291	-2.320					1.03
	2			-4.475	-0.352	-1.799	-2.116			
	3					-4.247	-0.071	-2.050	-2.143	
Varianta 1	1	-3.425	-0.063	-1.612	-1.693					1.07
	2			-3.228	-0.250	-1.208	-1.530			
	3					-3.031	-0.023	-1.416	-1.540	
Varianta 2	1	-2.672	-0.123	-1.401	-1.233					1.11
	2			-2.484	-0.309	-1.018	-1.088			
	3					-2.299	-0.099	-1.220	-1.078	

Pozn.: hodnoty jsou udávány v μm .
 r - posuv v radiálním směru (změna poloměru)
 z - posuv ve směru osy Z
 podmíněné formátování barev srovnává vždy jen srovnatelné hodnoty (např. VBD1 + r + loadcase 1)



Obrázek 73 – Legenda k výpisu získaných hodnot

Vyhodnocení vstupních analýz

Výsledky analýz potvrdily, že varianta 1 (se zesílenými žebry mřížky vedenými ve směru namáhání) je **výrazně tužší**, než předchozí varianta A. Výsledné výchylky ve směrech r a z se snížily průměrně o **35 %**.

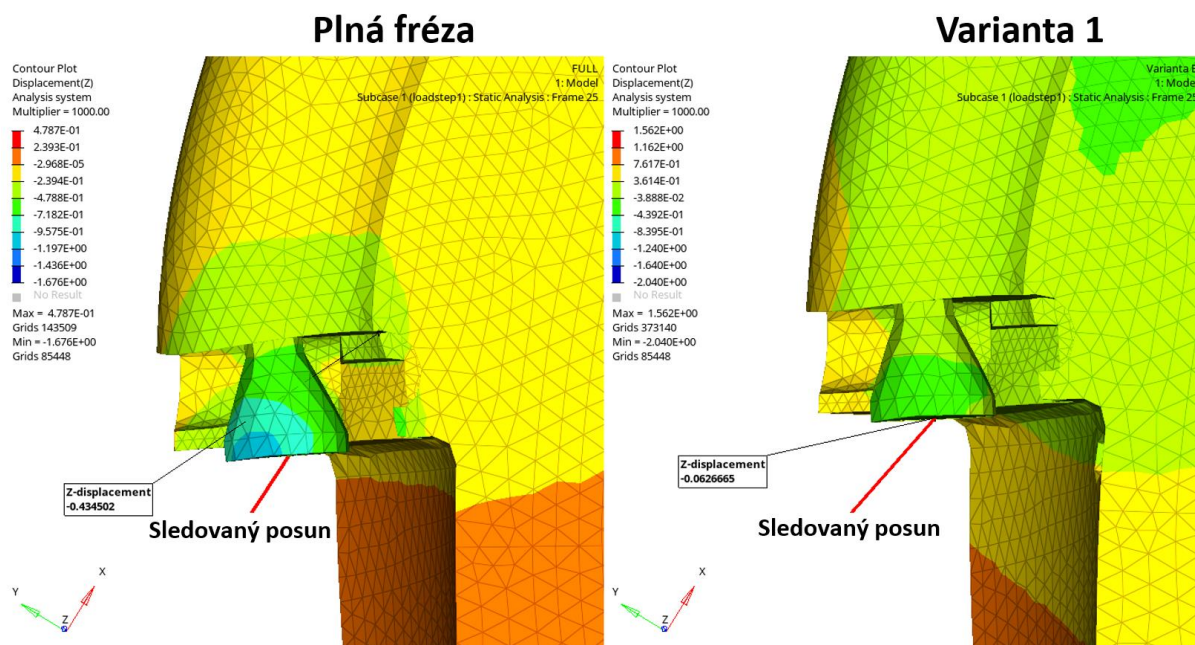
Varianta 2 (se zesílenými žebry mřížky vedenými ve směru namáhání a větším zaoblením zužování těla) je **tužší**, než předchozí varianta B (se zesílenými žebry mřížky vedenými ve směru namáhání). Výsledné výchylky jsou z důvodu variace v jednotlivých směrech obtížně sumarizovatelné.

Varianta 1 zároveň vykazuje oproti **srovnávací variantě** snížení maximální hodnoty von Mises napětí o **30 %**. **Varianta 2** další snížení napětí již **nepřináší**.

Lze konstatovat, že **3% zvýšení hmotnosti** mezi **srovnávací variantou** a **variantou 1** vedlo k **30-35% zlepšení** sledovaných charakteristik. A **4% zvýšení hmotnosti** mezi **variantou 1** a **2** vedlo ke změnám směrů tuhosti, nikoliv ale ke zdatelnému *průměrnému* zlepšení mezi těmito variantami.

Zajímavé je i srovnání výchylek v ose z na přední z dvojice zatěžovaných VBD (tedy VBD1 v loadcase 1, VBD2 v loadcase 2 a VBD3 v loadcase3). Plný materiál vykazuje oproti dutým variantám mnohonásobně až řádově vyšší výchylku. Zde je na místě upozornit, že se jednalo o statické analýzy, nebyly tedy uvažované dynamická jevy jako například odstředivé zrychlení.

V případě potřeby se **nabízí optimalizace** s cílem hledání tvaru, který zajistí **nejlepší poměr výchylek v osách r a z** (jinými slovy ideální kompromis mezi chováním varianty plného materiálu a varianty 1)



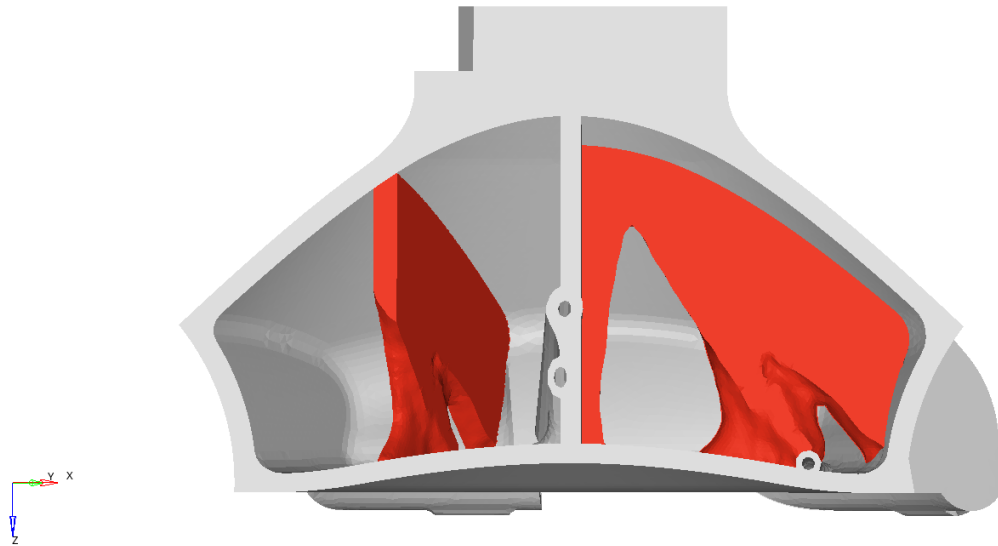
Obrázek 74 – Legenda k výpisu získaných hodnot

Značná tuhost plné varianty se projeví výraznou změnou směru deformace, viz zvýrazněné modré hodnoty v tabulce 6. Tento směr je nevýhodný pro deformaci právě v ose z, tj. v axiálním směru. Zatímco ostatní varianty jsou v určitých směrech poddajnější a v těchto směrech se snáze vychýlí. Celková výslednice výchylky (magnituda) je ze všech variant nejpriznivější u varianty 1.

Z analýz je patrné, že optimalizace vnitřního uspořádání má důležitý impakt na tuhost frézy. Proto se následující varianty se zaměřují právě na změnu uspořádání vnitřní stavby frézy a vnější geometrii ponechávají beze změn. Pro optimalizace vnitřního uspořádání byly zvoleny různé přístupy topologické modifikace.

Varianta 4A8

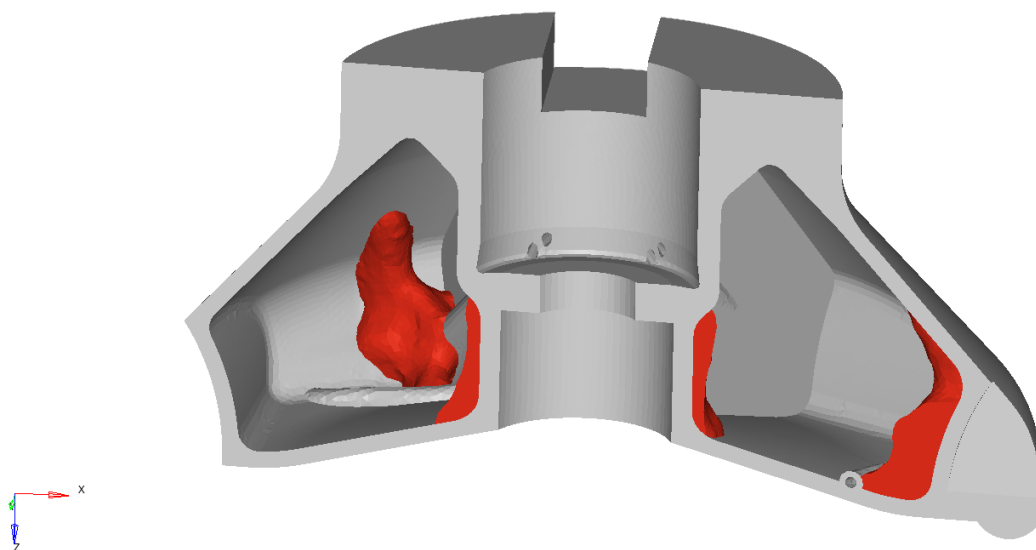
Série A představuje topologickou optimalizaci žebra umístěného namísto původní mřížky. Cílem optimalizace bylo nalezení rozložení materiálu, aby bylo dosaženo co nejvyšší tuhosti při zachování hmotnosti srovnávací varianty. V této sérii bylo vytvořeno 8 optimalizací s různými dílčími parametry. Nejlepších výsledků bylo dosaženo u varianty 4A8.



Obrázek 75 - Podélný řez variantou 4A8; červeně zvýrazněna bionicky optimalizovaná příčka

Varianta 4B1

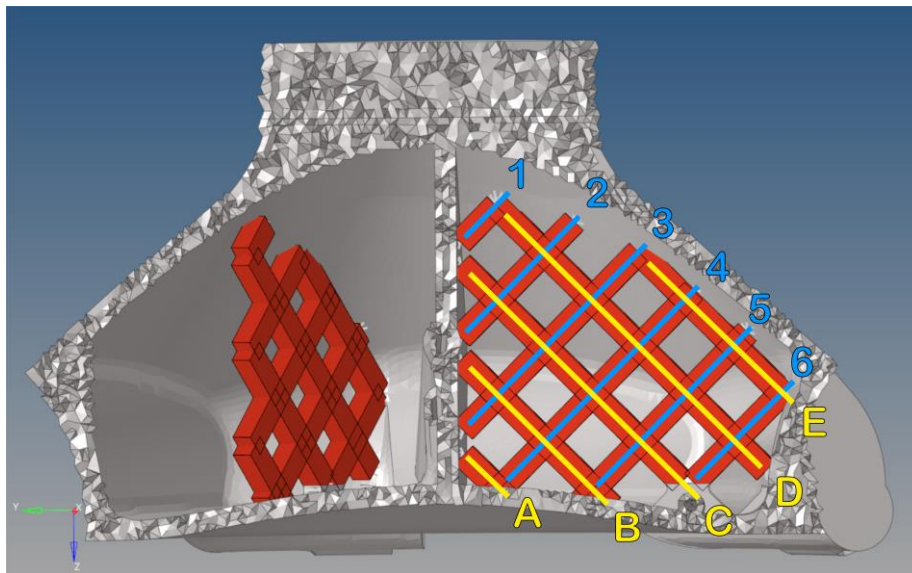
Série B představuje topologickou optimalizaci celé dutiny uvnitř frézy. Cílem optimalizace bylo nalezení rozložení materiálu, aby bylo dosaženo co nejvyšší tuhosti při zachování hmotnosti srovnávací varianty. V této sérii byly vytvořeny 3 optimalizace s různými dílčími parametry. Nejlepších výsledků bylo dosaženo u varianty 4B1.



Obrázek 76 - Podélný řez variantou 4B1; červeně zvýrazněna výztuž dutiny frézy

Varianta 4C1

Série C představuje parametrickou optimalizaci původní příčky srovnávací varianty. Cílem optimalizace bylo nalezení rozložení materiálu, aby bylo dosaženo co nejvyšší tuhosti při zachování přibližné hmotnosti srovnávací varianty. V tomto případě byla omezujícím činitelem modelovací technika. Nahrazení mřížky kombinací výpočetních 1D elementů (obrázek 77), které se vzájemně překrývaly a zároveň ne zcela doléhaly k obálce. V této sérii byly vytvořeny 2 optimalizace s různými dílčími parametry.



Obrázek 77 - Označení jednotlivých 1D výpočetních elementů

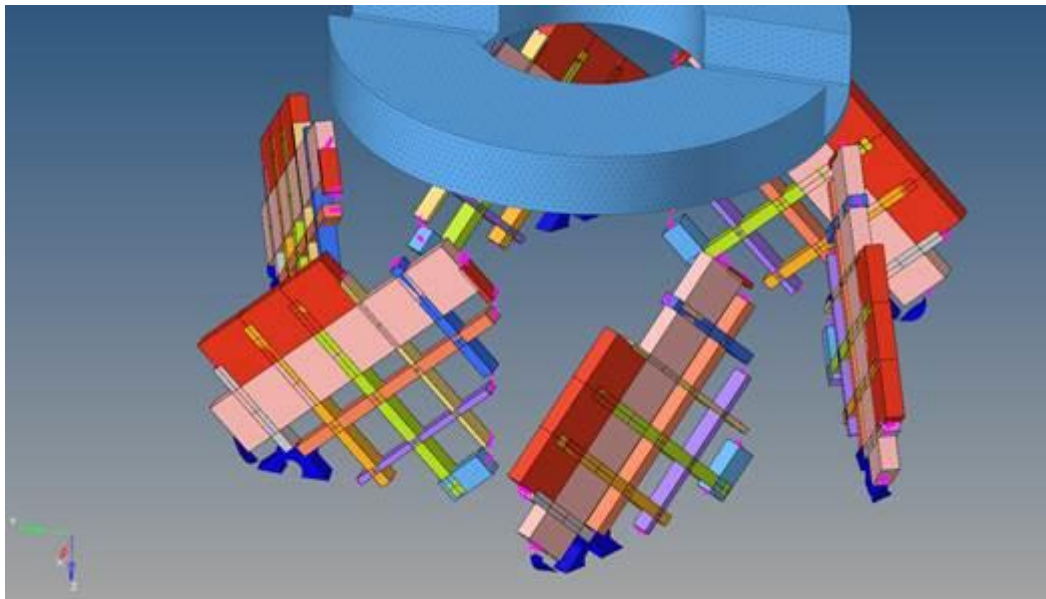
Za účelem stanovení váhy vlivu 1D elementů na tuhost frézy byla provedena citlivostní analýza, která je uvedena v tabulce 7. Nejvyšší vliv na tuhost hlavy frézy mají 1D elementy s označením D a E, které jsou nejbližší vnějšímu plášti. Element E je kratší než D a má tedy i při silném vlivu na tuhost nižší vliv na celkovou hmotnost. Nalezené optimum šířek 1D elementů je uvedeno v tabulce 8. Výpočtový model je na obrázku 78, na základě něhož se provedl re-design příčky a byla provedena výsledná re-analýza. Konečná podoba geometrie 4C1 frézy je na obrázku 79.

Tabulka 7 - Citlivostní analýza; korelace šířky 1D elementů se sledovanými charakteristikami

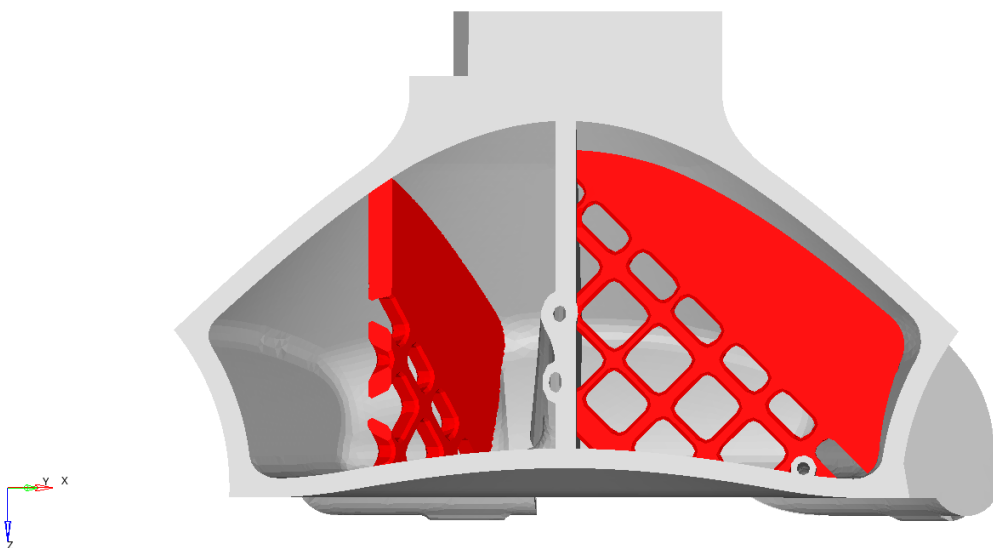
Šířka řady	Sledované výchylky				Hmotnost
	Zátěžový stav				
	1	2	3	1+2+3	
Řada 1	-0.06	-0.06	-0.06	-0.06	0.08
Řada 2	0.02	0.02	0.08	0.03	0.25
Řada 3	-0.08	-0.08	-0.05	-0.08	0.44
Řada 4	0.06	0.06	0.07	0.06	0.35
Řada 5	0.06	0.06	0.06	0.06	0.22
Řada 6	-0.01	0.00	0.00	-0.01	0.11
Řada A	-0.05	-0.05	-0.06	-0.05	0.07
Řada B	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.25
Řada C	-0.07	-0.08	-0.08	-0.08	0.38
Řada D	-0.73	-0.73	-0.76	-0.73	0.46
Řada E	-0.60	-0.60	-0.56	-0.59	0.18

Tabulka 8 - Nalezené optimum šířek 1D elementů

Řada 1	Řada 2	Řada 3	Řada 4	Řada 5	Řada 6
0.8 mm	1.6 mm	0.8 mm	1.8 mm	1.6 mm	1.6 mm
Řada A	Řada B	Řada C	Řada D	Řada E	
3.4 mm	1 mm	1.8 mm	8 mm	8 mm	



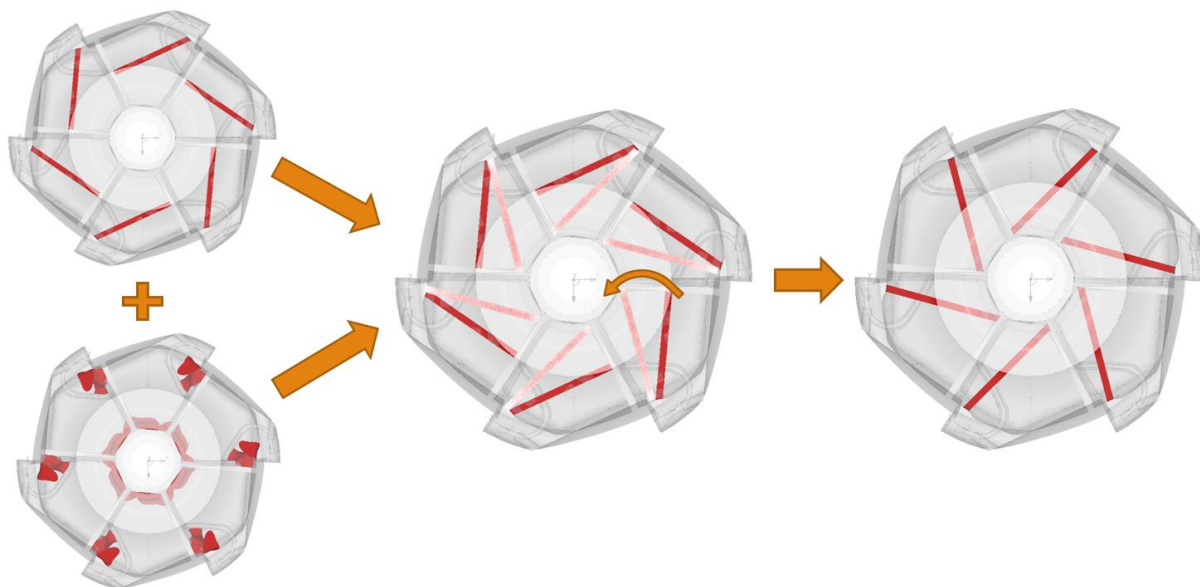
Obrázek 78 – Výsledný výpočtový model



Obrázek 79 - Podélný řez variantou 4C1; červeně zvýrazněna výztuž dutiny frézy

Varianta 4C2

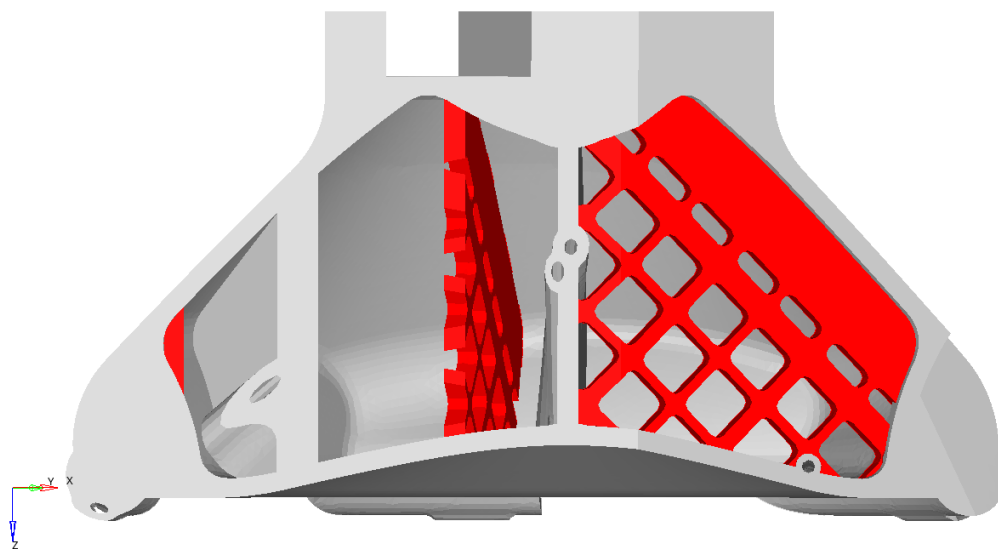
Druhý představitel série C je varianta, která využila kromě parametrické optimalizace mřížky také její pootočení v dutině ve směru, který jako ideální naznačila optimalizace série B.



Obrázek 80 - Pootočení příčky na základě výsledků optimalizace ze série B

Tabulka 9 - Nalezené optimum šířek 1D elementů

Řada 1	Řada 2	Řada 3	Řada 4	Řada 5	Řada 6
1.4 mm	1.2 mm	1.9 mm	1.2 mm	2.0 mm	1.2 mm
Řada A	Řada B	Řada C	Řada D	Řada E	
1.7 mm	1.2 mm	1.3 mm	3.2 mm	8.0 mm	



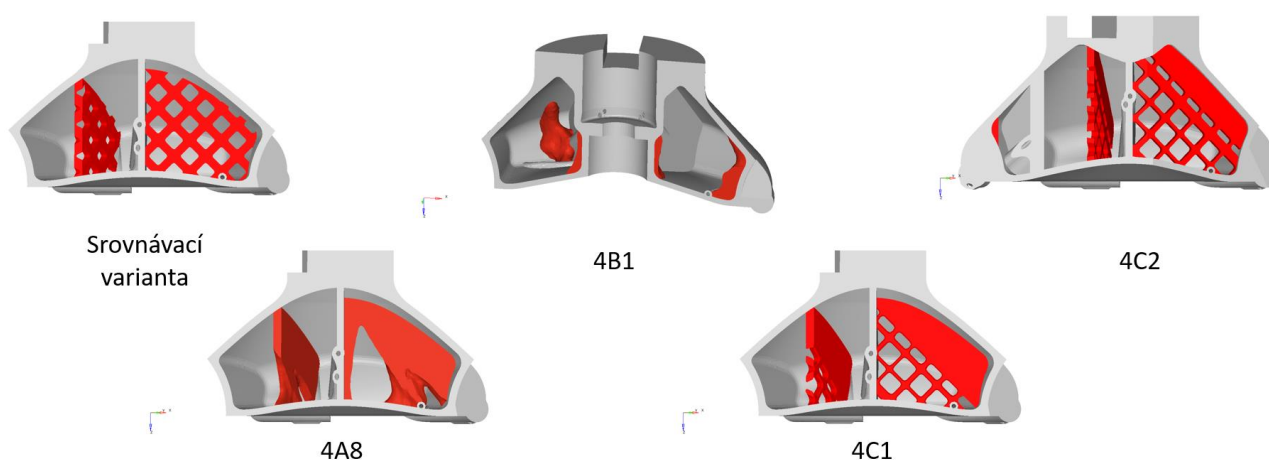
Obrázek 81 - Podélný řez variantou 4C2; červeně zvýrazněna výztuž dutiny frézy

5.2 Vyhodnocení

Dohromady bylo spočítáno 13 relevantních optimalizací ve 3 typových sériích a k tomu 2 designové studie, které napomohly pochopení pevnostního fungování návrhů s příčkou ve formě mřížky. Výsledky ze simulací jsou v Příloze č. 2.

Váha kritérií je nastavena tak, že největší důležitost je kladena na co nejmenší průměrný rozdíl odchylek, až poté je důležitost kladena na průměrnou výchylku a váhový rozdíl mezi variantami.

Jako nejlepší z optimalizovaných variant se jeví topologická optimalizace příčky 4A8, která při 0,5% zvýšení hmotnosti dosáhla 5,4% zvýšení tuhosti podél sledovaných směrů. Zisky všech variant jsou uvedeny v tabulce níže. Hodnoty pro variantu 4A8 jsou zvýrazněny zeleným rámečkem.



Obrázek 82 – Přehled všech variant s nejlepšími výsledky

Tabulka 10 – Srovnání vybraných variant

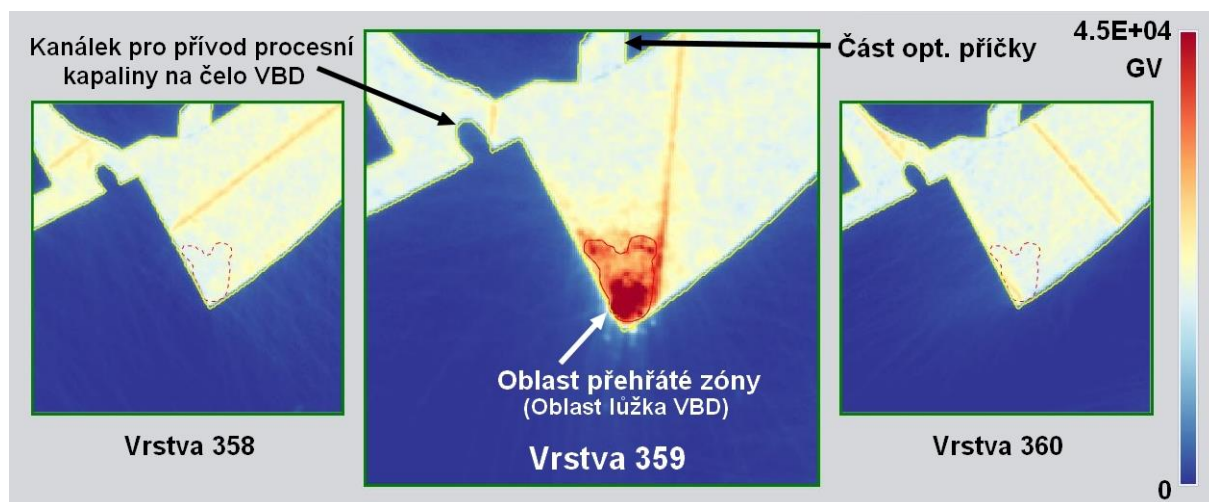
	Srovnávací varianta	4A8	4B1	4C1	4C2
Hmotnost	1.25 kg	1.26 kg	1.24 kg	1.35 kg	1.26 kg
Rozdíl hmotnosti		+0.5 %	-1.2 %	+8.2 %	+0.8 %
Průměrná výchylka	0.00349 mm	0.00262 mm	0.00278 mm	0.00261 mm	0.00273 mm
Průměrný rozdíl výchylek		-5.4 %	-0.3 %	-4.8 %	-3.0 %

5.3 Výroba varianty 4A8

Nejlepší variantou, která vzešla z váhy kritérií, byla zařazena do výroby 3D tiskem (MAM) na zařízení, které je vybaveno monitorovacími systémy. Jedná se o monitorovací systémy, které poskytují nové možnosti pro zhodnocení jakosti vytištěného dílu. Nicméně sběr a evaluace výsledků je náročný proces na čas a pochopení.

Pro potřeby frézy byly optickou tomografií (OT) sledovány zóny s opakovaným přehřátím. Ve výsledku bylo nalezeno 3520 entit, které mohly být možným původcem defektu ve spečeném materiálu. Četnými entitami byly kónické podpory, které se vždy jeví jako přehřáté oblasti. Po vytřídění těchto entit zbylo okolo 800 entit pro vyhodnocení.

Vysoce rizikovou entitu lze označit za tu, která se opakuje napříč vrstvami. Taková nebyla nalezena ani jedna. Vždy se jednalo o entitu, která se objevila pouze v jedné vrstvě. Příkladem je zaznamenaná entita na obrázku 83 ve vrstvě 359 v oblasti budoucího lůžka pro jednu z VBD. Lůžko bude po vytisknutí frézy vytvořeno v této oblasti následnými obráběcími operacemi. Na obrázku uprostřed je zaznamenáno přehřátí, které může být způsobeno různými původci. Důležité je ovšem, že tato oblast nevykazuje přehřátí napříč vrstvami.



Obrázek 83 – Zaznamenaná entita, která indikuje teplejší oblast s vyšší koncentrací tepla, viz červená oblast

Tímto systémem lze také rozpoznat případné defekty či odchylky od modelové předlohy odlehčené frézy. V případě defektu v geometrii nastane přehřátí oblasti kontury geometrie, jelikož v takovém místě tisku chybí podklad ve spodní vrstvě, který by roznesl generované teplo z tavené zóny do zbytku masы tištěného dílu. Tyto entity taktéž nebyly pozorovány na záznamu, proto se může tisk označit za úspěšný bez přítomnosti výrazných defektů, jak v geometrii, tak v materiálu.

Vytištěná fréza, tzn. vytištěný polotovár pro následující obráběcí operace, byla předána pro další úpravy. Polotovár frézy ve variantě 4A8 spolu s vytištěnou variantou 4C1 je zobrazen na obrázku níže. Varianta 4C1 bude sloužit pro porovnání. Frézy mají totožnou obálku. Odlišují se rozdílnou vnitřní strukturou.



Obrázek 84 – Vytiskřený polotovar frézy ve variante 4A8 a 4C1

6 Doporučení pro případný další postup

V navazujícím vývoji frézovacího nástroje by bylo účelné zhodnotit funkčnost dalších vytvořených designů fréz (tj. hlavně varianta 4A8) a otestovat návrh chladících kanálků pro lámání třísky a chlazení čela a hřbetu VBD. Již v řešení je přesné obrobení lůžek pro VBD, které je důležité pro konzistenci opotřebení řezných hran a věrohodnost ověřovacích experimentů funkčnosti navržených fréz.

Po vyřešení problému s přesností uložení VBD by bylo vhodné provést re-design „lattice“ frézy. Doplnit do jejího návrhu chladící kanálky u hřbetu VBD a znova provést porovnání s plnou frézou s plným počtem osazených VBD. Podle výsledků by mohl být systém soustavy chladících kanálků dále laděn, tzn. lépe nasměrován proud procesní kapaliny nebo optimalizován její tlak.

Z hlediska provozně-funkčních vlastností by mohlo být prospěšné použití nepravidelné rozteče řezných hran na obvodu frézy. Použití designu frézy s nepravidelnou roztečí řezných hran by mohl dále zlepšit snížení vzniku vibrací a zlepšit průběh procesu obrábění.

Dále bylo potvrzeno, že vybraná „lattice“ struktura má zvýšené útlumové vlastnosti oproti plnému materiálu. Proto další směr výzkumu by se mohl zaměřit na hledání porézních topologií, které mají oproti BCC struktuře ještě vyšší útlumové charakteristiky.

Významnou roli pro dobré výsledky odlehčené frézy má samotná tuhost frézy. Proto mezi následujícími kroky by mohlo nastat nahrazení kovové tenkostěnné obálky kompozitem a ušetřená hmotnost by se mohla investovat do posílení tuhosti topologicky optimalizovaného jádra frézy.

7 Přínosy disertační práce

Vytvořená metodika implementace „lattice“ struktury do rotačního tělesa přináší princip integrace struktur, aniž by spojitost styčnicků či prutů struktury byla narušená. Tato metodika zamezuje vzniku koncentrátorů napětí ve struktuře, což dokládají provedené pevnostní analýzy, které potvrzují rovnoměrné rozložení generovaného napětí v celém objemu „lattice“ jádra. Toto řešení se nakonec ukázalo natolik unikátní, že bylo právně ochráněno užitým vzorem (viz Příloha č. 3).

Disertační práce k dané problematice přistupuje systematicky a postupuje od nejzákladnějšího stavebního prvku (tj. prutu či styčnicku). V tomto případě potvrdila odchylku v geometrii prutů od modelové předlohy. Přičemž velký vliv na geometrickou odchylku měl úhel, pod kterým se pruty tiskly (tzv. building direction). Ovšem i přes větší defekty či odchylky měly nakloněné vzorky vyšší únosnost, než přesněji vyrobené vzorky, které se tiskly kolmo na strojní platformu (building direction = 90°). Vytisknuté pruty dosahovaly 75 – 90% účinnosti v porovnání s modelovou předlohou v závislosti na úhlu tištění a nominálním průměru.

Zvýšené tlumicí účinky „lattice“ struktury oproti plnému materiálu byly také experimentálně potvrzeny. Kdy zvolená „lattice“ struktura má řádově 3 krát vyšší součinitel útlumu při přibližně poloviční hmotnosti.

Na tyto výstupy navazovaly experimenty, které vyhodnocují vliv zvolené topologie na mechanické vlastnosti skořepiny tahových vzorků. Bylo potvrzeno odlišné chování vzorků v závislosti na zvolené topologie „lattice“ struktur. Byl také zkoumán vliv místa napojení „lattice“ jádra na tuhou upínací část. V tomto případě byly potvrzené měřitelné rozdíly v průběhu deformační křivky vzorků a jejich maximální únosnosti.

Nabyté znalosti se maximálně zužitkovaly při návrhu odlehčené frézy „lattice“ strukturou. Design frézy byl podroben nejrozsáhlejšímu výpočetnímu analýzám, od pevnostních po analýzách tisknutelnosti. Tyto analýzy, ačkoliv byla sledována zněna tuhosti ve sledovaných směrech oproti zcela plné variantě, potvrdily více než dostatečnou pevnost pro reálné nasazení frézy pro obrábění. Testy řezivosti obou variant fréz vycházely porovnatelně. Přičemž kvůli výrobním odchylkám lůžek VBD bylo možné srovnání provést pouze při jedné osazené VBD.

Z analýz vyplynulo, že plná fréza byla poměrově poddajnější v axiálním směru než v radiálním. Další návrhy, jejichž design vznikl na základě parametrické a bionické topologické úpravy, se proto zaměřily na co nejrovnoměrnější deformace ve sledovaných směrech a poskytnuté nejvyšší tuhosti s omezením na straně hmotnosti.

Závěry disertační práce potvrzují potenciál odlehčených fréz zvýšit efektivitu řezného procesu a zprostředkovaly možný směr jejich vývoje. Přičemž bylo docíleno značné úspory materiálu oproti plné variantě a při porovnatelných provozních vlastnostech. Dále je velkou výhodou nasazení aditivní výroby pro tisk frézovacích hlav možnost vyrobit frézu se složitě formovanými chladicími kanálky, čehož v rámci návrhu fréz bylo využito.

Závěr

S aditivní výrobou se rychle vyvíjí a vyrábí topologicky upravené komody, od výroby plných dílů po výrobu těch odlehčených. Je to dáno i tím, že porézní struktury se setkávají s velkým zájmem kvůli jejich vynikajícím strukturálním charakteristikám a lehké povaze jejich topologie, která je typicky dána definovaným rozložením jejich vazníků uvnitř kubického prostoru. Některé konfigurace byly analyticky ověřeny jako výhodné pro specifické zatěžující podmínky.

Kromě hledání aplikační oblasti jednotlivých topologií mikrostruktur, je také patřičné provádět optimalizace pro zjištění nebo ověření optimálního tvaru a velikosti základní stavební buňky struktury s ohledem na možnosti aditivní technologie a to jak na mikroúrovni (jedna buňka), tak na makroúrovni (řada stejnorodých buněk). Optimalizace se provádí s ohledem na tuhost a v souladu s identifikovanými požadavky na zatížení. Znalost optimálních konfigurací mikrostruktur z konstrukčního hlediska umožňuje návrhářům další snížení hmotnosti a zvýšení strukturální efektivity za použití aditivní výroby.

Klíčová je v tomto ohledu výzva využití složitých výpočetních simulacích, které jsou ale velkou zátěží na výpočetní výkon. Protože pokud se bude k samotnému návrhu přistupovat cestou uplatnění jemných porézních struktur, pak se rychle modely stanou náročnými na počítačové zpracování. Z tohoto důvodu je velmi žádoucí využít speciálního SW pro optimalizaci návrhu konstrukčních celků, jelikož tyto SW jsou speciálně navrženy pro tyto účely a využívají specifické techniky, které snižují datovou náročnost na provedení topologické optimalizace.

Předností využití těchto SW je skutečnost, že s nimi lze efektivně „ladit“ lokální odezvu, aby byla adekvátní předpokládanému poli deformací. To znamená, že omezené množství hmoty lze rozložit do zvoleného prostoru, aby tuhost nástroje s omezenou hmotou byla nejbližší nejvyšší úrovni využití s ohledem na okrajové podmínky. Tyto postupy byly také aplikovány při návrzích konceptů fréz. Jen tak lze skutečně dosáhnout očekávaného zlepšení dynamiky frézovacího nástroje, aniž by výrazně utrpěla tuhost nástroje oproti konvenční fríze.

Od aplikace porézních struktur a topologických úprav se očekává:

- snížení hmotnosti,
- zvýšení vlastní frekvence součásti,
- zlepšení útlumu,
- vysoká tuhost,
- směrově orientované vlastnosti,
- ambice pro zvýšení produktivity.

Z předchozích bodů lze odvodit další možné přínosy pro řezný proces. Snížení hmotnosti má pozitivní vliv na *snížení setrvačných účinků* a *zvýšení dynamiky frézy*, což se promítá i do energetické náročnosti provozu obráběcího stroje, jelikož k úspoře elektrické energie přispívá snazší roztáčení odlehčené frézy. Kladný dopad na trvanlivost břitu a stabilitu obrábění mají *tlumící vlastnosti porézních struktur*, jež lze chápat jako schopnost absorpce mechanické energie. Odlehčená fréza kvůli nižší váze a tlumícím vlastnostem má také výše posazené vlastní frekvence, jejichž buzení nastane až za hranicí přípustných řezných podmínek.

V rámci co největší úspory hmotnosti konstrukčních dílů je záměrem používat topologie porézních struktur, ve kterých převládá axiální napětí ve vzpěrách (tj. **Strength-dominated**). Jelikož tyto struktury obecně nabízejí větší tuhost a pevnost na jednotku váhy než struktury, u nichž převládají ohybové účinky. Ty ovšem zase mohou mít lepší tlumící vlastnosti.

Na základě provedené rešerše je zřejmé, že zlepšení provozních vlastností bude patrnější u objemnějších frézovacích řezných systémů určených pro vysoko-výkonnostní obrábění (HPC/HFC). Tento způsob obrábění může těžit z výhod nasazení AM, jelikož i tvar chladicích kanálků je pro způsob obrábění HPC kritický.

V návaznosti na výše uvedené byly v rámci disertační práce postoupeny kroky k nalezení vhodné varianty „lattice“ struktury pro účely odlehčení frézy. Během výběru byl hlavním kritériem požadavek na 8 vstupujících styčnicků na uzel, aby při respektování komplexního zatížení byly částečně styčnický namáhány na ohyb při vysoké zátěži. To by mělo pomoci lépe absorbovat rázy a vibrace. Dále do kritéria byla zahrnuta rentabilní výroba zvolené „lattice“ struktury a pokud možno nízké nároky na vykreslení struktury CAD programy.

Těmto hlediskům vyhovuje BCC topologie, která byla nakonec zvolena. Experimentálně bylo potvrzeno, že vyplněné těleso touto topologií se deformuje téměř lineárně v celé své délce oproti například gyroidní struktuře. Technické prodloužení vzorků u válcové obálky vyplněné gyroidní strukturou bylo centralizované. Pro absorpci napětí v objemu vyplněného objektu strukturou je výhodnější rovnoměrné rozprostření deformace. I z tohoto hlediska vychází BCC struktura výhodněji než další zvažované varianty.

Pro implementaci do rotační obálky byla její geometrie modifikována tak, aby byl zaručený plynulý přenos napětí z jednoho sektoru výseče, clusteru, do sousedícího bez napěťových špiček. Tím je značně zvýšená odolnost proti cyklicky opakovanému namáhání. Jelikož při tomto druhu zátěže každá špička napětí může iniciovat trhlinu a následné její šíření materiálem.

V práci byl okrajově řešen i vliv místa napojení styčnicků do tužší upínací části tahových vzorků. Výstupem bylo zjištění, že místo napojení styčnicků má vliv na průběh deformační křivky a maximální únosnosti vzorků. Pro odlehčenou frézu byl zvolen způsob napojení do šestihranu, kdy styčnický všech clusterů vstupovaly do obálky na vnitřním průměru v uzlech „lattice“ jádra. Zesílení přechodu obálky a jádra bylo provedeno skrz přidání zaoblení.

Dále byl analyzován základní stavební prvek „lattice“ struktur a to styčnický nebo také prut. Bylo experimentálně potvrzené, že fyzicky vyrobený prut je zatížen defekty, které snižují jeho nominální pevnost od jeho modelové předlohy. Míra odchylky od modelu závisela především na sklonu prutu vůči ploše strojní platformy 3D tiskárny. I přes vyšší přítomné defekty vykazovaly vyšší pevnost pruty nakloněné vůči stavební platformě pod úhlem 38° než kolmé vzorky. Pod tímto úhlem jsou styčnický stavěny v navržené odlehčené fréze s BCC topologií.

Design odlehčené frézy byl analyzován na pevnost v lineární oblasti deformace. Napětí v porézním jádře bylo rovnoměrné bez výrazných výkmitů. Taktéž byla provedena analýza vyrobitelnosti frézy. Navržený koncept vykazoval nízké posuvy v důsledku vnitřního prnutí. Proto mohla být její vyrobitelnost hodnocena jako zcela bezproblémová.

Ve srovnávacím experimentu řezivosti s plnou frézou vykazovala odlehčená fréza přesun vlastních frekvencí do vyšší frekvence a „lattice“ jádro mělo lepší útlumové charakteristiky jak pevný materiál. Provedený experiment prokázal obdobnou funkčnost při obrábění s jedním osazeným VBD.

V dalším kroku se ladila hlavně tuhost s ohledem na váhu. Zde se přistoupilo ke změně konceptu frézy a pro návrhy se využily další nástroje topologické optimalizace, jako je bionický přístup nebo rozměrová parametrizace. Nakonec byly zvoleny varianty, které vykazovaly rovnoměrnější posuvy ve sledovaných směrech než plná verze.

Do posledních návrhů fréz byly začleněny i kanálky pro chlazení hřbetu a čela VBD. Tyto kanálky byly vedeny příčkou a skrz obálky odlehčených fréz, přičemž bylo využito i proměnlivého průřezu, obzvláště u VBD lůžka, aby byl zaručený konstantní průtok chladícího média. Z časového důvodu a kvůli rozsáhlému záběru problematiky nebylo ovšem možné funkčnosti těchto nových návrhů prověřit experimentálními testy.

Výsledky této disertační práce poukazují na vysoký inovační potenciál topologicky optimalizovaných fréz „lattice“ strukturami, jež zlepšují útlumové charakteristiky v porovnání s plným materiálem a zároveň snižují váhu fréz, což přímo ovlivňuje dynamiku nástroje. Bionický přístup optimalizací zvyšuje dále tuhost nástroje při zachování hmotnosti odlehčené „lattice“ varianty. Vývoj byl podepřen rešeršní částí, simulacemi a v závěrečné části experimenty, aby mohla být provedena vylepšení, která by znovu přiblížila návrh blíže spolehlivému řeznému nástroji s jasně měřitelným přínosem při obrábění.

Dle všech indicií jsou moderní přístupy topologických úprav vhodné pro dosažení vysokého stupně inovace optimalizovaného řezného nástroje a jejich aplikací je možné dosáhnout zvýšení užitečných vlastností produktů. Jde o inovační charakter, jehož uplatnění v praxi by přineslo nástrojařským firmám konkurenční výhody.

8 Citovaná literatura

- [1] CALVALHO, H.M.B., GOMES, J.O., SCHMIDT, M.A., BRANDAO, V.L.C. (2015) *Vibration Analysis and Energy Efficiency in Interrupted Face Milling Processes*, Procedia CIRP, Volume 29, Pages 245-250, ISSN 2212-8271.
- [2] ŠTÝS, M. (2016) *Využití uhlíkových kompozitů v oblasti řezných nástrojů a nástrových upínačů*, Diplomová práce, Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta strojní, Katedra teorie obrábění
- [3] Maxwell, Wiki [online]. [cit. 2018-02-21]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/James_Clerk_Maxwell
- [4] DMU 40 eVo linear. *DMG MORI* [online]. [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: <https://www.dmgmori.co.jp/en/products/machine/id=1442>
- [5] General face milling. *Sandvik* [online]. [cit. 2018-03-15]. Dostupné z: https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/knowledge/milling/application_overview/face_milling/general_face_milling#top
- [6] MIYAGUCHI, T., MASUDA, M., TAKEOKA, E., IWABE, H. (2001) *Effect of tool stiffness upon wear in high spindle speed milling using small ball end mill*, Precision Engineering, Volume 25, Issue 2, Pages 145-154, ISSN 0141-6359
- [7] WALLACE, P.W., ANDREW, C. (1965) *Machining forces. Some effects of tool vibration*, J Mech. Eng. Sci. 7, Pages 152-162
- [8] PETERS, J., VANDEHERCK, P., VAN BRUSSEL, H. (1971) *The measurement of the dynamic cutting coefficient*, Ann CIRP 21 (2), Pages 129-136
- [9] OZDEMIR, Z., TYAS, A., GOODALL, R., ASKES, H. (2017) *Energy absorption in lattice structures in dynamics: Nonlinear FE simulations*
- [10] CHAN, C. H., KASIM, M. S., IZAMSHAH, R., BAKAR, H. A., SUNDI, S. A., ZAKARIA, K. A., HARON, C. H. C., GHANI, J. A., HAFIZ, M. S. A. (2017) *Analysis of face milling performance on Inconel 718 using FEM and historical data of RSM*, Materials Science and Engineering 270, 012038 doi:10.1088/1757-899X/270/1/012038
- [11] DESHPANDE, V.S., ASHBY, M.F., FLECK, N.A. (2001) *Foam topology: bending versus stretching dominated architectures*, Acta Materialia, Volume 49, Issue 6, Pages 1035-1040, ISSN 1359-6454
- [12] DESHPANDE, V.S., ASHBY, M.F., FLECK, N.A. (2001) *Effective properties of the octet-truss lattice material*, Journal of the Mechanics and Physics of Solids 49, Pages 1747-1769, PII: S0022-5069(01)00010-2
- [13] FAVRE, J., LOHMULLER, P., PIOTROWSKI, B., KENZARI, S., LAHEURTE, P., MERAGHNI, F. (2018) *A continuous crystallographic approach to generate cubic lattices and its effect on relative stiffness of architecture materials*, Additive Manufacturing, Volume 21, Pages 359-368, ISSN 2214-8604
- [14] VERNON, R.A. (2016) *Discovering optimal unit cell configurations when designing for additive manufacturing using lattice structures*, Thesis, Department of Mechanical and Aerospace Engineering, California State University, Long Beach.
- [15] Lightweight Lattices, *AltairLighten* [online]. [cit. 2018-03-11]. Dostupné z: <http://www.altairlighten.com/opinion/lightweight-lattices-liberate-new-product-performance/>
- [16] How to reduce vibration in metal cutting, *Sandvik* [online]. [cit. 2018-03-11]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/sitecollectiondocuments/downloads/global/technical%20guides/en-gb/c-2920-23.pdf>
- [17] Topologická optimalizace, *Konstrukter* [online]. [cit. 2018-03-11]. Dostupné z: <https://www.konstrukter.cz/2017/01/26/zaciname-s-3d-tiskem-kovu-3-predvyrobni-etapa-topologicka-optimalizace/>
- [18] Komet produced by MAM, *Metal-AM* [online]. [cit. 2018-03-11]. Dostupné z: <http://www.metal-am.com/komet-produces-innovative-cutting-tools-using-metal-additive-manufacturing/>
- [19] ISCAR enters the age of AM, *ISCAR* [online]. [cit. 2018-03-11]. Dostupné z: <http://iscar.co.nz/wordpress/iscar-additive-manufacturing/>

- [20] Mapal turns to AM, *3ders* [online]. [cit. 2018-03-11]. Dostupné z: <https://www.3ders.org/articles/20150722-mapal-turns-to-additive-manufacturing-to-create-qtd-series-insert-drills.html>
- [21] HAO, L., RAYMONT, D., YAN, C., HUSSIEIN A., YOUNG, P. (2012) *Design and Additive Manufacturing of Cellular Lattice Structures*, College of Engineering, Mathematics and Physical Sciences, University of Exeter, Exeter EX4 4QF, Devon, United Kingdom
- [22] ZETKOVÁ, I. (2017) *Problematika výroby strojních kovových součástí 3D tiskem*, Disertační práce, Fakulta strojní, Západočeská univerzita v Plzni.
- [23] BENDSOE, M., SIGMUND, O. (2003) *Topology Optimization: Theory, Methods and Applications*, Springer, ISBN 3-540-42992-1
- [24] OptiStruct, Altairhyperworks [online]. [cit. 2018-03-11]. Dostupné z: <https://altairhyperworks.com/product/OptiStruct>
- [25] WANG, R., SHANG, J., LI, X., LUI, Z., WU, W. (2018) Vibration and damping characteristics of 3D printed Kagome lattice with viscoelastic material filling, *Scientific Reports*, DOI:10.1038/s41598-018-27963-4.
- [26] SUARD, M., LHUISSIER, P., DENDIEVEL, R., BLANDIN, J., VIGNAT, F., VILLENUVE, F. (2014) *Towards Stiffness Prediction of Cellular Structures Made by Electron Beam Melting (EBM)*. *Powder Metallurgy*, Powder Metallurgy, Vol. 57, Pp. 190-195
- [27] SYAM, W.P., JIANWEI, W., ZHAO, B., MASKERY, I., ELMADIH, W., LEACH, R. (2018) *Design and analysis of strut-based lattice structures for vibration isolation*, Published by Precision Engineering, ISSN 0141-6359, Vol. 52, Pp. 494-506.
- [28] KOUTNÝ, D. (2016) Experimentální studium vlastností strukturovaných dílů vyrobených technologií Selective Laser Melting, Zkrácená verze habilitační práce, Konstrukční a procesní inženýrství, Vysoké učení technické v Brně
- [29] ÇOLAK, O. (2012) Investigation on Machining Performance of Inconel 718 under High Pressure Cooling Conditions, Published by Strojnicki Vestnik, Journal of Mechanical Engineering 58(2012)11, 683-690
- [30] Inconel alloy 718, *Azom* [online]. [cit. 2020-08-11]. Dostupné z: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=4459>
- [31] VOZÁR, V. (2017) *Trvanlivost nástroje při frézování slitiny Inconel 718*, Diplomová práce, Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta strojní, Katedra teorie obrábění
- [32] Metodické pokyny, *Sandvik* [online]. [cit. 2020-08-11]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/boring/pages/how-to-apply-boring.aspx>
- [33] KUČEROVÁ, L., ZETKOVÁ, I., JANDOVÁ, A., BYSTRIANSKÝ, M. (2019) *Microstructural characterisation and in-situ straining of additive-manufactured X3NiCoMoTi 18-9-5 maraging steel*, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 750, Pp. 70-80, ISSN 0921-5093
- [34] HANZL, P. (2016) *Vliv změny objemového podílu gyroidní struktury vyrobené z nástrojové oceli technologií DMLS na její únosnosti*, Diplomová práce, Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta strojní, Katedra teorie obrábění
- [35] SCHMIDOVÁ, E., CULEK, B. (2020) Experimentální testování a diagnostika vzorků s porézni strukturou, Dílčí výzkumná zpráva projektu FV30149 MPO-TRIO, č. VVCD-Z-19/14



Publikační činnost doktoranda

Seznam literatury je uveden podle šablony ČSN ISO 690

2020

[1] HANZL, P., ZETKOVÁ, I., DAŇA, M., NOZAR, M. Advanced Simulation of Metal Additive Manufacturing Using Maraging Steel and Nickel Alloy. *Manufacturing Technology*, 2020, ISSN: 1213-2489

2019

[2] HANZL, P., ZETKOVÁ, I., CAJTHAMLOVÁ, Š. Influence of strut diameter and building direction on strength of lattice structure. *Manufacturing Technology*, 2019, roč. 19, č. 6, s. 947-951. ISSN: 1213-2489

[3] HANZL, P., ZETKOVÁ, I., KUČEROVÁ, L. Structural changes and microstructure of maraging steel lattice structures using additive manufacturing. *Manufacturing Technology*, 2019, roč. 19, č. 1, s. 37-41. ISSN: 1213-2489

[4] HANZL, P., ZETEK, M., RULC, V. PURŠ, H., ZETKOVÁ, I. Finite Element Analysis of a Lightweight Milling Cutter for Metal Additive Manufacturing. *Manufacturing Technology*, 2019, roč. 19, č. 5, s. 753-758. ISSN: 1213-2489

[5] HANZL, P., ZETKOVÁ, I., ZETEK, M. Specially designed lattice structure for milling cutter supported by FEA. *Manufacturing Technology*, 2019, roč. 19, č. 4, s. 579-582. ISSN: 1213-2489

[6] HANZL, P., ZETKOVÁ, I. Benefits of a new approach to designing milling cutter using Metal Additive Manufacturing. *Manufacturing Technology*, 2019, roč. 19, č. 2, s. 385-390. ISSN: 1213-2489

2018

[7] HANZL, P., ZETKOVÁ, I., KUTLWAŠER, J. Dimensional Accuracy of a Product Built Using Direct Metal Laser Sintering. *Manufacturing Technology*, 2018, roč. 18, č. 4, s. 563-566. ISSN: 1213-2489

[8] HANZL, P., ZETKOVÁ, I., DAŇA, M. Uniaxial Tensile Load of Lattice Structures Produced by Metal Additive Manufacturing. In *ICKTI 2018 - NOVÉ POZNATKY V TECHNOLOGIÍCH A TECHNOLOGICKÉ INFORMACE '18 - SBORNÍK PŘÍSPĚVKŮ. Ústí nad Labem, ČR: Ústav technologií a materiálů, Fakulta strojního inženýrství, Univerzita J. E. Purkyně v Ústí nad Labem, Česká republika, 2018. s. 57-61. ISBN: 978-80-7561-114-7*

2017

[9] HANZL, P., ZETKOVÁ, I., DAŇA, M. Nový návrh porézního tlakového vzorku a posouzení jeho vyrobitelnosti technologií Direct Metal Laser Sintering. *Strojírenská technologie*, 2017, roč. 22, č. 1, s. 20-25. ISSN: 1211-4162

- [10] HANZL, P., ZETKOVÁ, I., DAŇA, M. Issues of lattice structures production via metal additive manufacturing. *Manufacturing Technology*, 2017, roč. 17, č. 6, s. 853-857. ISSN: 1213-2489
- [11] HANZL, P. Cellular lattice structures in metal additive manufacturing. In *Elektronický sborník příspěvků SVOČ 2017*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2017. s. 1-6. ISBN: 978-80-261-0702-6
- [12] HANZL, P., ZETKOVÁ, I., DAŇA, M. A Comparison of Lattice Structures in Metal Additive Manufacturing. In *Proceedings of the 28th DAAAM International Symposium*. Vienna: DAAAM International, 2017. s. 481-485. ISBN: 978-3-902734-11-2 , ISSN: 1726-9679
- [13] HANZL, P., ZETKOVÁ, I., ZETEK, M., ŠTĚPÁNEK, M. Effect of Selected Factors on the Accuracy of Load Capacity of the Schoen Gyroid Cellular Structure. *Manufacturing Technology*, 2017, roč. 17, č. 3, s. 302-306. ISSN: 1213-2489
- [14] HANZL, P., ZETKOVÁ, I., ZETEK, M. Load capacity of a gyroid structure produced by selective laser melting. *Manufacturing Technology*, 2017, roč. 17, č. 4, s. 459-463. ISSN: 1213-2489
- [15] HANZL, P., ZETKOVÁ, I., DAŇA, M. Gyroidní porézní struktura a vlivy na přesnost měření její únosnosti. In *ERIN 2017: Papers Proceedings*. Ústí nad Labem: Univerzita J. E. Purkyně v Ústí nad Labem, 2017. s. 187-195. ISBN: 978-80-7561-056-0
- [16] HANZL, P., ZETKOVÁ, I., DAŇA, M. Přínos nového návrhu porézního tlakového vzorku a jeho vyrobiteľnosť technológií Selective Laser Melting. In *MANUFACTURING TECHNOLOGY - PILSEN 2017: Conference proceeding*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2017. s. 1-9. ISBN: 978-80-261-0636-4
- [17] HANZL, P., ZETKOVÁ, I., MACH, J. Optimization of the pressure porous sample and its manufacturability by selective laser melting. *Manufacturing Technology*, 2017, roč. 17, č. 1, s. 34-38. ISSN: 1213-2489

2016

- [18] HANZL, P., ZETEK, M., ZETKOVÁ, I. Cellular lattice structure produced by selective laser melting and its mechanical properties. In *Annals of DAAAM and Proceedings of the International DAAAM Symposium*. Vienna: DAAAM International, 2016. s. 748-752. ISBN: 978-3-902734-07-5 , ISSN: 1726-9679
- [19] HANZL, P. Vliv změny objemového podílu gyroidní struktury vyrobené z nástrojové oceli technologií DMLS na její únosnost. In *Soutěžní přehlídka studentských a doktorských prací 2016*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2016. s. 1-8. ISBN: 978-80-261-0619-7
- [20] HANZL, P., ZETEK, M., ZETKOVÁ, I. Testing of special Ni-Mo steel and its suitability for cutting tools. In *Annals of DAAAM International 2015*. Vídeň: DAAAM International Vienna, 2016. s. 741-747. ISBN: 978-3-902734-07-5 , ISSN: 1726-9679

2015

[21] HANZL, P., ZETEK, M., BAKŠA, T., KROUPA, T. The influence of processing parameters on the mechanical properties of SLM parts. In *Procedia Engineering*. Vídeň: Elsevier, 2015. s. 1405-1413. ISBN: 978-3-901509-99-5 , ISSN: 1877-7058

Přehled vystoupení doktoranda na konferencích

Aktivní účast (prezentace v angličtině) na workshopu: New Materials for Additive Manufacturing, Pořadatel FST-RTI, místo konání: ZČU místnost UL207, termín konání: 19.4.2017, náhrada za Ing. Miroslava Zetka, Ph.D.

Aktivní účast (prezentace) na konferenci ERIN 2017 konané v Ústí nad Labem:

HANZL, P. Gyroidní porézní struktura a vlivy na přesnost měření její únosnosti. 2017. konference ERIN 2017, sborník (ID 43918993)

Zapojení do projektu

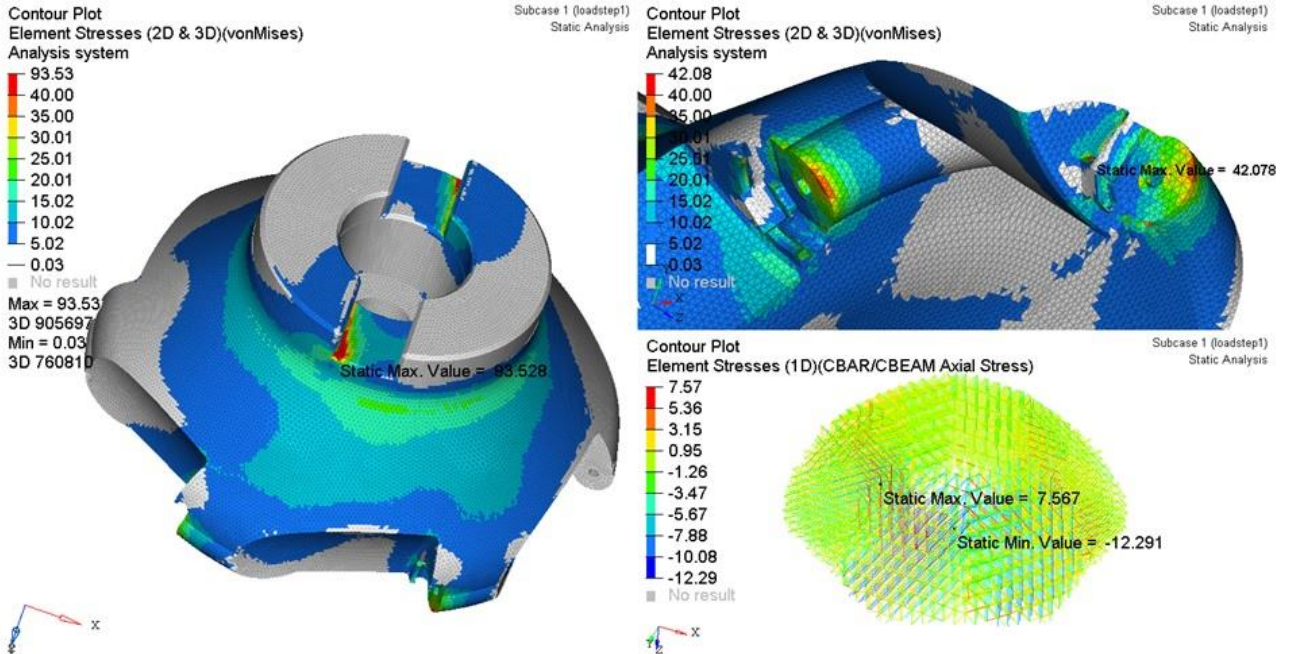
3D tisk výpočtově optimalizovaných kovových součástí s využitím technologie DMLS,
FV30149

PŘÍLOHA č. 1

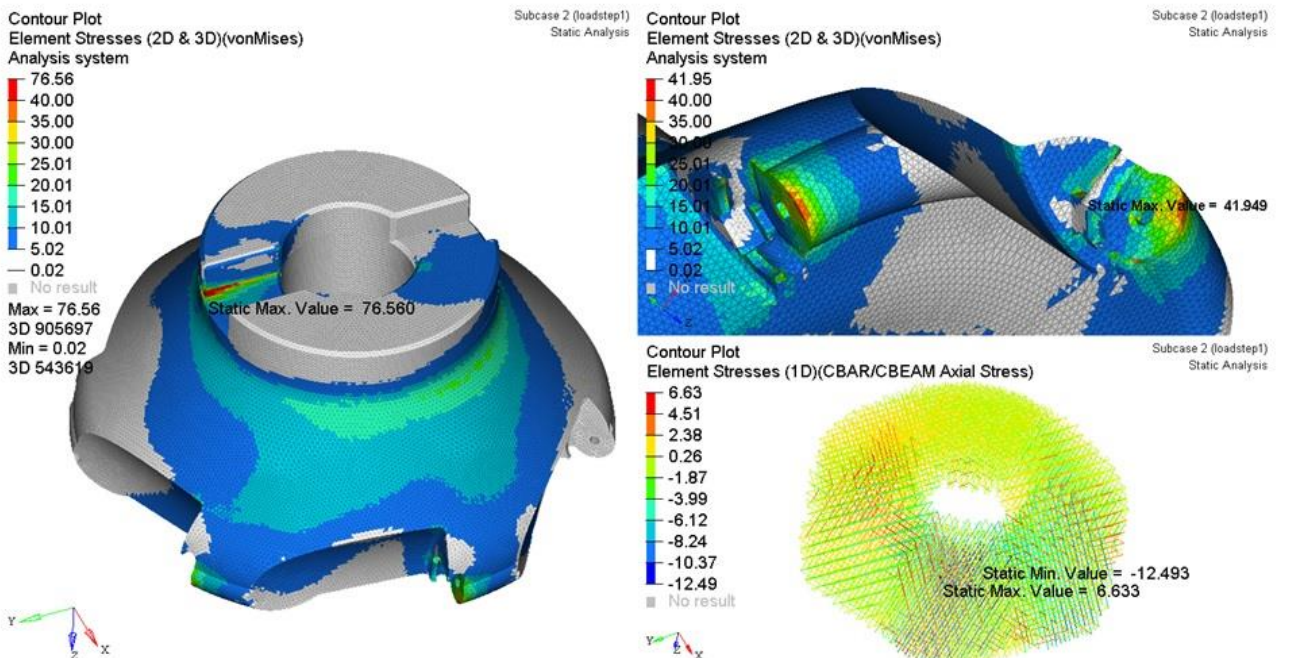
Výsledky zatěžujících stavů pevnostních analýz odlehčené frézy „lattice“ strukturou

Vizualizace napěťových polí pro každý zatěžující stav

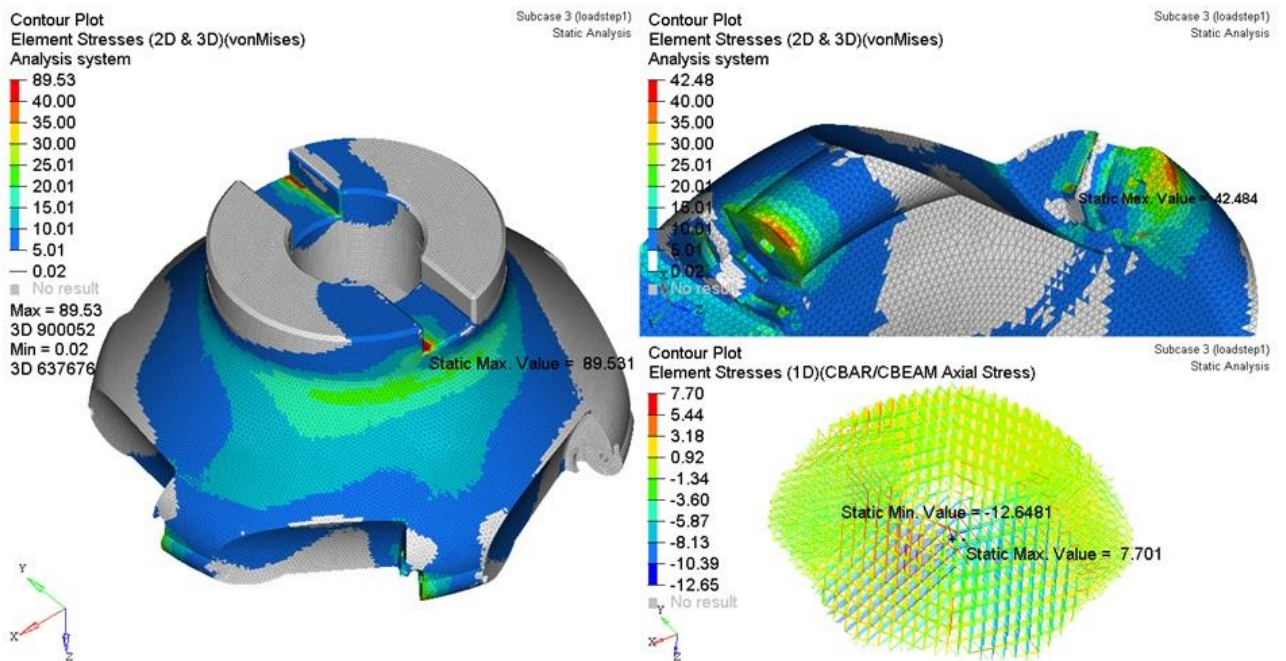
Zatěžovací stav 1:



Zatěžovací stav 2:



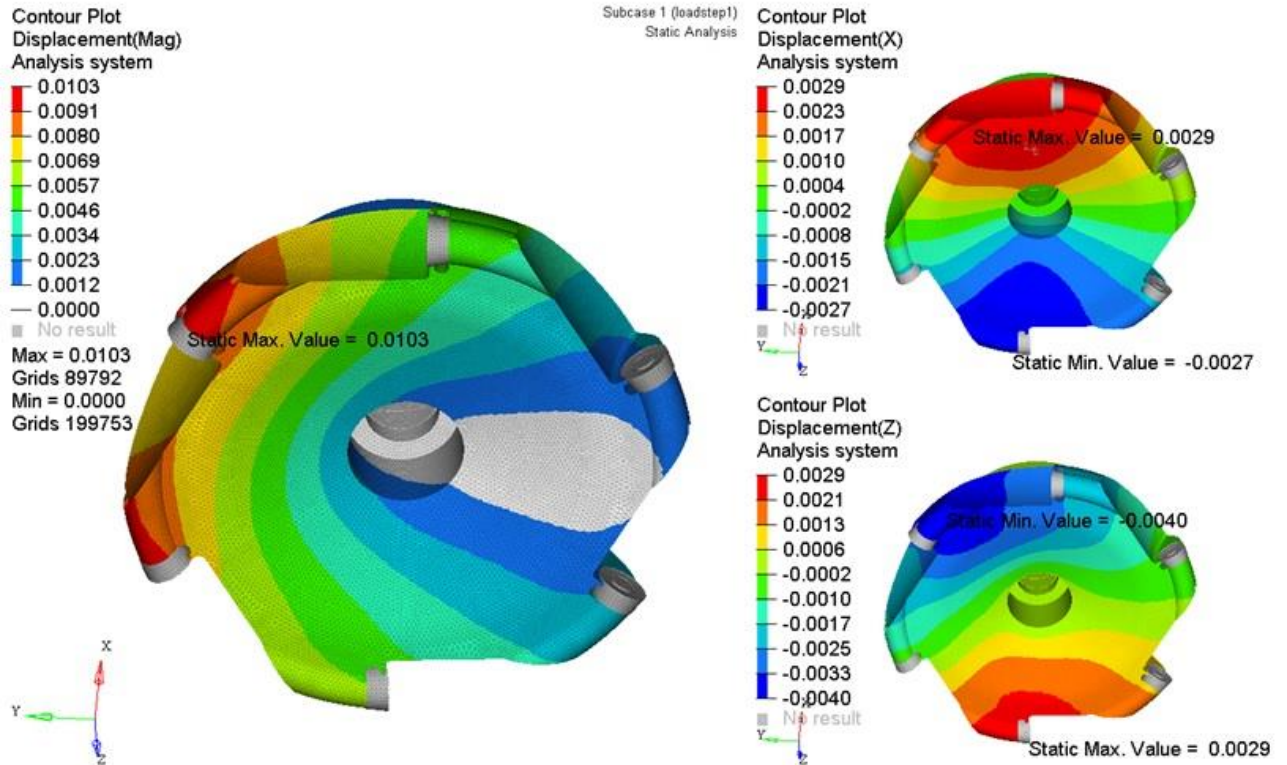
Zatěžovací stav 3:



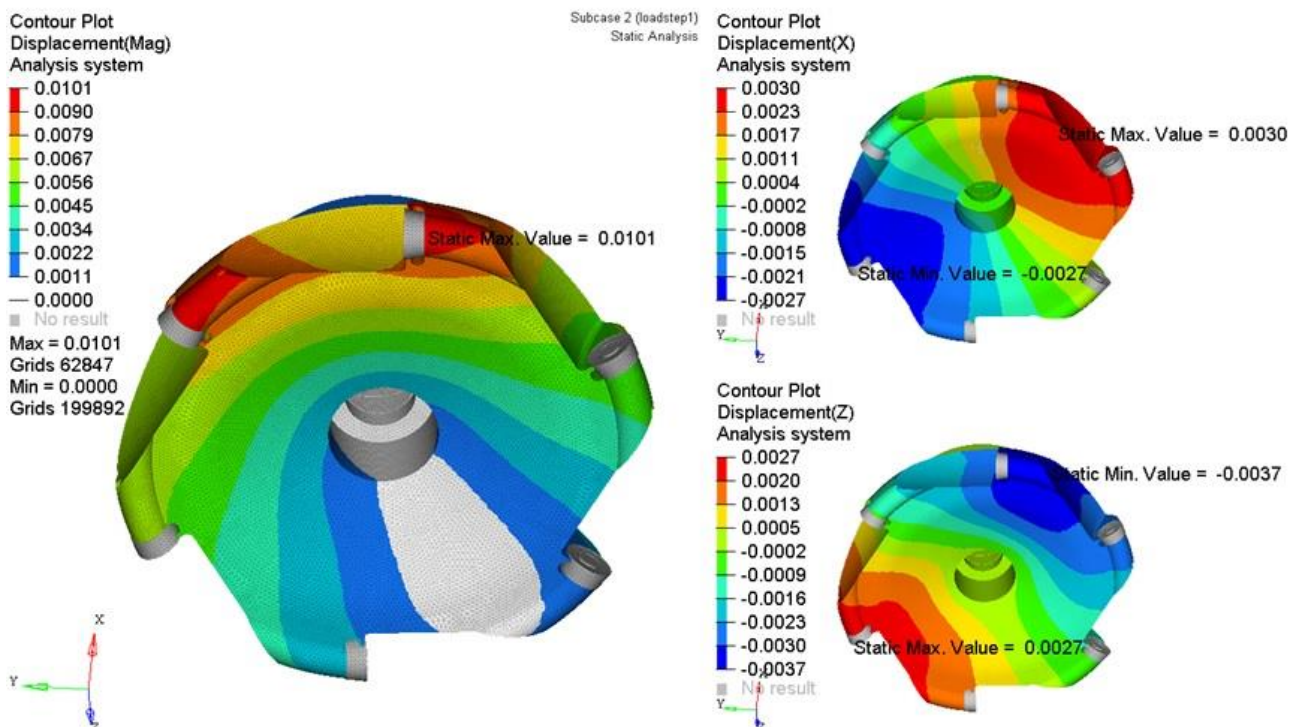
Obrázek 85 – Napětové rozložení ve třech uvažovaných zatěžujících stavech

Vizualizace polí posuvů pro každý zatěžující stav

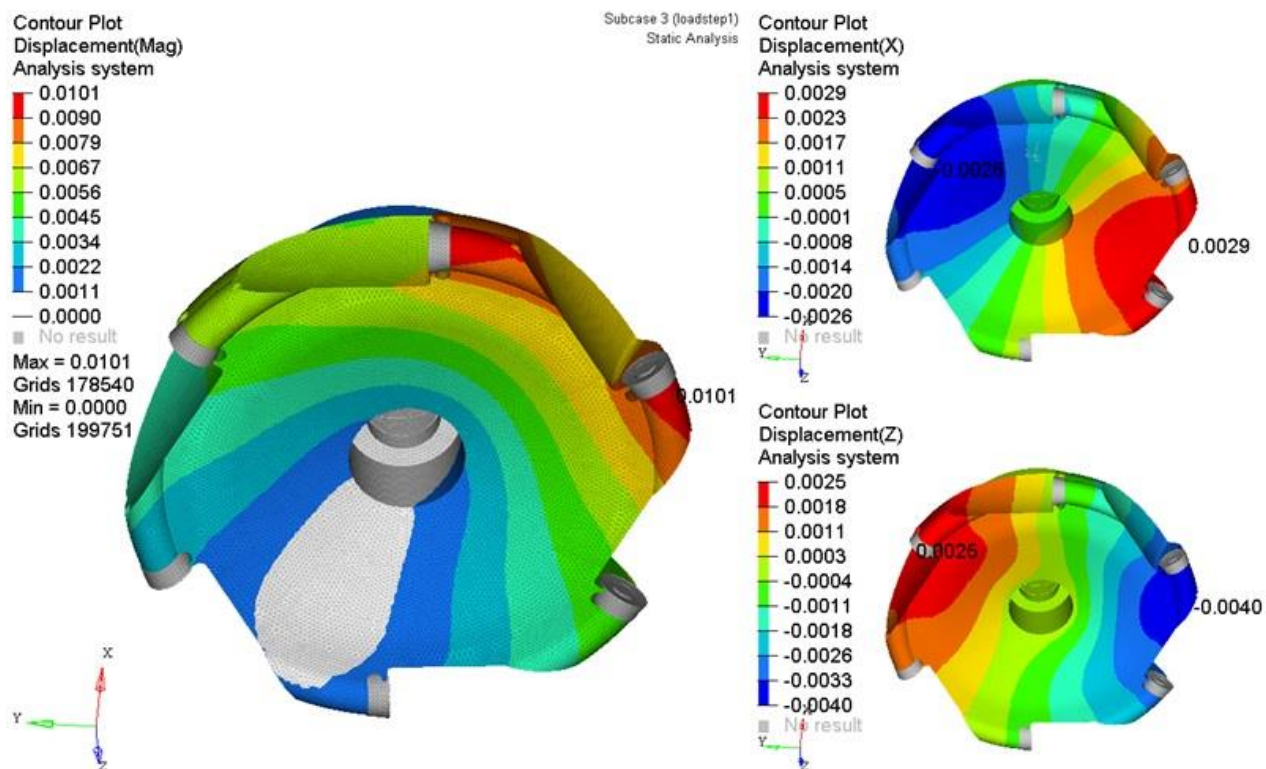
Zatěžovací stav 1:



Zatěžovací stav 2:



Zatěžovací stav 3:

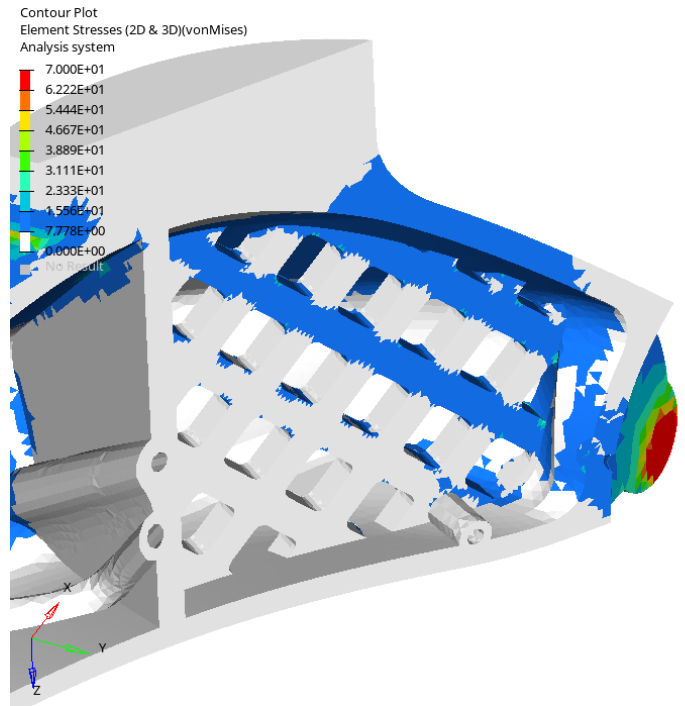
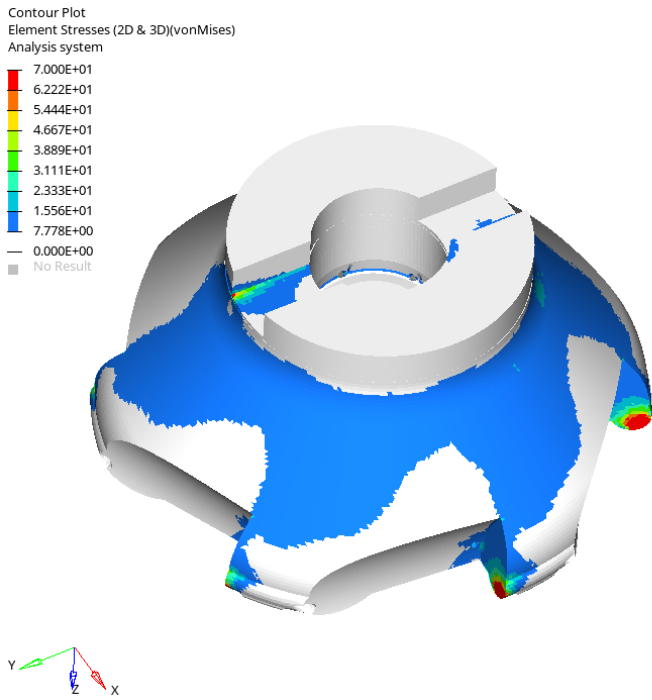


Obrázek 86 – Pole posunů pro tři uvažované zatěžující stavy

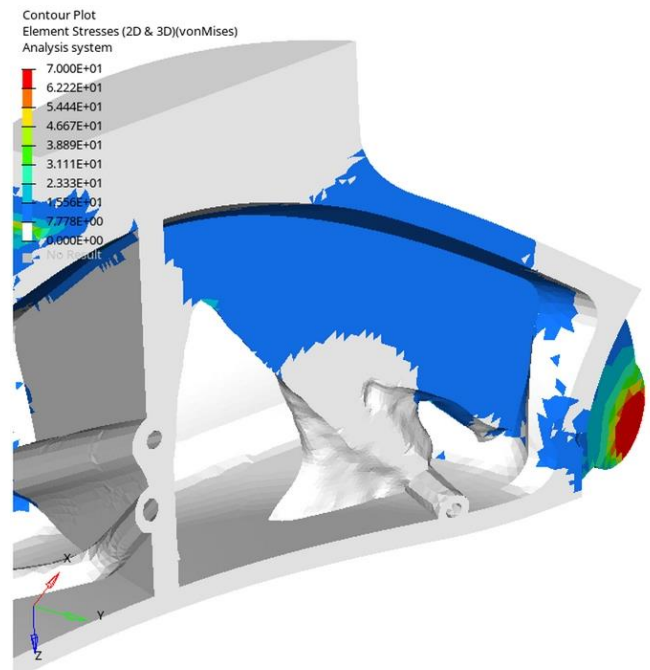
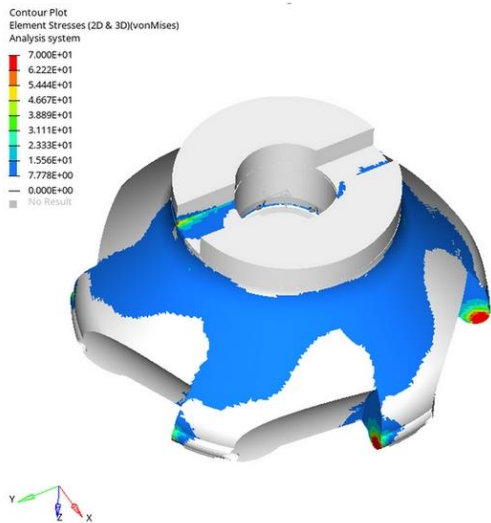
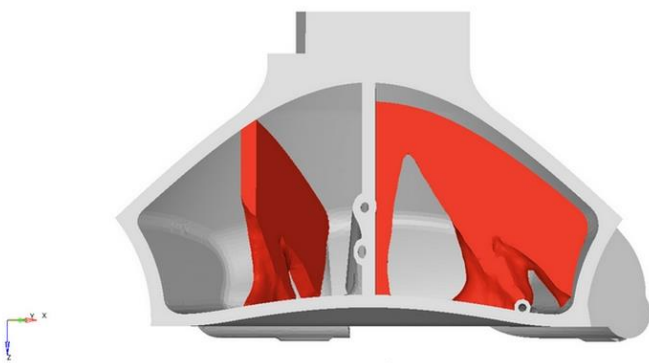
PŘÍLOHA č. 2

Analýzy napětového polí u variant odlehčené frézy s parametrickými a bionickými optimalizacemi

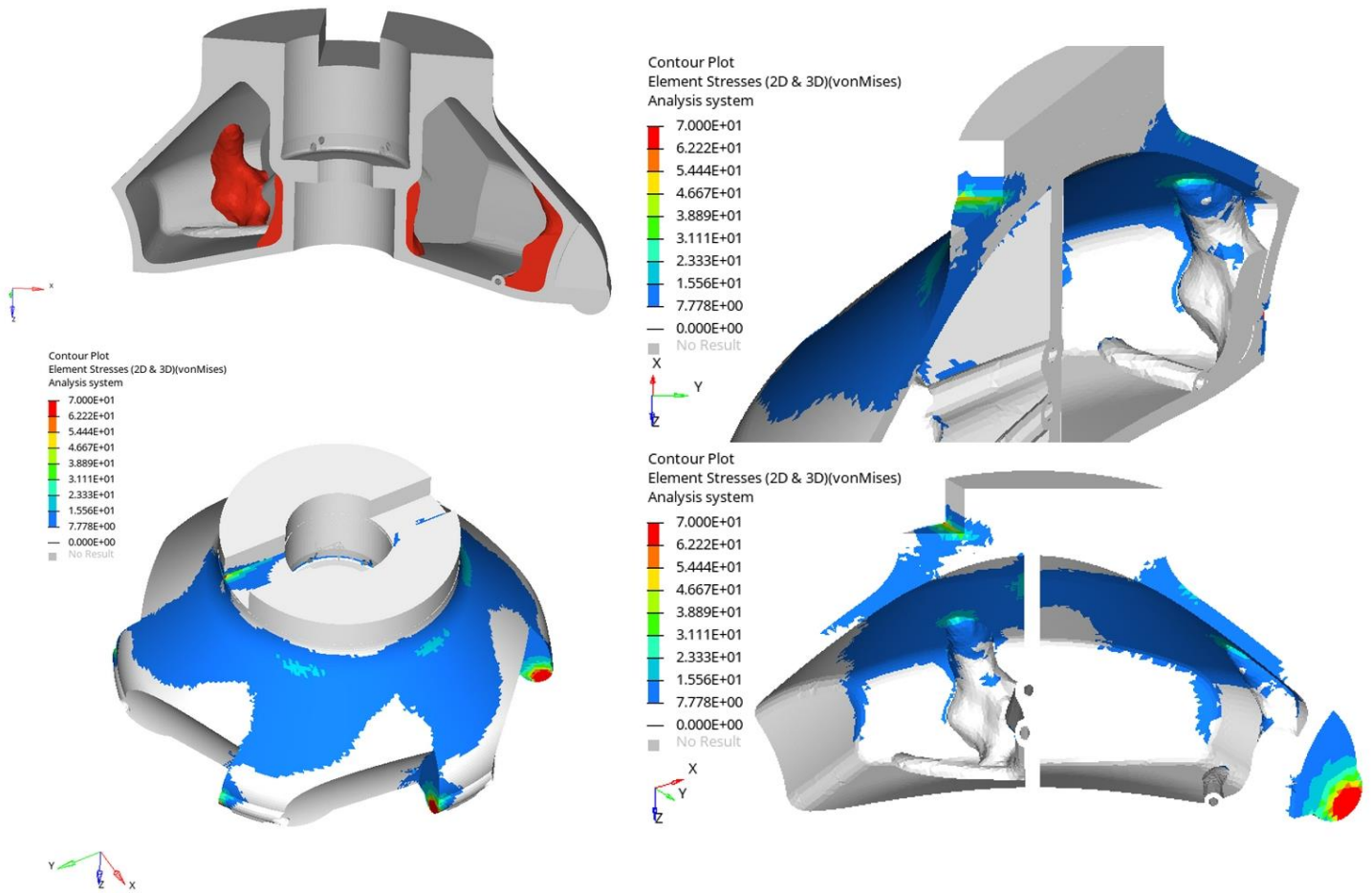
Srovnávací varianta:



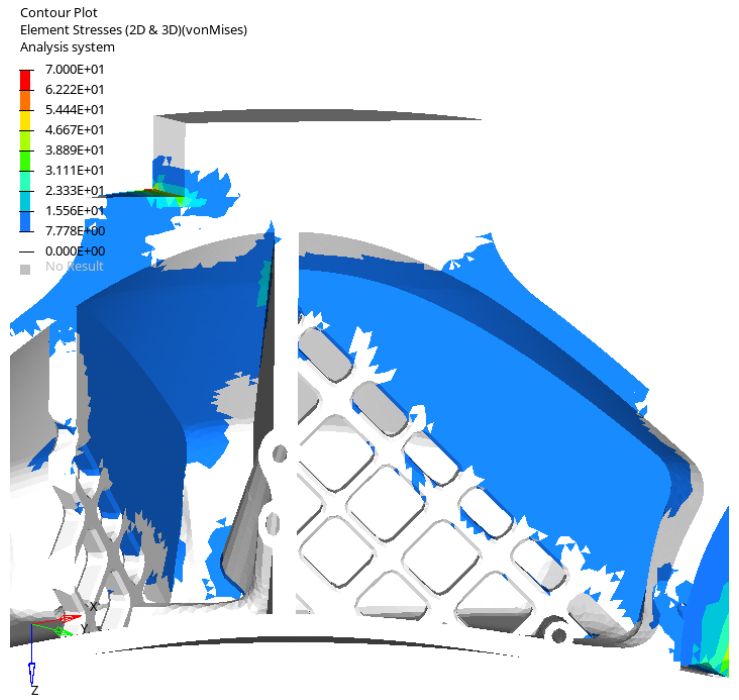
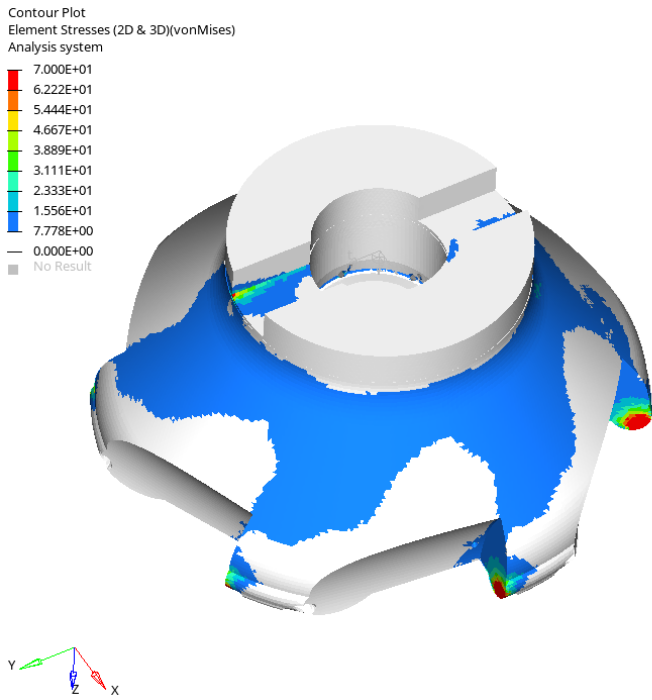
Varianta 4A8:



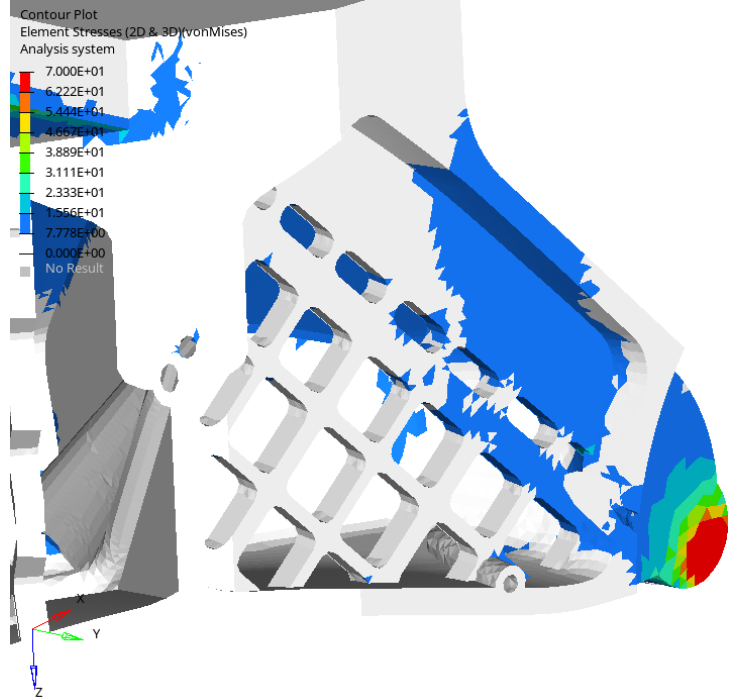
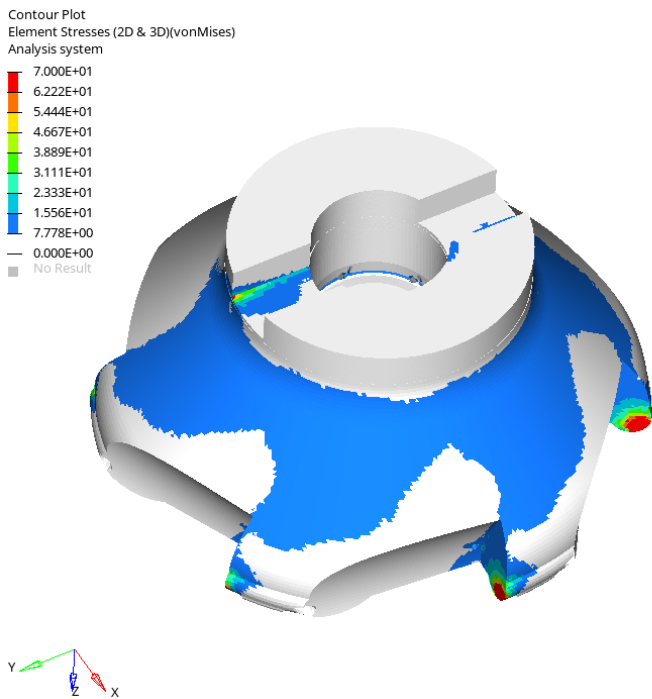
Varianta 4B1:



Varianta 4C1:



Varianta 4C2:



PŘÍLOHA č. 3

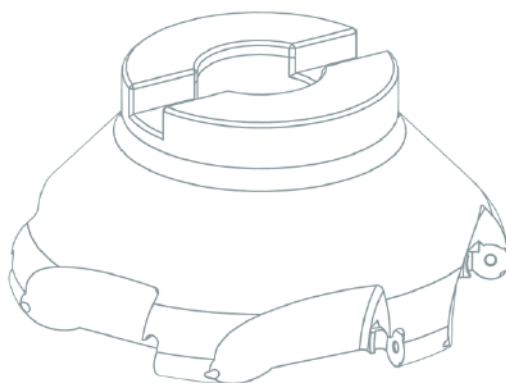
Užitný vzor – Rotační pouzdro obsahující odlehčenou strukturu

Užitný vzor

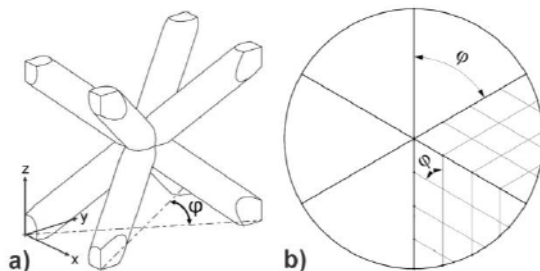
Rotační pouzdro obsahující odlehčenou strukturu

V souladu s definicí uvedenou v dokumentu Úřadu vlády ČR, Č.j.:26822/2017-OMP „Definice druhů výsledků“ jako samostatné přílohy č. 4 „Metodiky hodnocení výzkumných organizací a hodnocení programů účelové podpory výzkumu, vývoje a inovací (metodika 17+) je uplatňován užitný vzor „Rotační pouzdro obsahující odlehčenou strukturu“.

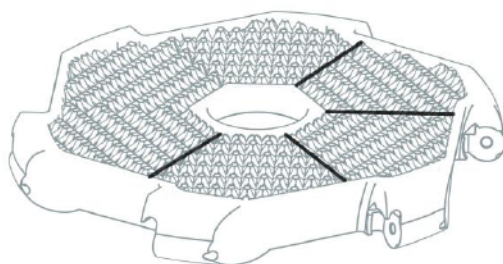
Užitný vzor vznikl v přímé souvislosti s řešením projektu FV30149 3D tisk výpočtově optimalizovaných kovových součástí s využitím technologie DMLS.



Obr. 1 Celkový pohled na obálku odlehčené frézy



Obr. 2 a) modifikovaná geometrie „lattice“ struktury;
b) clusterizace frézy a rozložení styčnicků struktury
v půdorysném pohledu



Obr. 3 Příčný řez s částečně zvýrazněnými přechody mezi
jednotlivými clustery

DATUM ZÁPISU:

30.06.2020

ČÍSLO ZÁPISU:

34145

EVIDENČNÍ ČÍSLO:

UV002-2020-21200

KONTAKTNÍ OSOBA:

Ing. Pavel Hanzl

Kontaktní tel.: 377638739

hanzlp@rti.zcu.cz

doc. Ing. Miroslav Zetek, Ph.D.

Kontaktní tel.: 377638787

mzetek@rti.zcu.cz

PRACOVIŠTĚ:

Západočeská univerzita v Plzni

Fakulta strojní

Regionální technologický institut

Univerzitní 8, 301 00 Plzeň

Podstatou technického řešení je rotační pouzdro, například pro polotovary frézy, obsahující odlehčenou strukturu tvořenou prostorovou sítí sestávající ze základních buněk tvořených nosníky, jejichž konce tvoří rohy pomyslného osově souměrného šestistěnného rovnoběžnostěnu. Pouzdro je rozčleněno na shodné segmenty půdorysu výseče vzájemně k sobě přilehající styčnými rovinami. Vyplnění rotačního tělesa je řešeno clusterizací, což umožňuje funkčně včlenit lattice strukturu s kubickou povahou do rotačního tělesa, aniž by došlo k nerovnoměrnému rozložení hmoty k dané ose tělesa. Hlavní délky kubiky lattice struktury byly pozměněny, aby vzpěry na přechodech mezi clustery plynule navazovaly na sebe, a tak nedocházelo k zeslabení tuhosti celého řešení. Speciálně navržená geometrie celku bere v potaz i požadavky 3D tisku z kovu a je uzpůsobená pro její rentabilní výrobu.