

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
**FAKULTA STROJNÍ**

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: Strojírenská technologie – technologie obrábění

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

Využití aditivních technologií v oblasti řezných nástrojů

Autor: **Bc. Vít Laudát**

Vedoucí práce: **doc. Ing. Miroslav Zetek, Ph.D.**

Akademický rok 2019/2020

# ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2019/2020

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	<b>Bc. Vít LAUDÁT</b>
Osobní číslo:	<b>S18N0042P</b>
Studijní program:	<b>N2301 Strojní inženýrství</b>
Studijní obor:	<b>Strojírenská technologie – technologie obrábění</b>
Téma práce:	<b>Využití aditivních technologií v konstrukci řezných nástrojů</b>
Zadávací katedra:	<b>Katedra technologie obrábění</b>

### Zásady pro vypracování

1. Úvod
2. Rozbor současného stavu
3. Návrh a realizace vlastních experimentů
4. Zhodnocení výsledků a jejich sumarizace
5. Závěr

Rozsah diplomové práce: **50 – 70 stran**  
Rozsah grafických prací: **dle potřeby**  
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

#### Seznam doporučené literatury:

- ASTAKHOV, Viktor, DAVIM, J. Paulo, BASAK, A.K., et al. Metal Cutting Technologies: Progress and Current Trends: Advanced Mechanical Engineering. De Gruyter Oldenbourg, 2016. ISBN 3110449420, ISBN 9783110449426.
- KLOCKE, Fritz. Manufacturing Processes 1: Cutting. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2011. ISBN 978-3-642-11979-8.
- DAVIM, J Paulo. Machining of hard materials. Springer, 2014. ISBN 978-1-84996-450-0.
- Mádl, Jan. Optimalizace řezných podmínek v teorii obrábění: doplňkové skriptum. 4. vydání. Praha, 1990. ISBN 80-01-00323- X.
- Forejt, Milan. Piška, Miroslav. Teorie obrábění, tváření a nástroje. 1. Vydání. Brno, 2006. ISBN 80-214-2374-9.

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Miroslav Zetek, Ph.D.**  
Katedra technologie obrábění

Konzultant diplomové práce: **Ing. Tomáš Bakša**  
Regionální technologický institut

Datum zadání diplomové práce: **16. října 2019**  
Termín odevzdání diplomové práce: **28. května 2020**



---

**Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.**  
děkan



---

**Doc. Ing. Jan Řehoř, Ph.D.**  
vedoucí katedry

## **Prohlášení o autorství**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne: .....

.....  
podpis autora

## **Poděkování**

Za odborné vedení práce děkuji doc. Ing. Miroslavu Zetkovi, Ph.D.. Jeho vedení přineslo do práce spoustu skvělých nápadů a praktických řešení. Další velké díky patří mým kolegům z RTI, kteří mi s prací významně pomáhali a realizace práce by bez nich nebyla možná. Za pomoc při psaní práce děkuji také své rodině.

## ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	Příjmení Laudát	Jméno Vít	
<b>STUDIJNÍ OBOR</b>	N2301 – Strojírenská technologie – technologie obrábění		
<b>VEDOUCÍ PRÁCE</b>	Příjmení (včetně titulů) Doc. Ing. Zetek, Ph.D.	Jméno Miroslav	
<b>PRACOVÍŠTĚ</b>	ZČU – FST – KTO		
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<del>BAKALÁŘSKÁ</del>	Nehodící se škrtněte
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Využití aditivních technologií v oblasti řezných nástrojů		

<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KTO	<b>ROK ODEVZD.</b>	2020
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

### POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	81	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	66	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	15
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

<b>STRUČNÝ POPIS</b>  <b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b>	Tato diplomová práce je zaměřena na využití aditivních technologií v oblasti řezných nástrojů, konkrétně fréz. Cílem práce je optimalizovat standardně vyráběnou ocelovou frézu. Podnětem pro optimalizaci je způsob výroby aditivní technologií a větší svoboda při konstrukci. Dalším cílem práce je ověření funkcionality a přínosu vyrobených fréz. Hodnocení nástroje řeší problematiku vibračí a vlastních frekvencí.
<b>KLÍČOVÁ SLOVA</b>	Fréza, řezné nástroje, 3D tisk, aditivní technologie, vibrace, vlastní frekvence, experimentální modální analýza

## SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

<b>AUTHOR</b>	Surname Laudát	Name Vít	
<b>FIELD OF STUDY</b>	N3201 Mechanical engineering		
<b>SUPERVISOR</b>	Surname (Inclusive of Degrees) Doc. Ing. Zetek, Ph.D.	Name Miroslav	
<b>INSTITUTION</b>	ZČU – FST - KTO		
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>DIPLOMA</b>	<del><b>BACHELOR</b></del>	<b>Delete when not applicable</b>
<b>TITLE OF THE WORK</b>	Use of additive technologies in cutting tools construction		

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	KTO	<b>SUBMITTED IN</b>	2020
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

### NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

<b>TOTALLY</b>	81	<b>TEXT PART</b>	66	<b>GRAPHICAL PART</b>	15
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

<b>BRIEF DESCRIPTION</b>  <b>TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	This diploma thesis is aimed for the use of additive technologies for the cutting tools, specifically mills. The target is to optimize usually produced steel mill. The reason for the optimization was the way of production with additive technology and the freedom of construction. The next goal of the thesis is the verification of functionality and benefits of the mills. Assessment of the mills contains vibrations and natural frequencies.
<b>KEY WORDS</b>	Mill, cutting tools, 3D print, additive technology, vibrations, natural frequencies, experimental modal analysis

## Obsah

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b> .....	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>ROZBOR SOUČASNÉHO STAVU</b> .....	<b>12</b>
2.1	PŘÍKLADY VYUŽITÍ ADITIVNÍ TECHNOLOGIE .....	12
2.2	MATERIÁL PRO 3D TISK .....	14
2.2.1	<i>Výroba kovových prášků</i> .....	14
2.2.2	<i>Použitý materiál – MS1</i> .....	18
2.3	ANALÝZA SOUČASNÉHO STAVU VE VÝROBĚ KOVOVÝCH SOUČÁSTÍ POMOCÍ ADITIVNÍ TECHNOLOGIE .....	20
2.3.1	<i>Postup výroby při AM</i> .....	21
2.4	ANALÝZA SOUČASNÉHO STAVU V KONSTRUKCI ŘEZNÝCH NÁSTROJŮ .....	26
2.4.1	<i>Vibrace při frézování</i> .....	30
2.4.2	<i>Teplota vznikající při frézování a potřeba chlazení</i> .....	33
<b>3</b>	<b>NÁVRH A REALIZACE VLASTNÍCH EXPERIMENTŮ</b> .....	<b>36</b>
3.1	KONSTRUKCE FRÉZ .....	37
3.1.1	<i>Popis verzí fréz</i> .....	37
3.1.2	<i>Upínací část fréz 1.x</i> .....	39
3.1.3	<i>Kónická část fréz 1.x</i> .....	39
3.1.4	<i>Řezná část</i> .....	39
3.1.5	<i>Výroba fréz</i> .....	39
3.2	POUŽITÉ NÁSTROJOVÉ UPÍNAČE .....	40
3.3	EXPERIMENTÁLNÍ MODÁLNÍ ANALÝZA .....	40
3.3.1	<i>Průběh měření modální analýzy</i> .....	41
3.3.2	<i>Způsob měření a vyhodnocení dat</i> .....	43
3.3.3	<i>Tlumicí vlastnosti vnitřních tvarů</i> .....	44
3.3.4	<i>Výsledky experimentální modální analýzy fréz – tlumicí charakteristiky</i> .....	46
3.3.5	<i>Výsledky experimentální modální analýzy fréz – frekvenční odezвовá funkce</i> .....	47
3.3.6	<i>Výsledky experimentální modální analýzy nástrojových sestav – tlumicí charakteristiky</i> .....	49
3.4	VÝSLEDKY EXPERIMENTÁLNÍ MODÁLNÍ ANALÝZY NÁSTROJOVÝCH SESTAV – FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA.....	51
3.5	VLASTNÍ EXPERIMENT .....	54
3.5.1	<i>Měření vibrací nástroje při obrábění</i> .....	54
3.5.2	<i>Polotovary</i> .....	55
3.5.3	<i>Řezné podmínky</i> .....	56
3.5.4	<i>Příprava měření</i> .....	58
3.5.5	<i>Průběh měření vibrací</i> .....	60
3.5.6	<i>Měřené vlastnosti</i> .....	61
3.1	VÝSLEDKY MĚŘENÍ VIBRACÍ NÁSTROJOVÝCH SESTAV .....	62
3.1.1	<i>Základní údaje o měření</i> .....	62
3.1.2	<i>Testovací matice</i> .....	63
3.1.3	<i>Podobnost opakovaného měření</i> .....	63
3.1.4	<i>Porovnání volnoběhu a obrábění</i> .....	64
3.1.5	<i>Standardní ocelový nástrojový upínač – řezné podmínky č.7</i> .....	65
3.1.6	<i>Kompozitní nástrojový upínač – řezné podmínky č.7</i> .....	66
3.1.7	<i>Standardní ocelový nástrojový upínač – řezné podmínky č.14</i> .....	67
3.1.8	<i>Kompozitní nástrojový upínač – řezné podmínky č.14</i> .....	68
3.1.9	<i>Hodnocení vlastních kmitů fréz</i> .....	69
<b>4</b>	<b>ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ A JEJICH SUMARIZACE</b> .....	<b>70</b>
4.1	PEVNOSTNÍ ANALÝZA .....	70
4.1.1	<i>Zadané okrajové podmínky</i> .....	70
4.1.2	<i>Simulace</i> .....	70
4.1.3	<i>Vyhodnocení</i> .....	71



4.2	CELKOVÉ HODNOCENÍ EXPERIMENTÁLNÍ MODÁLNÍ ANALÝZY .....	72
4.3	CELKOVÉ HODNOCENÍ MĚŘENÍ VIBRACÍ .....	73
<b>5</b>	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>74</b>

### Seznam zkratk, symbolů a značek veličin

Zkratka	Význam zkratky
AM	Additive manufacturing – aditivní výroba
AT	Additive technology – aditivní technologie
CAM	Computer aided manufacturing
CFRP	Carbon fiber reinforced polymer – uhlíkovým vláknem vyztužený polymer
CLI	Common layer interface
D	Průměr
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
EBM	Electron Beam Melting
EIGA	Metoda Electrode induction melting gas atomization
E.M.A.	Experimentální modální analýza
FRF	Frequency response function
HDH	Metoda Hydride - dehydride
HRC	Hardness Rockwell
KTO	Katedra technologie obrábění
MS 1	Maraging steel 1
PRT	Siemens part file
RMS	Root mean square
RTI	Regionální technologický institut
SLM	Selective laser melting
STL	Standard triangle language
SW	Software
TDF	Time domain filtering
VBD	Vyměnitelná břitová destička
VIM	Metoda Vacuum induction melting
ZČU	Západočeská univerzita v Plzni

# 1 Úvod

Produktivita a její zvyšování je jedním z nejdůležitějších faktorů dnešní výroby. Proces obrábění je dynamický jev, který je doprovázen vibracemi různého původu. Ať nucené či samobuzené vibrace negativně ovlivňují řezný proces. Vibrace při obrábění ovlivňují jakost obrobených ploch, tvarovou přesnost ploch a životnost nástroje i stroje.

Vibrace při obrábění nelze zcela eliminovat, ale je potřeba je co nejvíce tlumit, nebo jim předcházet. Předstihnout nadměrné vibrace lze vhodným nastavením řezného procesu, tím je myšlena volba vhodných řezných podmínek, stroje, nástroje i obrobku. Při nalezení a nastavení optimálních parametrů obrábění se proces považuje za efektivní. Takového stavu se dosáhne, pokud se naplní limity všech členů zapojených do obrábění. Některé členy, jako právě nástroje, mají však limity, které zabraňují dosažení limitů ostatních členů. Proto je v dnešní době trendem zvyšovat schopnost nástroje tlumit vibrace, toho se většinou dosahuje zvýšením jejich tuhosti. Tuhost nástroje ale nelze zvyšovat do nekonečna a je potřeba hledat i jiné způsoby, jak vylepšit schopnost nástroje předcházet vibracím.

Jedním z procesů obrábění, při kterém vibrace způsobují problémy je právě frézování. Výroba fréz je v dnešní době na vědecké úrovni, frézy mají mnoho parametrů ovlivňujících jejich vlastnosti. Mezi ně patří například délka, průměr, počet břitů, typ chlazení (vnitřní/vnější) a přítomnost nebo absence tlumícího prvku. Cílem této diplomové práce je navrhnout a vyrobit frézu se čtyřmi VBD, která bude určena pro frézování s velkým vyložení, při kterém hrají vibrace zvláště velkou roli. Dali jsme si za úkol vyrobit frézu, která bude vznikající vibrace tlumit co nejlépe. Pomocníkem při této obtížné cestě nám bude aditivní technologie, pomocí které se bude fréza vyrábět. Fréza by měla být vytištěna z kovového materiálu na 3D tiskárně. Právě aditivní technologie nám dovoluje složitější konstrukci frézy, kterou by nešlo vyrobit konvenčně. Vizí jsou speciální tvary či labyrinty uvnitř těla frézy, ty by dle předpokladů měly sloužit pro tlumení vibrací.

## 2 Rozbor současného stavu

Význam slova „aditivní“ lze vysvětlit jako přidaný, z toho lze odvodit samotnou podstatu aditivní technologie. Jedná se o technologii výroby, při které se materiál postupně přidává, nikoli odebrává z předem připraveného polotovaru. Technologie má díky své podstatě značné výhody.

Potenciál technologie spočívá v postupném přidávání materiálu, kdy při výrobě máme přístup k samotnému jádru pod povrchem součásti, tedy oblasti součásti, do které při konvenční výrobě není přístup možný. To nám dovoluje vytvořit i malé dutiny uvnitř materiálu, tyto dutiny mohou tvořit tzv. porézní strukturu, která může nabývat různých podob. Právě díky porézní struktuře lze vytvořit díl se stejnou funkčností jako díl vyrobený konvenční technologií, s podobnými mechanickými vlastnostmi, ale s nižší hmotností. Další velmi důležitou výhodou AT je svoboda při konstrukci, kdy konstruktér není tolik limitovaný technologií výroby jako při běžném obrábění či jiném způsobu výroby. Je však nutné zmínit, že aditivní technologií nedokážeme vytvořit povrch stejné jakosti jako při obrábění a leckteré funkční plochy je nadále nutné dokončovat broušením či frézováním.

### 2.1 Příklady využití aditivní technologie

Aditivní technologie mají význam v mnoha oblastech od zdravotnictví, přes sport až po vesmírný výzkum. Příkladem využití AM, tedy procesu vytváření trojrozměrných objektů na základě digitálních modelů, ve sportu je rám sjezdového kola od firmy Atherton bikes.



Obr. 1 Celé kolo Atherton Bikes (1)

Samotné trubky rámu jsou vyrobeny z CFRP a jsou spojeny díly vyrobenými právě AM. V tomto případě je největší výhoda AM svoboda konstrukce, kdy si každý jezdec může specifikovat svou vlastní geometrii rámu, aniž by se musel složitě měnit celý výrobní program včetně formy atd.



Obr. 2 Části rámu Atherton Bikes vyrobené AM (2)

Ve fázi přeměny je v současnosti i automotive průmysl, který nyní začíná více využívat aditivní technologie. Právě dodavatelé v této oblasti byli jedněmi z prvních, kdo začali využívat AM. Technologie jim přináší zrychlení a zlevnění designového a prototypového procesu, umožňuje větší přizpůsobení požadavkům kusové výrobě speciálních vozů, například těch závodních. AM nachází využití právě u závodních vozů z jistého důvodu, při jeho použití se dá vozidlo značně odlehčit, přitom právě hmotnost je jednou z nejdůležitějších vlastností v motorsportu. (3)



Obr. 3 Superauto Blade vyrobené AM (4)

K udržení vyhovujících teplot vesmírných raketoplánů během startu, kdy teploty dosahují extrémů, je nezbytná izolace, její umístění do stísněných prostorů v raketoplánech je však obtížné. Inženýři pracující ve vesmírném programu NASA vytváří díky AM speciálně tvarované formy dodávající izolační pěně potřebný tvar pro umístění do raketoplánů. (5), (6)

Využití aditivní technologie se zároveň prokazuje i jako rozumné řešení pro logistiku. Výrobou přímo na poptávku a snížením zásob může AM pomoci nalezení rovnováhy mezi poptávkou a zásobami. Cena skladování, výroby a přepravy může být také značně ponížena. (3)

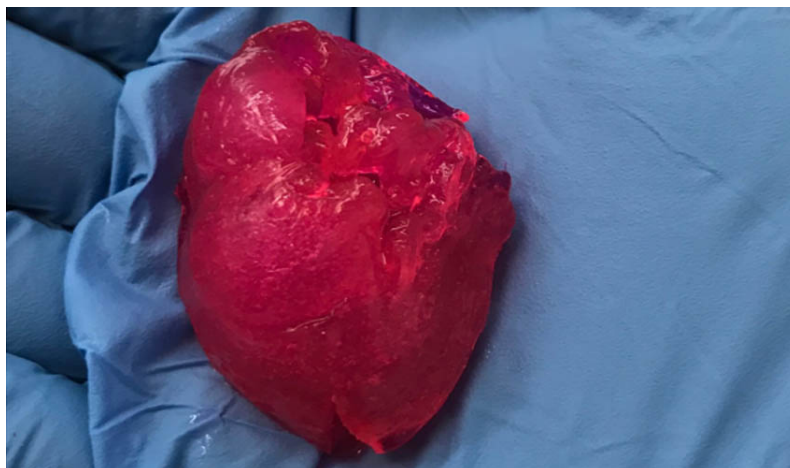
Dalším využitím AM ve sportu je převratná kladka v přehazovačce jízdního kola nazývána také jako „rolnička“ vyrobená právě technologií 3D tisku. Kladka je vyrobena z titanového prášku, který má lepší korozivzdornost i pevnostní vlastnosti než tradičně používaná slitina hliníku, přitom hotová kladka váží pouze 8,4 gramu. Kladka rotuje s každým šlápnutím do pedálů a její hmotnost má proto vyšší význam pro celkovou charakteristiku kola než nerotující součásti,

takové součásti bývají už dost odlehčené a je složité je dále optimalizovat, tudíž je velkým úspěchem snížení její hmotnosti při současné vyšší pevnosti. (7)



Obr. 4 Kladka v přehazovačce vyrobená AM (7)

Inženýři ve firmě Biolife4D vytvořili zmenšeninu lidského srdce pomocí AM. Srdce je vyrobené z bio inkoustu, jehož vlastnosti jsou velmi podobné vlastnostem tkáně srdce. Cílem společnosti je vytvořit plně funkční srdce z tkáně budoucího vlastníka, aby se předešlo odmítnutí nového srdce od vlastního těla. Ohromnou výhodou by bylo i zkrácení doby čekání na dárce. (8)



Obr. 5 Srdce vyrobené pomocí AM (8)

## 2.2 Materiál pro 3D tisk

V současné době velkého nárůstu aditivní výroby se tiskne především z plastu a kovového prášku. Plastové materiály se používají na méně mechanicky namáhané díly nebo například dekorace. Mezi tyto součásti ale nepatří nástroj pro frézování, ten je naopak namáhán extrémně, proto je k jeho výrobě nutné použít kovový prášek. Ve výzkumném centru RTI, kde se frézy tiskly, je osvědčený a nejčastěji používaný materiál Maraging steel MS1, tedy martenziticky vytvrzená ocel. Proto jsou z MS1 vyrobeny i tyto frézy. Kovové prášky jsou zdraví škodlivé a musí se nimi manipulovat v ochranných pomůckách.

### 2.2.1 Výroba kovových prášků

Materiálem pro aditivní výrobu je zpravidla velmi jemný kovový prášek, jehož chemické složení i velikosti zrněk prášku značně ovlivňují výsledné vlastnosti vytištěného dílu, mezi ty patří kvalita povrchu a mechanické vlastnosti. Prášky se k zákazníkovi přepravují v barelech či

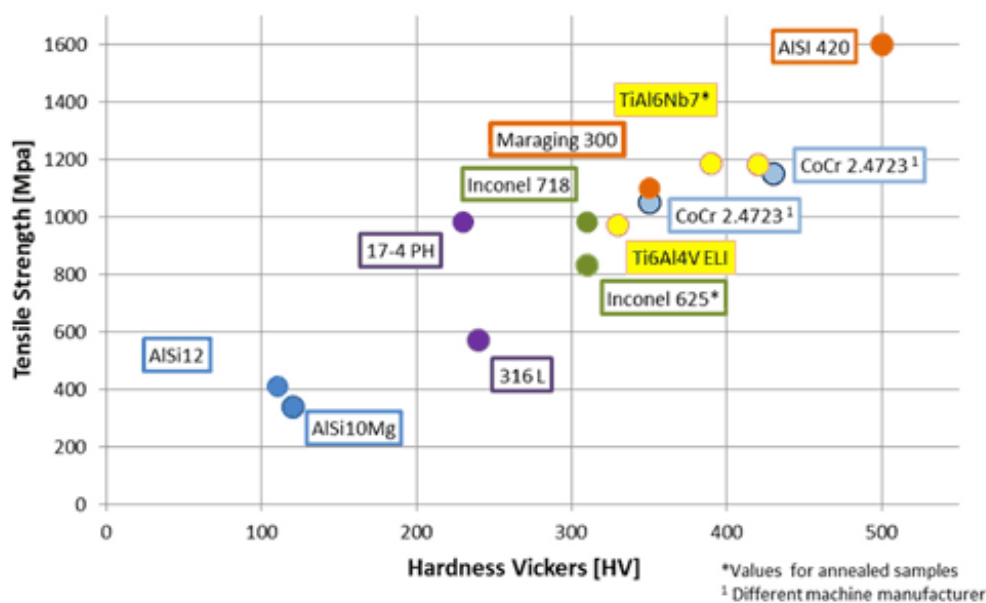
jiných nádobách zabezpečených plombou. Manipulace s nimi probíhá dle pravidel stanovených výrobcem. (9)

Z přepravovacích nádob se prášky sypou do zásobníku stroje, přitom se musí dodržovat přísné bezpečnostní zásady, protože jsou prášky výbušné a zdraví škodlivé. Před tiskem se prášek v zásobníku zhutňuje. Homogenita prášku v objemu celého dílu je velmi důležitá pro kvalitu výtisku.

Druhů kovových prášků i druhů jejich výroby existuje celá řada.

Příklady dostupných kovových prášků (10):

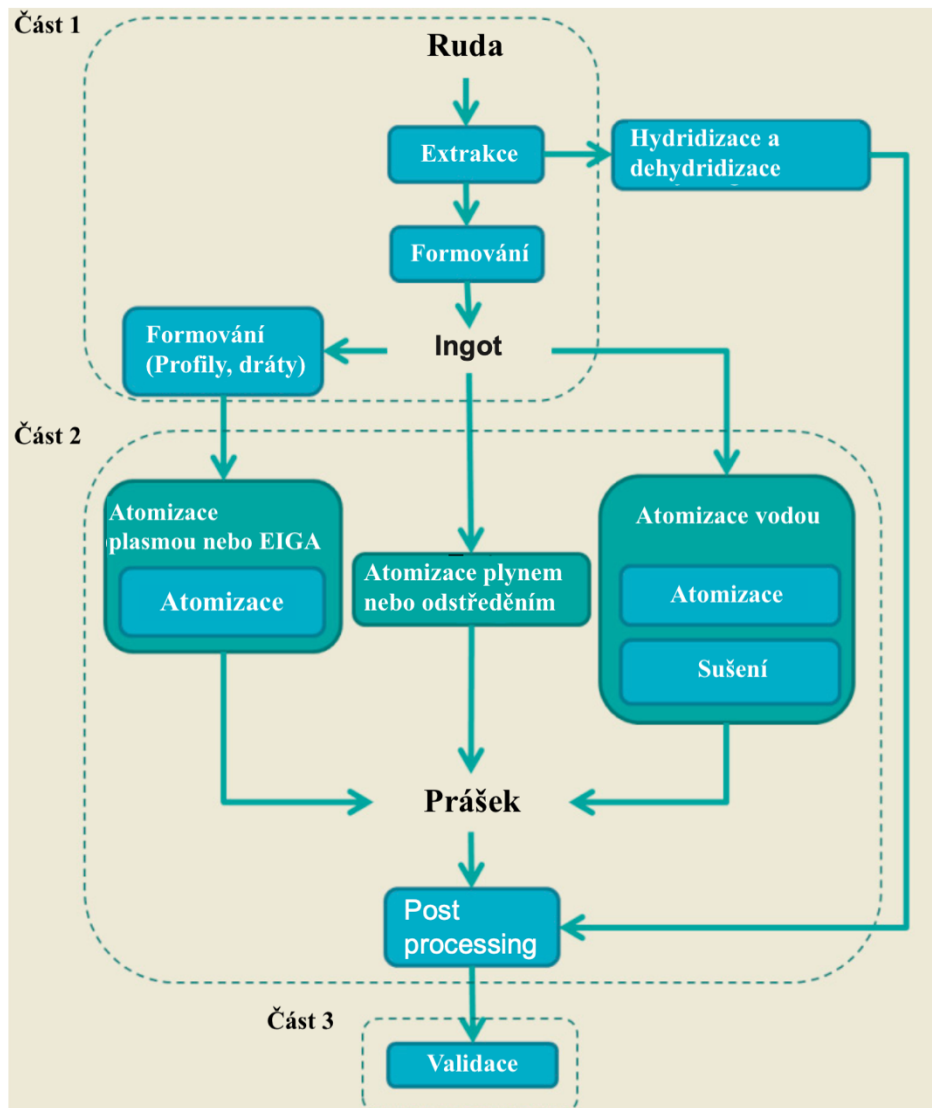
- Slitiny titanu
- Slitiny hliníku
- Slitiny na bázi niklu
- Slitiny na bázi kobaltu
- Nerezové oceli
- Nástrojové oceli
- Jiné slitiny na bázi železa
- Slitiny na bázi mědi
- Drahé kovy



Obr. 6 Přehled kovových prášků (10)

Různé kovové prášky mají velice odlišné mechanické vlastnosti, stejně jako je to u materiálů v klasické podobě (litiny, výkovky, vývalky).

Výroba kovových prášků lze rozdělit do tří hlavních kroků, které jsou znázorněny na Obr. 7. Ve zkratce první část zahrnuje těžbu a třídění rudy do formy čistého kovu nebo slitiny v podobě vhodného polotovaru pro produkci prášku. Druhá část obsahuje samotnou tvorbu prášku a třetí část zahrnuje klasifikaci dle velikosti částic a validaci prášků. (11)



Obr. 7 Schéma procesu výroby prášku (11)

V dnešní době existuje hned několik výrobních metod kovových prášků, patří mezi ně například tyto metody:

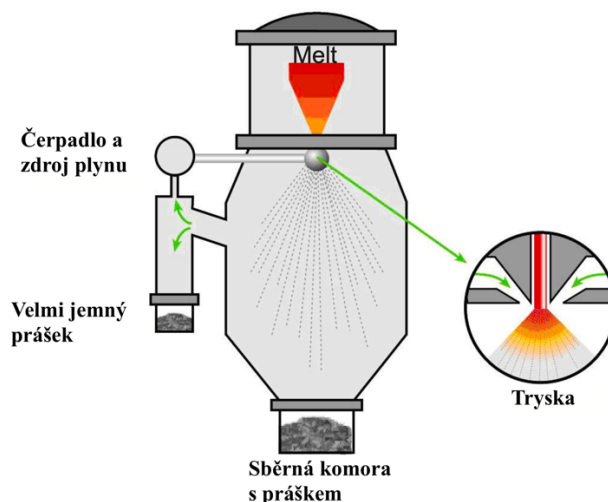
- Metoda Water atomisation
- Metoda Gas atomisation
- Metoda Plasma atomisation
- Metoda Hydride – dehydride (HDH)
- Metoda Vacuum induction melting (VIM)
- Metoda Electrode induction melting gas atomisation (EIGA)

Kvůli dobrým geometrickým vlastnostem vzniklého prášku je nejvíce používanou metodou metoda atomizace. Žádná z výrobních metod není schopná vyrobit prášek, který by se skládal pouze z částic o požadované velikosti. Proto je nutné následné zpracování prášku, ten musí být tříděn dle velikosti částic. Pro SLM jsou vhodné prášky s velikostí částic 15-45  $\mu\text{m}$ , zatímco pro EBM jsou vhodné prášky s velikostí částic 45-106  $\mu\text{m}$ . (11)



### Metoda Water atomisation

Všechny rozprašovací metody začínají roztavením vstupní slitiny v peci. Metoda rozprašování vodou spočívá v rozprašování proudu roztaveného kovu do komory, kde je velmi rychle zchlazen vodou. Vodní paprsky jsou rovnoměrně rozmístěny kolem proudu kovu. Ztuhlý kov v podobě prášku se shromažďuje na dně nádoby. Metoda je schematicky znázorněna na Obr. 8. Tato metoda získávání kovového prášku patří mezi nejčastější, prášek se však kvůli jeho nedostatečné kvalitě nepoužívá pro aditivní technologie, ale spíše pro lisování či syntrování. Mezi nevýhody metody patří vysušování vzniklého prášku, které proces výroby prodlužuje. (11)



Obr. 8 Schéma metody water atomisation (11)

### Metoda Gas atomisation

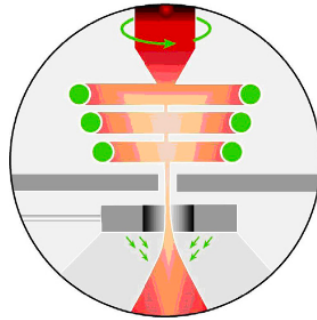
Metoda rozprašování plynem se příliš neliší od metody rozprašování vodou. Rozdíl spočívá v jiném rozprašovacím médiu, jímž, jak vyplývá z názvu, není voda, nýbrž plyn. Plynem může být i vzduch, častěji se však používají inertní plyny jako argon či dusík, protože snižují riziko oxidace a znečištění kovu. Produkty této metody dosahují vyšší kvality než produkty metody Water atomisation. Elementy prášku jsou více sférické díky tomu, že ochlazení plynem je pomalejší než ochlazení vodou. (11), (10)

### Metoda Vacuum induction melting (VIM)

Pro operace s vysokými požadavky byla na základě metody Gas atomisation vytvořena metoda VIM, její výhoda spočívá v umístění vakuové pece přímo nad rozprašovací komorou, proces tedy probíhá ve vakuu, čímž se zaručuje větší čistota prášku. Vakuum je zvláště přínosné při výrobě slitin hliníku nebo titanu (Al, Ti), kdy je nutné zabránit přístupu kyslíku ( $O_2$ ). Rozprašovacím plynem je vodík ( $H_2$ ). (11)

### Metoda Electrode induction melting gas atomisation (EIGA)

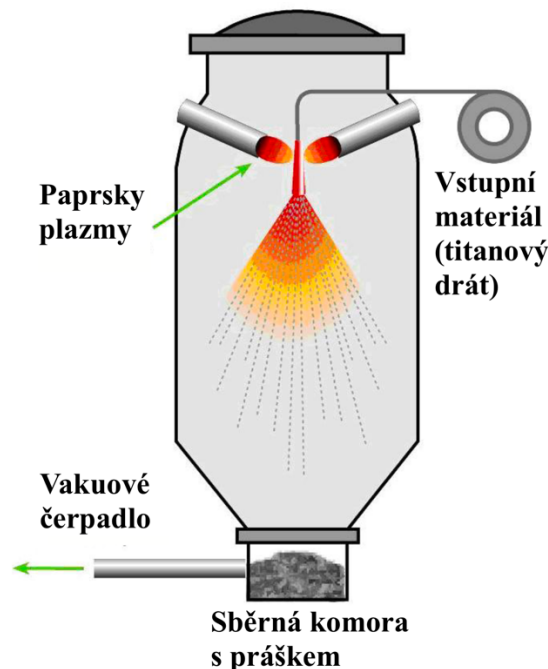
EIGA je druh metody gas atomisation, kdy je kov podáván nad rozprašovací komorou v podobě tyče, která se těsně nad komorou taví pomocí indukční spirály. Proces je znázorněn na Obr. 9. Metoda se používá pro výrobu reaktivních slitin jako Ti-6Al-4V. Účelem metody je minimalizace kontaktu s okolními materiály a tím rizika kontaminace roztaveného kovu (titanu). (11)



Obr. 9 Schéma metody EIGA (11)

### Metoda Plasma atomisation

Tato metoda se používá pro tvorbu prášků s požadavkem na vysokou kulatost částic prášku. Polotovarem bývá drát nebo prášek, který se přivádí do rozprašovací nádoby, kde je paprsky plazmy taven a zároveň rozprašován. Schéma procesu je na Obr. 10. (11)



Obr. 10 Schéma metody plasma atomisation (11)

### Metoda Hydride – dehydride (HDH)

Metoda se od ostatních liší počátečním zpracováním materiálu, který se netaví. Zpracování zahrnuje drcení, mletí, třídění větších částic a jejich opětovné zpracování. Metoda využívá křehkosti materiálů při vystavení vodíku. V případě titanu jsou vytvořeny hydridy titanu, které se drtí, melou a následně jsou transportovány zpět do hydridizační jednotky, kde se z částic prášku odstraní přebytečný vodík. Vzniklé částice jsou nepravidelné. Prášky se často používají jako polotovary ve formě prášku pro metodu Plasma atomisation. (11), (9)

#### 2.2.2 Použitý materiál – MS1

Materiál Maraging steel MS1 svým chemickým složením odpovídá materiálům US 18 % Ni Maraging 300, EU 1.2709 a DIN X3NiCoMoTi. Tento typ materiálu se vyznačuje velmi dobrými mechanickými vlastnostmi. Součásti vyrobené z materiálu MS1 jsou po vytištění lehce obrobitelné a mohou být dodatečně vytvrzeny na více než 50 HRC (za teploty 490 °C a setrvání 6 hodin na této teplotě) tento proces zvyšuje i pevnost oceli. Kvůli navařování jednotlivých

vrstev prášku na sebe vykazují vyrobené součásti určitou anizotropnost, ta může být odstraněna nebo snížena pomocí vhodného tepelného zpracování. (12)

### Chemické složení kovového prášku Maraging steel – MS1 (12)

Fe	(zůstatek)
Ni	(17 - 19 % hm.)
Co	(8,5 - 9,5 % hm.)
Mo	(4,5 - 5,2 % hm.)
Ti	(0,6 - 0,8 % hm.)
Al	(0,05 - 0,15 % hm.)
Cr, Cu	(každý 0,5 % hm.)
C	(0,03 % hm.)
Mn, Si	(každý 0,1 % hm.)
P, S	(každý 0,01 % hm.)

Ve výpisu chemického složení je vidět, že kovový prášek obsahuje velké množství niklu, kobaltu, molybdenu a samozřejmě železa. Nikl je austenitotvorný prvek, který zvyšuje prokalitelnost při nižších teplotách a houževnatost materiálu. Zlepšení prokalitelnosti přispívá i molybden, který i současně snižuje popouštěcí křehkost a zvyšuje tak odolnost materiálu proti vysokým teplotám. Kobalt zvyšuje odolnost proti popuštění, pevnost za tepla a tepelnou vodivost. Je zvláště významný pro precipitačně vytvrditelné oceli – maragingy. (13), (14)

### Mechanické vlastnosti

	Po tisku	Po vytvrzení [2]
<b>Pevnost v tahu [6]</b>		min. 1930 MPa min. 280 ksi
<b>v horizontálním směru (XY)</b>	typ. 1100 ± 100 MPa typ. 160 ± 15 ksi	typ. 2050 ± 100 MPa typ. 297 ± 15 ksi
<b>ve svislém směru (Z)</b>	typ. 1100 ± 100 MPa typ. 160 ± 15 ksi	

[6] Tensile testing according to ISO 6892-1:2009 (B) Annex D, proportional test pieces, diameter of the neck area 5mm (0.2 inch), original gauge length 25mm (1 inch).

Obr. 11 Mechanické vlastnosti MS1 (12)

Pevnost materiálu v tahu je v horizontálním i svislém směru stejná, tedy 1100 ± 100 MPa což odpovídá například oceli 12042 v zušlechtném stavu, která se používá pro vysoce namáhané spojovací součásti. Materiál MS1 této pevnosti dosahuje již přímo po tisku. Po vytvrzení dosahuje materiál MS1 pevnosti až 2050 ± 100 MPa. (12) (15)

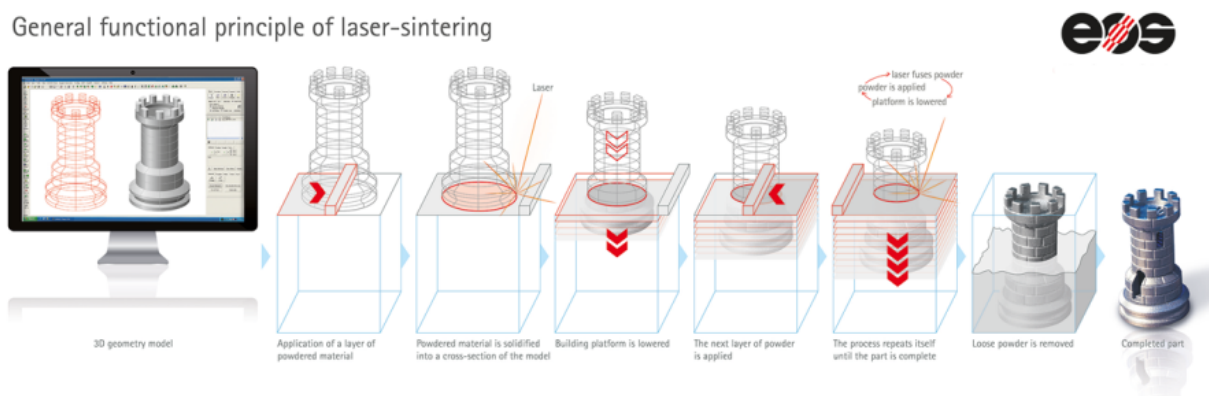
Hardness [7]	typ. 33 - 37 HRC	typ. 50 - 56 HRC
[7] Rockwell C (HRC) hardness measurement according to EN ISO 6508-1 on polished surface. Note that measured hardness can vary significantly depending on how the specimen has been prepared.		

Obr. 12 Tvrdost materiálu MS1 (12)

Tvrdost oceli MS1 dle Rockwella se přímo po tisku pohybuje kolem 33-37 HRC, zatímco po vytvrzení dosahuje hodnot 50-56 HRC. (12)

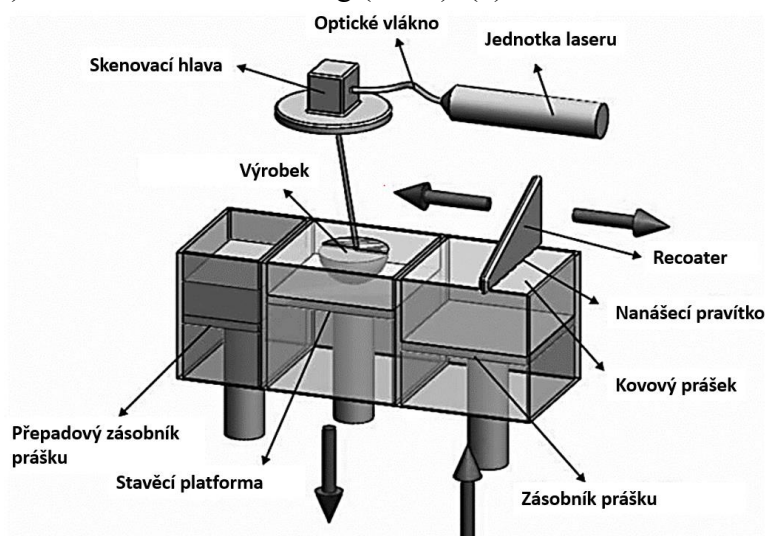
### 2.3 Analýza současného stavu ve výrobě kovových součástí pomocí aditivní technologie

Aditivní technologie výroby kovových dílů spočívá v postupném v nanášení velmi tenkých vrstev prášku (20 $\mu$ m až 100 $\mu$ m) rovnací jednotkou – pravítkem či kartáčkem na stavěcí platformu. Vysoce výkonný laserový paprsek poté svaří prášek na přesně daných místech dle 3D modelu vygenerovaného počítačem. Zbylý prášek zůstává nespečen v sypké formě. Platforma poté sjede mírně dolů o hodnotu tloušťky jedné vrstvy a je nanášena další vrstva prášku. Prášek je znovu přivážen k předchozí vrstvě prášku na předdefinovaných místech. Tento postup je opakován až do spečení celé součásti. Nespečený kovový prášek lze vysypat, přesít a znovu použít při následujícím tisku. Celý postup výroby je znázorněn na Obr. 13. Dle použitého materiálu může být díl vytvořen metodou stereolitografie – SLS, metodou laserového spékání (sintrace), nebo jednou z mnoha dalších aditivních metod. (16) (9)



Obr. 13 Postup při 3D tisku (16)

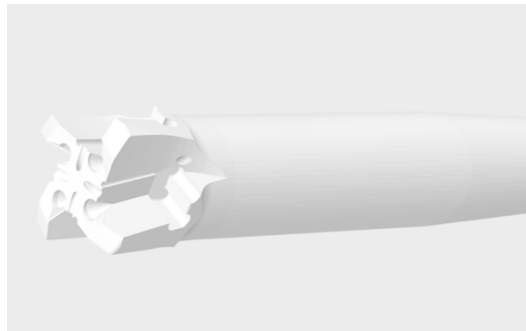
V současné době se tématikou 3D tisku zabývá mnoho firem, které vyrábí stroje pro AM a zároveň vymýšlí nové způsoby AM. Mezi tyto průkopníky patří EOS, Renishaw, Concept Laser, 3D Systems, Arcam a Laser Engineeres Net Shaping. Jmenované firmy se podílely na vývoji těchto technologií: Direct Metal Selective Laser Melting (SLM), Direct Metal Laser Syntering (DMLS) a Electron Beam Melting (EBM). (9)



Obr. 14 Princip funkce 3D tiskárny typu DMLS (9)

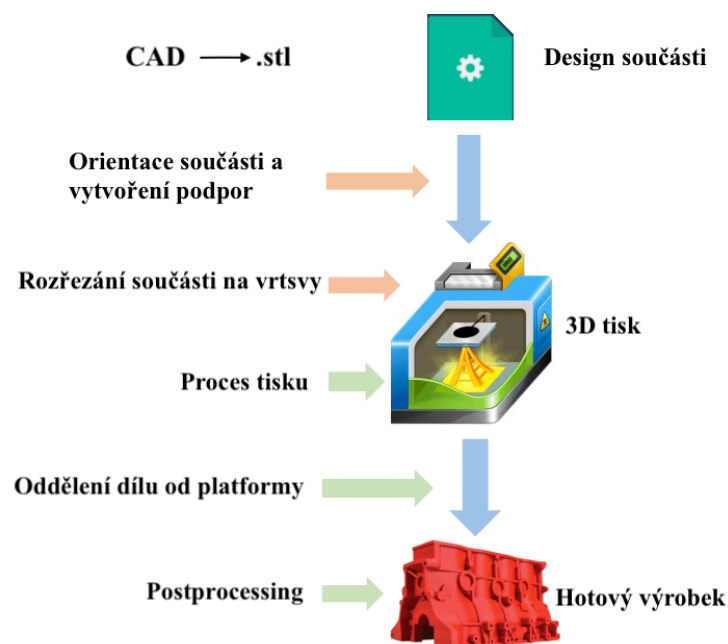
### 2.3.1 Postup výroby při AM

Aditivní technologii výroby si většina lidí představuje jako technologii s neomezenými možnostmi a jednoduchou přípravou ke které stačí mít připravený pouze model. Ve skutečnosti je však příprava výroby pro 3D tisk poměrně složitou záležitostí, která vyžaduje mnoho zkušeností. Zvolené parametry v přípravě výroby totiž rozhodují o tom, zda se součást podaří vytisknout či nikoliv, případně jaká bude její kvalita.



Obr. 15 Model ve formátu .STL

Aditivní výroba se rozděluje do několika kroků. Prvním krokem je tvorba 3D modelu a jeho exportování do formátu .STL (Standard Triangle Language) v co nejvyšší možné kvalitě. Další fází je určení polohy tištěné součásti na tiskové platformě a současně vytvoření nutných podpor. Následně probíhá „rozslicování“ neboli rozřezání součásti na jednotlivé vrstvy, odhalení chyb a výběr vnitřní struktury. Vyjmenované kroky se provádí na externím PC v kanceláři či jiném pracovišti, není je potřeba provádět u stroje, lze je tedy přirovnat k programování v CAM programech. Následuje přenos dat do stroje a jeho příprava, která zahrnuje zahřátí platformy, doplnění kovového prášku atd. Po spuštění programu nezbyvá už jen čekat na výrobu součásti. Vytisknutá součást se po vyndání ze stroje musí dále upravovat. Je potřeba součást tepelně zpracovat, oddělit od platformy a pro dosažení lepší kvality povrchu dále konvenčně obrábět či omílat. (9)

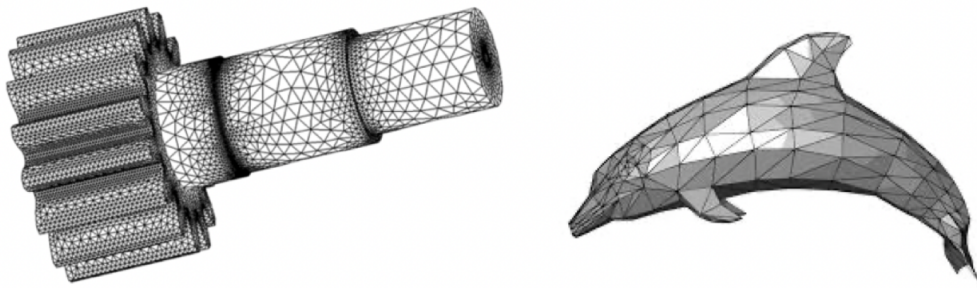


Obr. 16 Průběh procesu výroby dílu pomocí AM (17)

V pokračování této kapitoly jsou popsány jednotlivé etapy přípravy výroby a jejich vliv na kvalitu vyrobené součásti.

### **Etapa 1: Převedení 3D modelu do formátu .STL**

Základem zdrojových dat pro aditivní výrobu je model ve formátu .STL vyexportovaný z 3D modelu z CAD systému, proto je kvalita modelu .STL velmi důležitá. Každá chyba způsobená příliš velkým trojúhelníkem v modelu .STL může způsobit problémy při tisku. Nedostatečně kvalitní model také vede k nekvalitnímu povrchu vytištěné součásti. Některé chyby se sice dají dodatečně opravit v přípravném programu, ale jednodušší a časově úspornější je nastavit vyšší kvalitu .STL modelu.



*Obr. 17 Kvalitní 3D model.STL vlevo a nekvalitní 3D model.STL vpravo (18) (19)*

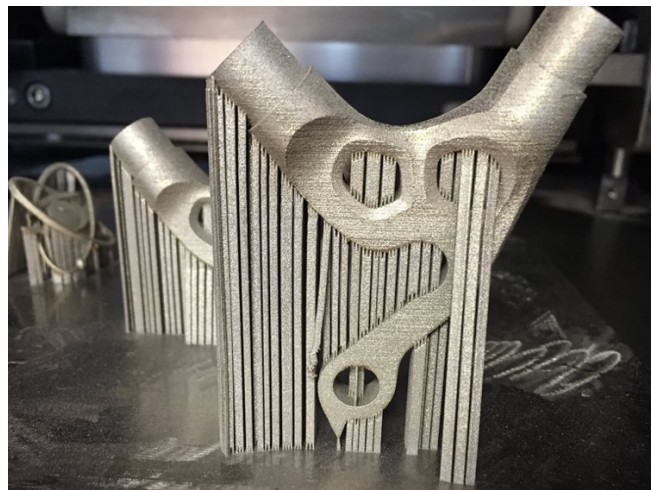
### **Etapa 2: Orientace součásti a tvorba podpor**

V této fázi přípravy výroby se součást virtuálně v SW orientuje do polohy, v jaké se bude nacházet po dokončení tisku. Poloha součásti je důležitou fází přípravy výroby, protože ovlivňuje umístění podpor i kvalitu jednotlivých ploch výrobku.

Pro orientaci a tvorbu podpor je v RTI používán SW Magics, tento SW sám navrhne podpory a pracovník je upraví dle vlastních zkušeností, proto lze tuto fázi výroby označit jako poloautomatickou. SW Magics umožňuje i odstranění drobných vad modelu. Výstupem této etapy je model ve formátu .CLI a jeho daná orientace včetně podpor. (9)

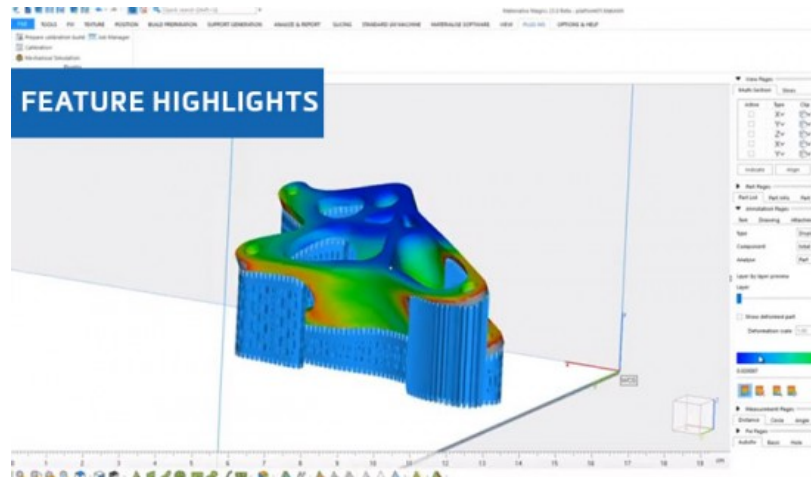
Podpory zastávají několik funkcí:

- Podpora převislých částí
- Odvod tepla ze součásti
- Ukotvení součásti k platformě během výroby



*Obr. 18 Funkce podpor (20)*

Podpory jsou obecně nežádoucím prvkem, protože se při jejich použití prodlužuje doba tisku i objem použitého prášku a výroba je dražší. Odstranění podpor by mělo být co nejsnazší. Bez použití podpor by však některé prvky nešly vytisknout, nebo by se při jejich tisku vyskytovaly potíže. Mezi takové prvky patří převislé konce a obecně stěny, které jsou vůči platformě naklonené o méně než  $45^\circ$ , problémové jsou také převislé zaoblení s poloměrem větším než 4 mm. Podpory jsou tištěny za jiných technologických podmínek než samotná součást a mají tedy i odlišné mechanické vlastnosti. (9)

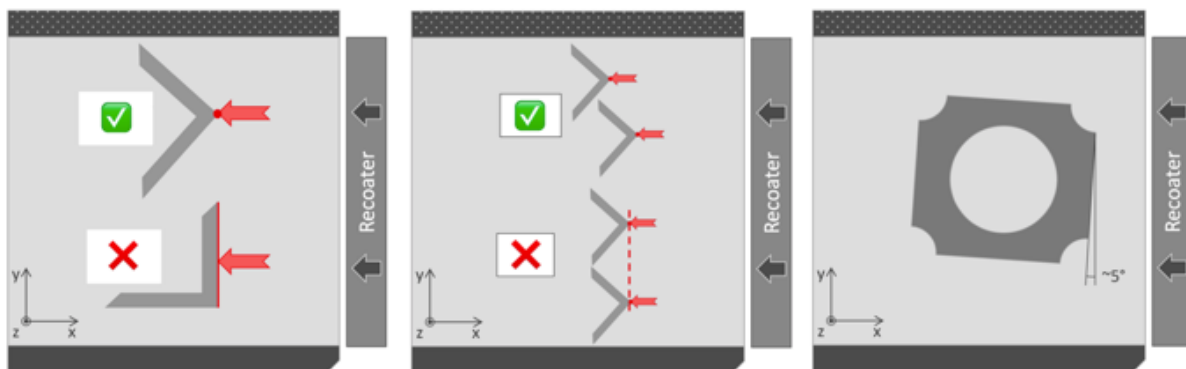


Obr. 19 Podpory a orientace součásti (21)

### Etapa 3: Rozřezání součásti na vrstvy a umístění na platformě

Součást zorientovaná v předchozím kroku se nyní musí virtuálně rozřezat na vrstvy o tloušťce odpovídající zvolenému intervalu, přitom není podmínkou, že zvolený interval musí odpovídat tloušťce tisknuté vrstvy. Řezy jsou navrstveny ve směru tisku. Pracovník zvolí pouze interval pro rozvrstvení, které poté probíhá plně automaticky. (22)

Pro zachování stability procesu je potřebné součásti umísťovat na platformu podle daných pravidel, to platí zvláště při současné výrobě několika součástí zároveň. Recoater se při nanášení nové vrstvy prášku pohybuje velmi blízko spečené části výrobku (0,02mm) a je nutné k tomuto faktu přihlížet. Následkem tepla a vnitřního pnutí může dojít k přizvednutí součástí a v případě nevhodného umístění součástí na platformu dochází k namáhání recoateru a zhoršení kvality nanesené vrstvy. Místa nájezdu na součásti jsou kritická a je důležité, aby na ně recoater najížděl postupně. V případě výroby součásti s delší hranou je potřeba součást natočit alespoň o  $5^\circ$ . (23)

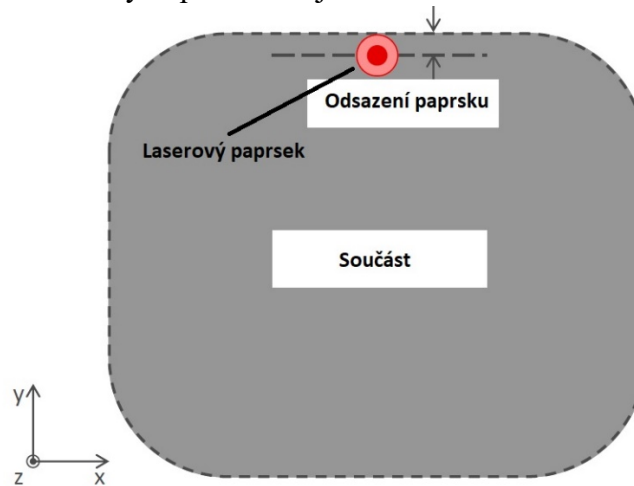


Obr. 20 Znárodnění správného umístění součásti (23)

#### Etapa 4: Parametry tisku

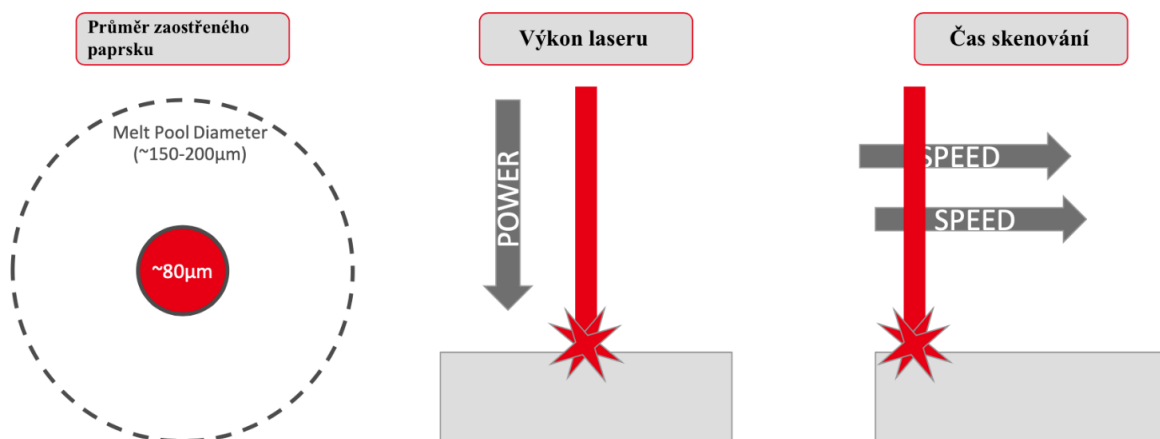
Nastavování parametrů tisku lze přirovnat k nastavování řezných podmínek při obrábění. Podmínky přímo ovlivňují kvalitu vytištěného dílu. Jejich nastavování může probíhat dvojím způsobem.

První variantou je použití přednastavených podmínek od výrobce stroje. Tyto parametry jsou univerzální a lze jimi tisknout většinu různých typů dílů, jak plných, dutých, tak i s porézní strukturou. Pracovník může parametry ovlivnit jen lehce, tzn. změnou tloušťky vrstvy, odsazením paprsku od hrany součásti, strategií tisku, nebo změnou počtu vícekrát spečených vrstev. Při použití přednastavených parametrů je kvalita dílu deklarovaná výrobcem. (23), (9)



Obr. 21 Odsazení paprsku (23)

Druhou variantou volby parametrů tisku je zadávání vlastních parametrů. Uživatel má možnost si libovolně nastavit širokou škálu parametrů jako výkon laserového paprsku, průměr zaostřeného paprsku, čas skenování vrstvy či strategii skenování atd. Tato varianta vyžaduje vyšší zkušenosti. V případě použití této varianty výrobce nezaručuje kvalitu vyrobeného dílu. Volba vlastních parametrů je určena spíše pro výzkumné organizace než pro průmyslovou výrobu. (23), (9)



Obr. 22 Parametry tisku (23)

#### Etapa 5: Příprava stroje

Příprava stroje značně ovlivňuje kvalitu tisku, součástí přípravy je více činností, které provádí operátor. Pracovní prostor musí být důkladně vyčištěn od zbylého prášku, zásobník prášku musí být dostatečně zaplněn, aby nedošel v průběhu tisku prášek. Prášek v zásobníku by měl být dostatečně upěchován, aby se vytěsnili vzduchové mezírky mezi jednotlivými kuličkami



prášku. Platforma se po oddělení předešlého výtisku musí znovu zarovnat. Před začátkem tisku se na platformu nanese první vrstva prášku, zasypou se dutiny kolem platformy a pracovní prostor se naplní plynem, který tvoří ochrannou atmosféru pro tisk.

### **Etapa 6: Průběh tisku a jeho ovlivnění**

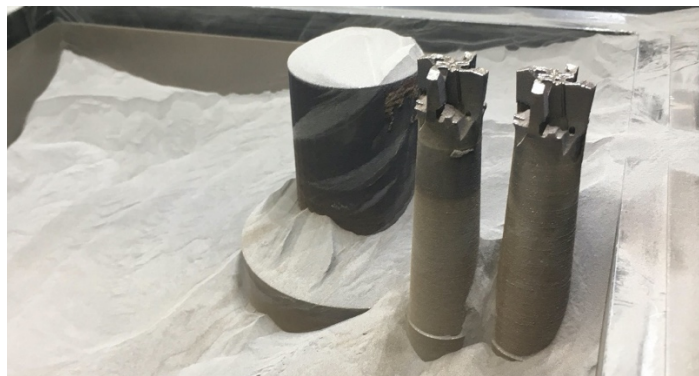
Celá etapa je plně automatická, v případě zpozorování komplikací má však pracovník možnost tisk částečně ovlivnit. Lze měnit množství prášku na jednu vrstvu pomocí tzv. faktoru naplnění. Je možné i úplně zastavit tisk, nebo zastavit tisk pouze jedné či více součástí, které se jeví jako problémové a mohly by znemožnit i tisk ostatních součástí na platformě. Celá operace nevyžaduje přítomnost operátora, ten však může průběh tisku pomocí kamery uvnitř pracovního prostoru pozorovat a případně zasáhnout. Při kolizi recoateru s tištěnou součástí se proces zastaví sám.



*Obr. 23 Průběh tisku*

### **Etapa 7: Vyndání vytištěného dílu**

Vytištěné díly jsou očištěny od přebytečného prášku a vyndány ze stroje spolu s nimi spečenou platformou. Nespečený prášek je filtrován a vrací se zpět do zásobníku. Prášek zbylý v pracovním prostoru je odsán vysavačem a je s ním zacházeno jako s nebezpečným materiálem, může být totiž výbušný či vznětlivý. Pracovník musí být při vyndávání tisku v utěsněném obleku.



*Obr. 24 Součásti na platformě obklopené kovovým práškem MSI*

### **Etapa 8: Postprocessing**

Po vyndání součásti ze stroje jsou zvláště velké součásti zatíženy obrovským pnutím, proto se okamžitě tepelně zpracovávají pro uvolnění pnutí. Bez tepelného zpracování by mohlo dojít k deformaci součásti, utržení podpor od platformy či dokonce ohnutí platformy. Následuje odstranění podpor a očištění součásti od zbylého prášku, např. v dutinách součásti. Součást se dále může obrábět, pískovat či omílat.



Obr. 25 Fréza po obrobení

Na Obr. 25 je zachycena fréza s obrobenými lůžky pro VBD, závity pro šroubky na uchycení VBD byly vyřiznuty do plného materiálu, nepředtiskávaly se.



Obr. 26 Ukázka vzorků po postprocessingu

Obr. 26 jsou tři tyčky vyrobené aditivní technologií. První tyčka zleva je pouze vyndaná z tiskárny a oddělena od platformy, druhá zleva je navíc omílána 120 minut v omílacím médiu HSC 1/300 a třetí je osoustružena a následně omílána 100 minut za stejných podmínek jako předchozí tyčka.

## 2.4 Analýza současného stavu v konstrukci řezných nástrojů

V současné době je zákazníky požadován vysoký úběr materiálu za co nejkratší čas. Pro velký úběr materiálu je potřeba velká řezná rychlost i vysoká posuvová rychlost. Při takové řezné rychlosti jsou zejména u nástrojů menších průměrů vyžadovány vysoké otáčky. Důsledek vysoké posuvové rychlosti je pak velký ohybový moment působící na nástroj, který přes upínač přenáší ohybový moment na celou soustavu. S tím vším současně vznikají i vibrace (zvláště u nástrojů s délkou přesahující 3xD), které se pro zachování stability řezu musí tlumit. K tomu se v dnešní době používá více způsobů. Pokud tlumicí systémy nedostačují, je potřeba snižovat řezné podmínky, což je pro zákazníka nežádoucí. Proto je v současné době potřebné hledat další systémy tlumení a jeho výroby.

Důsledkem vysokých řezných podmínek jsou také extrémní teploty v místě řezu, které tepelně zatěžují nástroj. Ke snížení teploty v místě řezu významně přispívá procesní kapalina, která celou oblast řezu chladí. Je však velmi důležitý přívod procesní kapaliny, aby se kapalina dostávala do místa řezu kontinuálně a ochlazovala tak břit bez přerušování, při přerušovaném chlazení je totiž nástroj vystaven tepelným šokům, které nástroj zatěžují natolik, že chlazení může být více škodlivé než prospěšné. Přívod procesní kapaliny do místa řezu může být zajištěn buď externím chlazením, nebo interním chlazením vnitřkem nástroje. Tvorba kanálků uvnitř

nástroje je však komplikovaná a konstrukce kanálků je tudíž standardně podřízená technologii výroby.

### Požadované vlastnosti řezných nástrojů

Řezný nástroj je v přímém styku s obrobkem a přímo tedy ovlivňuje celý řezný proces, proto se na něj kladou vysoké požadavky. Při konstrukci nástroje se přihlíží k mnoha hlediskům. Mezi základní vlastnosti nástroje patří jeho hmotnost a tuhost. Hmotnost nástroje by měla být co nejnižší, aby kinetická energie jeho vibrací byla taktéž co nejnižší a aby tuhost celé soustavy tyto vibrace snáze utlumila. Tuhost nástroje musí být naopak co nejvyšší. Velký podíl na chování nástroje má také jeho základní tvar, řezná geometrie, mikro geometrie i materiál použitý na jeho výrobu. Mnoho výrobců se při konstrukci nástrojů soustředí na schopnost tlumení vibrací. Celý nástroj musí být především vyrobitelný, přičemž kvalita výroby také hraje svou roli.

Vlastnosti řezného nástroje vylepšuje i správný přívod procesní kapaliny do místa řezu. V současné době je za nejlepší přívod procesní kapaliny považován přívod vnitřkem nástroje. Tento typ přívodu je však složitější na výrobu a v některých případech může být konvenčními metodami nevyrobitelný. Řešením pro výrobu mohou být aditivní technologie. (24)

### Technologie frézování

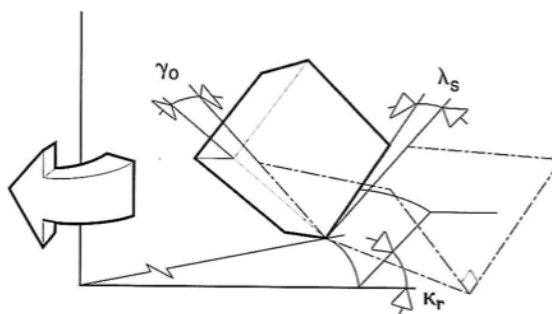
Frézování je způsob obrábění, při kterém je pomocí frézy vytvářen nový, rovinný nebo tvarový povrch. Fréza je rotační několikabřitý nástroj, který je poháněn strojem zvaným frézka. Při frézování je hlavním řezným pohybem pohyb rotační, ten zpravidla vykonává fréza. Vedlejší pohyb posuvný může být vykonáván buď také frézou, nebo stolem frézky (obrobkem).

### Frézování s velkým vyložením nástroje

Za frézování s velkým vyložením nástroje se považuje frézování s vyložením přesahujícím 3xD, přičemž tato práce se zabývá frézou s vyložením až 5xD. S rostoucím vyložením nástroje se snižuje jeho tuhost, proto právě při tomto typu obrábění hrozí růst vibrací a ztráta stability řezného procesu. Je potřeba, aby fréza tlumila vznikající vibrace, ideálně předcházela jejich vzniku.

### Geometrie břitu

Geometrie břitu frézy je tvořena několika úhly, které jsou dány polohou VBD. Velmi podstatné jsou tzv. funkční úhly, které určují polohu VBD. Funkční úhly jsou: úhel sklonu ostří  $\lambda_s$  a ortogonální úhel čela  $\gamma_o$ , oba úhly jsou zobrazeny na Obr. 27. Další důležitý úhel je úhel nastavení hlavního ostří  $\kappa_r$ . Tyto úhly se zásadně podílejí na způsobu tvorby třísky, jejím odchodu z řezu i vznikajících řezných silách. Úhly  $\lambda_s$  a  $\kappa_r$  mají vliv na způsob vnikání břitu do obrobku a směr odcházení třísek, zatímco úhel  $\gamma_o$  ovlivňuje řezné síly a s nimi i výkon potřebný pro obrábění. (25)



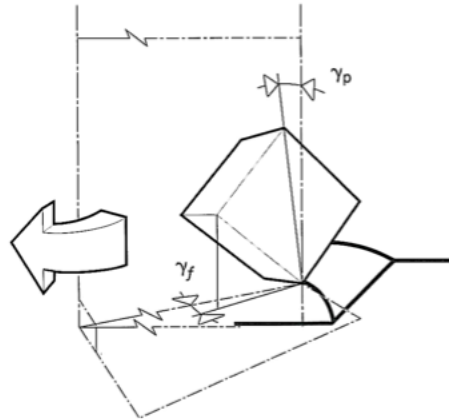
Obr. 27 Úhel sklonu ostří, ortogonální úhel čela a úhel nastavení (26)

Funkční úhly lze získat výpočtem dle následujících formulí (26):

$$\tan \gamma_s = \tan \gamma_f \cdot \sin \kappa_r - \tan \gamma_p \cdot \cos \kappa_r$$

$$\tan \gamma_o = \tan \gamma_p \cdot \sin \kappa_r - \tan \gamma_f \cdot \cos \kappa_r$$

U fréz se dále používají tyto konstrukční úhly: axiální úhel čela  $\gamma_p$  a radiální úhel čela  $\gamma_f$ . Axiální úhel čela  $\gamma_p$  se měří v rovině přísmovové, tedy v rovině rovnoběžné s osou rotace frézy. Radiální úhel čela  $\gamma_f$  se měří v rovině posuvové, tedy v rovině kolmé k ose rotace frézy. Oba zmíněné úhly zobrazeny na Obr. 28. (25)



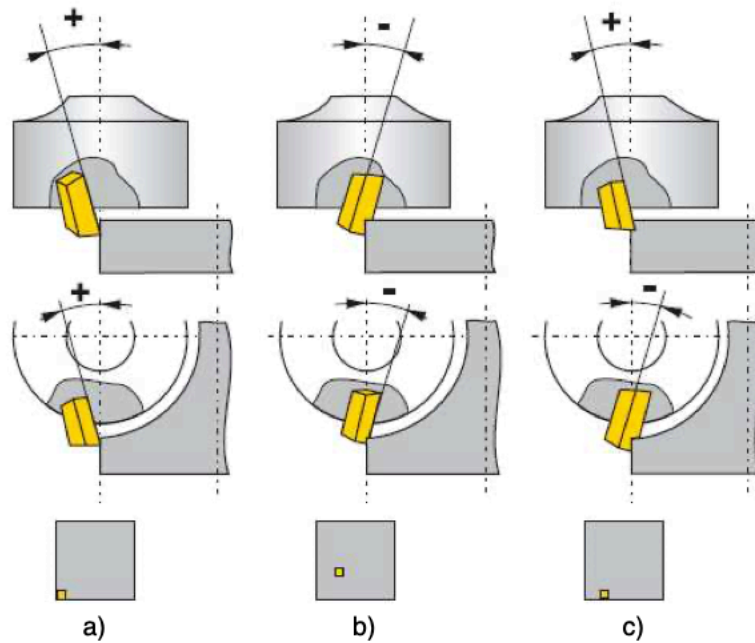
Obr. 28 Axiální a radiální úhel čela (26)

Různými kombinacemi zmíněných konstrukčních úhlů vznikají tři typy geometrií fréz. Tyto geometrie jsou: pozitivně – negativní, dvojitě pozitivní a dvojitě negativní. Každá geometrie je charakteristická svými vlastnostmi. Geometrie určují pozici prvotního kontaktu břitu a obráběného materiálu. (25)

Při pozitivně-negativní geometrii má fréza axiální úhel čela  $\gamma_p$  pozitivní a radiální úhel čela  $\gamma_f$  negativní. Frézy s touto geometrií mají možnost využití vyššího posuvu na zub a větší hloubky řezu, to je umožněno tím, že pozitivní axiální úhel čela skvěle utváří třísku a negativní radiální úhel čela zvyšuje odolnost břitu. Frézy s pozitivně-negativní geometrií se používají především s úhlem nastavení hlavního ostří  $\kappa_r$  45°. (25)

Frézy s dvojitě pozitivní geometrií mají axiální i radiální úhel čela pozitivní. Omezením této geometrie je použití pouze jednostranných VBD, tato nevýhoda je vyvážena nižšími řeznými silami a nižším výkonem stroje potřebným pro obrábění. Díky vzniku menších řezných sil je geometrie vhodná pro obrábění tenkostěnných obrobků. Frézy s touto geometrií tvoří především třísky ve tvaru velmi krátkých šroubovic, které snadno odcházejí z řezu. Nástroj s touto geometrií je vhodný zejména pro obrábění slitin hliníku Al či mědi Cu, ale i tvárné oceli, a dokonce žáruvzdorné či korozivzdorné oceli. (25)

Negativní axiální i radiální úhel čela je u dvojitě negativní geometrie. V nástrojích s touto geometrií se používá negativní VBD (úhel břitu 90°), úhel hřbetu je určen naklopením VBD vůči těle frézy. Výhodou geometrie je možnost použití oboustranných VBD. Frézy s dvojitě negativní geometrií se používají pro obrábění tvrdých materiálů, tedy tvrzených ocelí či šedé litiny. Nevýhodou této geometrie je potřeba vyššího výkonu obráběcího stroje i vyšší tuhosti soustavy SNOP, protože při obrábění vznikají velké řezné síly. (25)



Obr. 29 Rozdělení geometrií fréz a) dvojitě pozitivní b) dvojitě negativní c) pozitivně-negativní (25)

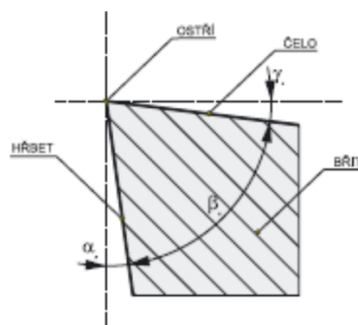
### Tvar břitu VBD

Vyměnitelné břitové destičky jsou často vyráběny v různých typech břitu, každý břit je přitom vhodný pro obrábění jiného materiálu. Tvar břitu udílí významný podíl vlastností frézy.

Tvary břitů jsou následující (25):

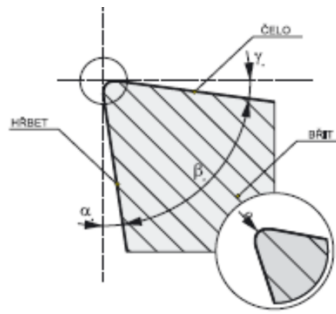
- Ostrý břit
- Zaoblený břit
- Břit s fazetou
- Zaoblený břit s fazetou

Ostrý břit má oproti ostatním typům menší pevnost, přesto je vhodný pro obrábění některých typů materiálů jako jsou slitiny hliníku Al, mědi Cu či dalších neželezných kovů, jedná se především o skupinu materiálů N dle ISO. Pro jejich obrábění je vhodný zejména kvůli malé deformaci odřezávané vrstvy, omezení vzniku nárůstku a snížení řezných sil. Ilustraci ostrého břitu lze vidět na Obr. 30.



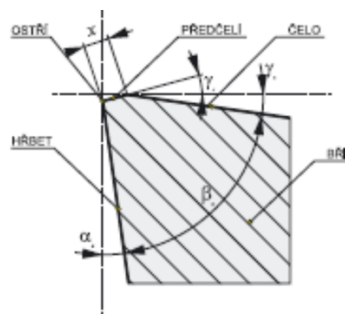
Obr. 30 Ostrý břit (25)

Zaoblený břit má zaoblení ostří s velmi malým poloměrem, které významně zvyšuje odolnost ostří proti vyštipování či prasklinám. Tato úprava se nazývá rektifikace a v dnešní době používána u drtivé většiny břitů bez fazety.



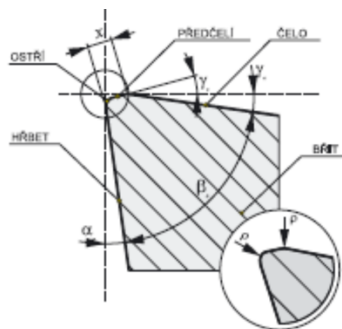
Obr. 31 Zaoblený břit (25)

Fazeta výrazně zvyšuje mechanickou odolnost břitu, protože zvětšuje úhel břitu  $\beta$  v úzké blízkosti břitu. Tato úprava břitu se často nahrazuje již zmíněným zaobleným břitem.



Obr. 32 Břit s fazetou (25)

Zaoblený břit s fazetou je nejodolnější z popisovaných břitů. Je zde spojeno zvýšení odolnosti pomocí fazety i pomocí rektifikace břitu. Takový typ břitu se využívá pro obrábění materiálů ze skupiny ISO H či ISO K, tedy tvrdých materiálů či litin.

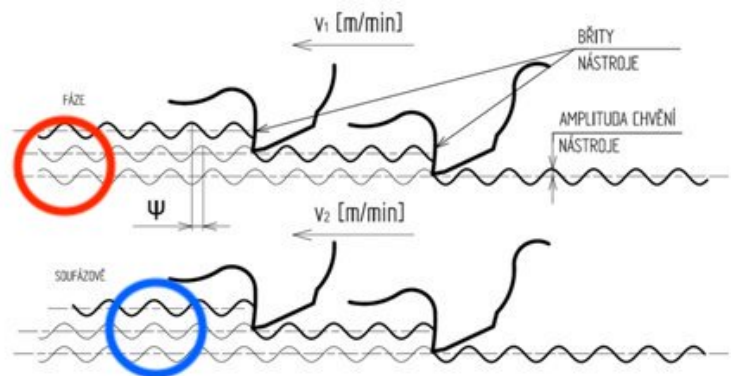


Obr. 33 Zaoblený břit s fazetou (25)

#### 2.4.1 Vibrace při frézování

Příčinou vzniku vibrací je omezená tuhost soustavy SNOP (stroj-nástroj-obrobek-přípravek). Vibrace při frézování vznikají více či méně vždy a nedají se úplně odstranit. Dají se však různými způsoby omezit, jedním způsobem může být zvýšení tuhosti soustavy SNOP, které může být značně komplikované či drahé. Vibrace se dají tlumit také pomocí různých tlumících prvků v soustavě SNOP či změnou řezných podmínek. Změna řezných podmínek se zdá být nejjednodušším řešením, pokud se však jedná o snížení řezných podmínek, je taková změna nežádoucí. Snížení řezných podmínek by znamenalo zmenšení úběru a prodloužení času obrábění, což by zdražovalo výrobu. Vibrace se v teorii rozlišují na samobuzené a nucené. (27)

Vznik nucených vibrací lze popsat následovně. Předpokladem je, že každý zub odebrává vrstvu s mírně odlišnou tloušťkou, to je způsobeno mírným kmitáním frézy či nerovností povrchu z předchozího zpracování. Tato mírná odchylka v tloušťce způsobí mírně odlišné síly, které působí na jednotlivé zuby. Vzniklé síly nutí soustavě SNOP frekvenci odpovídající zvlnění povrchu a řezné rychlosti. Tím vznikají na povrchu vlny. Protože následující zub frézy odebrává vrstvu proměnné tloušťky a soustava SNOP pořád nepatrně kmitá, vytváří zub na obrobeném povrchu větší vlnu s odlišnou frekvencí. Povrchové vlny nejsou shodné s kmitáním nástroje a celý proces se tak záběrem každého zubu opakuje, tím dochází ke zvyšování kmitání. Výchylku kmitání omezuje energie vložená do procesu a také samotné tlumení soustavy SNOP. Energii potřebnou pro oddělení materiálu a vznik nového povrchu nelze změnit a je proto potřebné co nejvíce zefektivnit tlumení soustavy SNOP. Kmitání lze také snížit změnou řezné rychlosti tak, že se frekvence kmitání dostane mimo vlastní frekvence soustavy. (27)



Obr. 34 Vznik nucených vibrací (28)

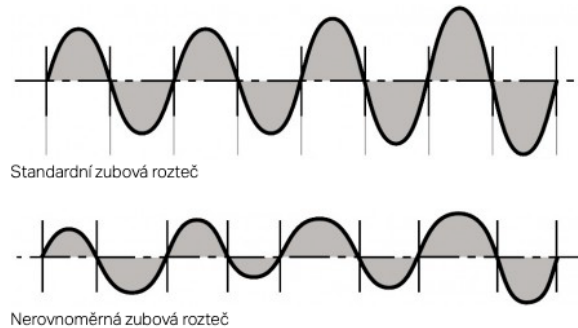
Horní část Obr. 34 (s červeným kruhem) zobrazuje obrábění zvlněného povrchu s posunutím o  $\psi$  vůči kmitům nástroje. V červeném kruhu lze vidět odlišné průřezy jednotlivých třísek. Dolní část Obr. 34 (s modrým kruhem) zobrazuje ideální případ, kdy vůči sobě vlny povrchu a kmity nástroje nejsou posunuty. Průřezy jednotlivých třísek jsou pak stejné, to lze vidět v modrém kruhu. (27)

Samobuzené vibrace jsou způsobené samotnou činností stroje a jsou brány jako přirozené. Jejich příčinou je odlišný koeficient tření za klidu a za pohybu, konkrétně se jedná o tření břitu o obrobek. Tyto vibrace se nedají zcela potlačit, ale dají se omezit. Snížení vibrací přispívá použití jemnozubé frézy nebo frézy se zuby ve šroubovici. Tyto konstrukční prvky jsou dnes již standardem a mají za úkol plynulě převzít sílu z jednoho zubu na druhý. Při zajištění břitu do materiálu se totiž do soustavy naakumuluje energie (odpovídající převrácené hodnotě tuhosti), která se po vyjetí břitu uvolní, a tím rozkmitá soustavu SNOP určitou frekvencí a amplitudou. Pokud však tuto energii dříve převezme následující břit, k rozkmitání nedojde. Toto přebírání nikdy není zcela plynulé a určité vibrace tak vznikají, jsou však daleko menší. Snížení vibrací způsobí také rostoucí tuhost soustavy SNOP. (27)

Zvláštní význam mají vibrace při velkém vyložení nástroje, kdy nástroj díky svému poměru délky a průměru (nad  $3xD$ ) ztrácí tuhost a je snazší ho při frézování rozvibrovat. Velké vyložení je v dnešní době potřebné u mnoha operací, neboť je nutné například při frézování dnes hojně využívaných forem pro vstřikování plastů. Právě proto je na trhu snaha vytvořit nástroj s velkým vyložением, který bude co nejvíce tlumit vibrace vznikající při frézování.

Pro snížení vibrací používají výrobci nástrojů několik konstrukčních prvků. Mezi všeobecně známé prvky pro snížení vibrací patří nerovnoměrný rozestup zubů, který nepravidelným

záběrem zubů ruší vznikající vibrace. Narušuje totiž periodické působení sil, které podporuje vznik vibrací. Rozdílná rozteč vůči sobě posune fáze kmitů a výsledek lze vidět na Obr. 35. Příkladem využití tohoto způsobu v praxi jsou monolitní karbidové frézy CHATTERFREE. Podobným prvkem potlačujícím vibrace je proměnné stoupání šroubovice, které působí na shodném principu. (24)



Obr. 35 Přínos nerovnoměrné zubové mezery (29)

Dalším prvkem potlačující vibrace je použití nízkého úhlu nastavení hlavního ostří  $\kappa_r$ , který ovlivňuje směr působení řezné síly. Požadovaným cílem je usměrnění síly do směru osy nástroje, kde má nástroj nejvyšší tuhost. Známým prvkem úpravy ostří pro snížení vibrací je také dělená řezná hrana. Konstrukční úpravy lze různě kombinovat především u monolitních fréz, u fréz s VBD může být taková kombinace složitá a může způsobovat problémy při obrábění. (24)

### Aplikace speciálních nástrojů tlumících vibrace v praxi

Různí výrobci řezných nástrojů přicházejí s vlastními tlumícími systémy, které jsou mnohdy komplikované a velmi efektivní. Jedním z nich je společnost SECO a jejich nástroje s technologií SteadyLine<sup>®</sup>. Princip spočívá ve speciálně vyladěném tlumiči integrovaném do těla nástroje. Tlumič spočívá v těžkém – kmitočtově vyladěném válci, který leží mezi pryžovými lůžky. Celý tlumící systém začne pracovat v momentě, kdy při obrábění začínají vznikat vibrace a měl by je utlumit. Jedná se tedy o pasivní tlumící systém. Tlumič v nástroji je laděn na konkrétní délku nástroje, se kterou funguje nejlépe. (30) Nevýhoda spočívá ve vysoké hmotnosti tohoto systému a v podmínkách jeho použití. Ideální pracovní podmínky systému jsou omezeny teplotou, při přehřátí se tlumící schopnost zhoršuje. Tlumící schopnost také zhoršují příliš vysoké otáčky. (31) Velmi podobnou technologii s názvem SilentTools<sup>®</sup> nabízí i firma Sandvik.



Obr. 36 Účinek tlumícího systému (30)

Zcela jinou cestu zvolila firma Komet u její patentované řady JEL<sup>®</sup>. Frézy v této řadě jsou vyrobené pomocí AM a odlehčené použitím vnitřní struktury. Aditivní způsob výroby umožnil



také konstrukci fréz s velkým počtem zubů, přitom právě velký počet zubů v řezu stabilizuje řez. (32)



Obr. 37 Frézy Komet JEL® (32)

#### 2.4.2 Teplo vznikající při frézování a potřeba chlazení

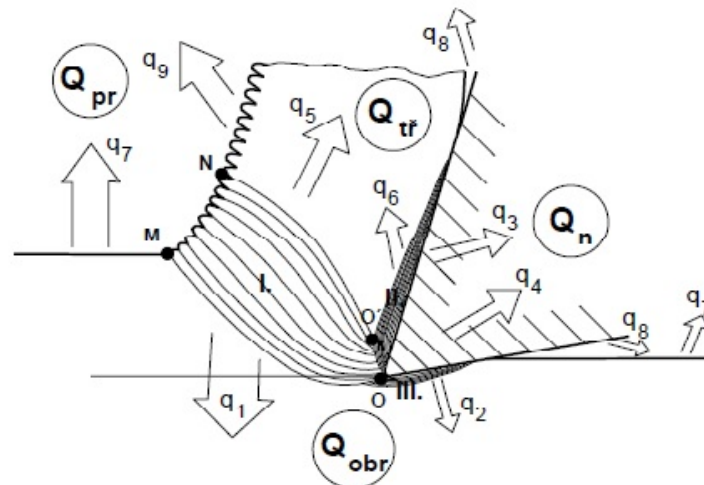
Vznik tepla při obrábění popisuje na svých webových stránkách Jan Hamerník (33) takto: „Při obrábění stlačuje břit nástroje obráběný materiál a deformuje ho, a to zčásti pružně, zčásti trvale. Práce spojená se vznikem trvalé složky deformace se mění v teplo. V rovině stříhu se po sobě pod velkým tlakem posouvají elementy stříhané třísky, což je provázeno značným třením. Vzniklá tříška se pak tře po ploše čela nástroje. Za ostřím se v důsledku pružné složky deformace tiskne materiál k ploše hřbetu a dochází zde opět ke tření.“

Tepelné jevy při obrábění obecně jsou velmi důležité, protože se i více jak 95 % mechanické energie vložené do procesu přeměňuje na energii tepelnou. (34)

$$Q_c = F_z \cdot v_c [W] \quad (34)$$

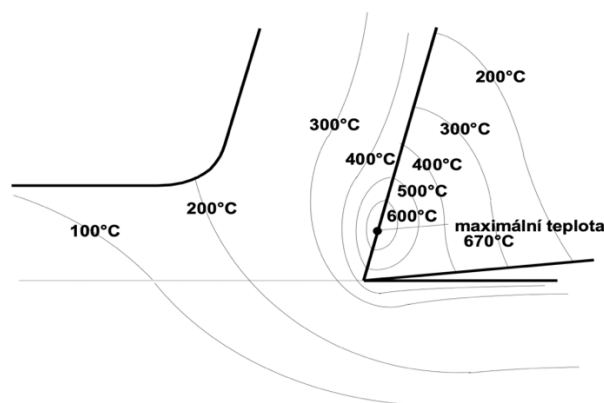
$$W = \frac{I}{s} = \frac{N \cdot m}{s} \quad (34)$$

Z rovnic lze vyčíst, že čím vyšší rychlostí se bude obrábět a čím větší bude objem odebrané třísky, tím více tepla bude při obrábění vznikat. Oblasti vzniku tepelné energie jsou různé. Jsou známe tři hlavní oblasti vzniku tepla. V oblasti OMNO vzniká teplo přeměnou mechanické energie spotřebované na primární plastickou deformaci. V oblasti dotyku třísky a čela břitu vzniká teplo přeměnou mechanické energie potřebné na sekundární plastickou deformaci a na tření. Třetí oblastí vzniku tepla je oblast dotyku hřbetu břitu a obrobeného povrchu. Teplo vzniká z mechanické energie na terciální plastickou deformaci a z tření hřbetu o obrobenou plochu. (34), (27)



Obr. 38 Oblasti vzniku tepla (34)

Vznik a šíření tepla ovlivňuje hned několik proměnných. Záleží na obráběném materiálu, geometrii břitu i řezných podmínkách. Problémy se zahříváním břitu mohou vznikat při obrábění materiálů skupiny ISO M či ISO S kdy tříska odvádí jen malý poměr vznikajícího tepla. Z pohledu nástroje je teplo vstupující do břitu nástroje velmi důležité, protože ohřeje břit na určitou teplotu a ovlivní tím jeho vlastnosti. Nástroje z nástrojové oceli se vlivem tepla mohou odpevnit (popustit), což zhorší, nebo dokonce znemožní, jejich schopnost obrábění. U nástrojů ze slinutých karbidů a keramických nástrojů není pokles schopnosti obrábět tak velký. (34), (33), (27)



Obr. 39 Teplotní pole při obrábění materiálu 12 050 břitem z SK (34)

Šíření tepla značně ovlivňuje řezná rychlost, při jejím zvyšování se zvětšuje poměr tepla odcházejícího do třísky a teplo přecházející do břitu se naopak snižuje. Ohřívání břitu je možné předcházet použitím procesní kapaliny, ta má kromě chladicího účinku i účinek mazací, který snižuje tření. Ideální procesní kapalina by měla mít hned několik vlastností, mezi které patří: výborná mazavost, vynikající tepelná vodivost, velká tepelná kapacita a velký součinitel přestupu tepla. (34), (27)

### Vliv procesní kapaliny na proces obrábění

Při frézování se jednotlivé břity cyklicky střídají v řezu. Pokud jsou zrovna v řezu, ohřívají se, zbytek otáčky frézy se břity chladí a poté dojde k jejich opětovnému záběru a ohřátí. Tyto cyklické teplotní šoky mohou poškozovat břit. Teplotní šoky mohou být ještě vyšší při použití vnějšího chlazení, kdy je břit po vyjetí z řezu prudce ochlazen. Při použití vnitřního přívodu

kapaliny přímo do místa řezu se břit ochlazuje konstantně, tedy i pokud je v řezu, a při výjezdu z řezu není vystaven takovým teplotním šokům. Vnitřní přívod procesní kapaliny současně zlepšuje odvod třísek z místa řezu a tím čistí obráběný prostor. Odvod třísek je důležitý zvláště při obrábění v hlubokých dutinách či místech se zhoršeným odchodem třísek.

### **Cirkulace procesní kapaliny**

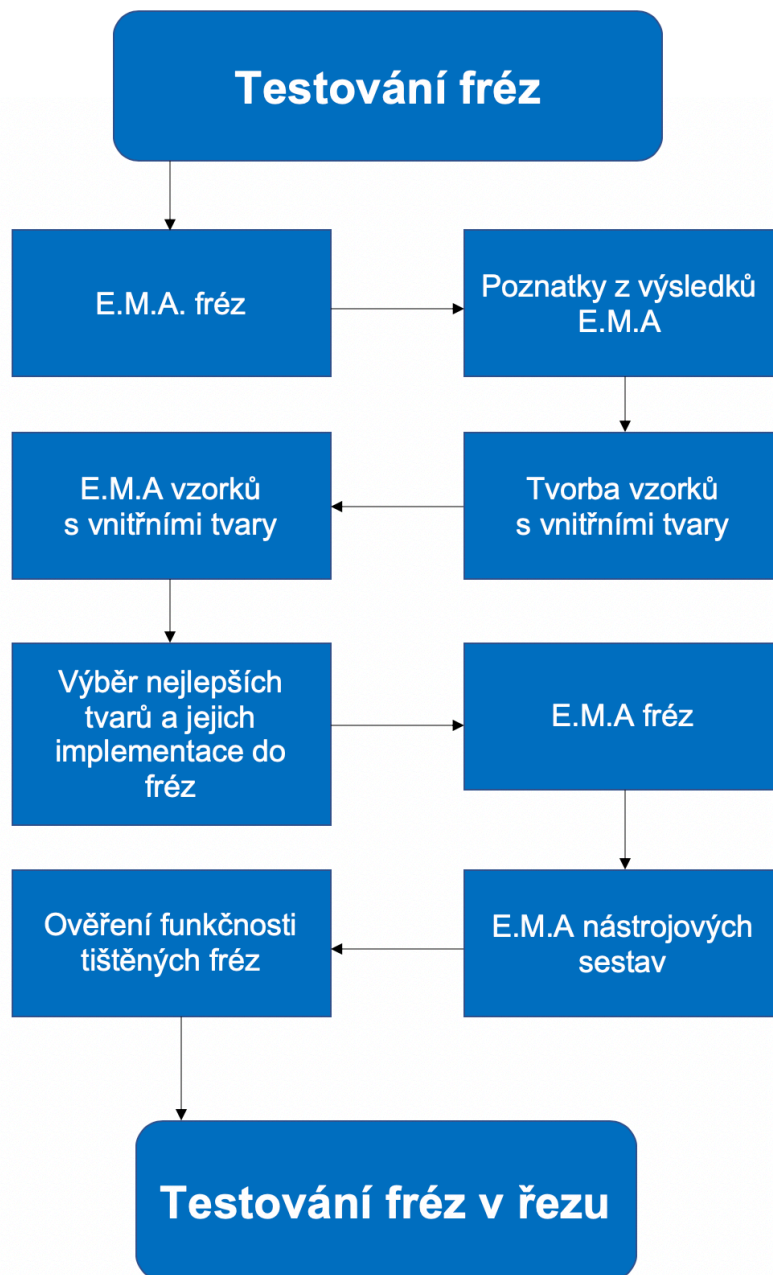
Procesní kapalina se do pracovního prostoru dostává různými způsoby, kapalina může vnikat do prostoru buď externě, tedy z vnějšku nástroje, nebo vnitřně z těla nástroje. Kapalina sbírá třísky v pracovním prostoru stroje, ze kterého následně stéká do hlavní nádrže, kde se chladí a filtruje. V případech vnitřního chlazení, kdy jsou kanálky pro přívod kapaliny velmi malé, je důležitá právě filtrace, ta má za úkol odfiltrovat z kapaliny třísky, které by mohly vniknout do kanálku a ucpat ho. Ucpání kanálku je kritické zvláště při hlubokém vrtání, kdy při ucpání dochází takřka okamžitě ke zlomení vrtáku.

### 3 Návrh a realizace vlastních experimentů

Tato důležitá část práce zahrnuje návrh a výrobu tištěných fréz. Cílem je navrhnout frézy pro frézování s velkým vyložením nástroje a s výbornou schopností tlumení vibrací. Pro ověření očekávaných vlastností fréz bylo potřeba vlastnosti experimentálně ověřit, proto byly stanoveny experimenty, které by měly očekávané vlastnosti buď potvrdit nebo vyvrátit.

Účelem testování bylo porovnání vlastností tištěných fréz s ocelovou frézou a kompozitní frézou, které ve své diplomové práci (31) testoval Ing. Miloslav Štýs. Hlavním úkolem bylo zjištění dynamických vlastností 3D tištěných fréz v řezu a posouzení skutečného přínosu konstrukčních změn fréz i posouzení odlišného materiálu.

V následujícím schématu je použita zkratka E.M.A vyjadřující experimentální modální analýzu.



Obr. 40 Schéma testování

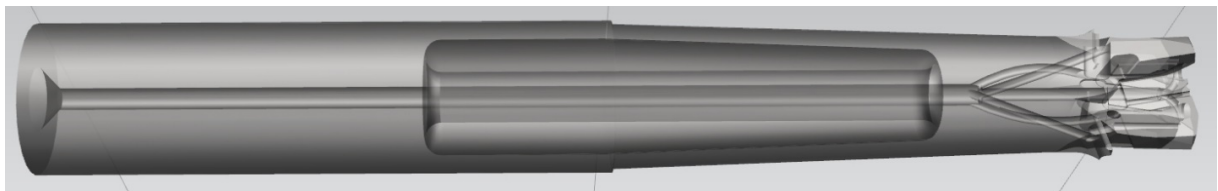
### 3.1 Konstrukce fréz

Při konstrukci jakéhokoliv dílu, který bude vyráběn pomocí AM má konstruktér obecně větší svobodu než při konstrukci konvenčně vyráběného dílu. To platí i u frézy, u které byl kladen důraz na přívod procesní kapaliny do místa řezu, a současně byla snaha o takovou konstrukci frézy, která bude co nejvíce tlumit vibrace vznikající při frézování. Právě AM nabízí možnost tvorby dutin uvnitř frézy a tím odlehčení frézy, či vyplnění dutin elementy pro tlumení vibrací.

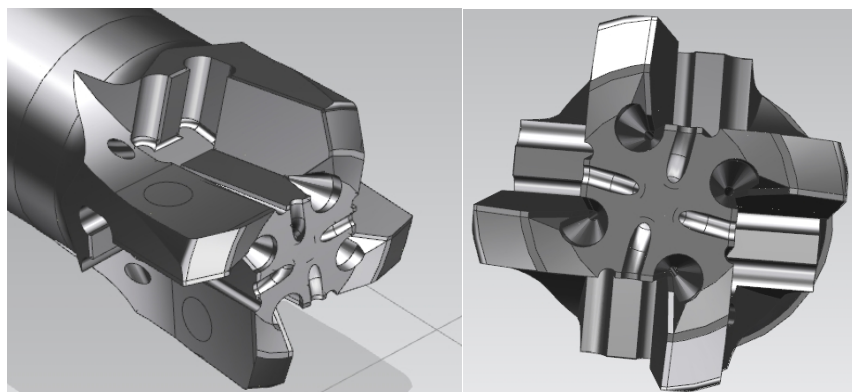
V této diplomové práci byla konstrukce fréz provedena v SW Siemens NX, který umožňuje tvorbu složitějších ploch nutných pro tvorbu frézy. Pro aditivní výrobu byl použit model ve formátu .STL, který byl vyexportován ve vysoké kvalitě z formátu .PRT (Siemens part file).

Fréza byla konstruována pro frézování při vysokém vyložení nástroje, za které se považuje již 3xD, nicméně cílem je fréza s větším vyložení. Při upnutí do hydraulického upínače Schunk 202406-03  $\varnothing 20$  4814 TENDO E compact je vyložení nástroje 100 mm, což vzhledem k průměru frézy 20 mm odpovídá vyložení 5xD. Fréza by tedy měla být vhodná i pro operace typu obrábění forem, při kterém je vysoké vyložení rozhodující.

Fréza vychází z ocelové frézy od firmy Hofmeister, s.r.o.. Nástroj má stejnou řeznou geometrii jako ocelová fréza, ale jeho tělo i řezná část jsou uzpůsobené pro tlumení vibrací a přívod procesní kapaliny do místa řezu. Tyto konstrukční úpravy jsou možné právě díky využití aditivní technologie při výrobě.



Obr. 41 Pohled na průhledný model frézy v SW Siemens NX



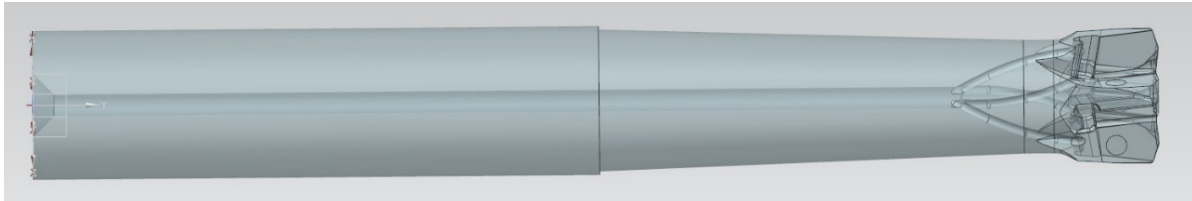
Obr. 42 Pohled na řeznou část frézy v SW Siemens NX

#### 3.1.1 Popis verzí fréz

Pro přehlednost typů fréz je vhodné jednotlivě popsat jejich rozdíly. Frézy se liší pouze oblastí v rozmezí 55 mm od čela upínací části až 33 mm od čela řezné části. Frézy jsou zkonstruovány na základě výsledků měření tlumících vlastností vnitřních tvarů (3.3.3 Tlumící vlastnosti vnitřních tvarů).

### Fréza 1.1 – Plná

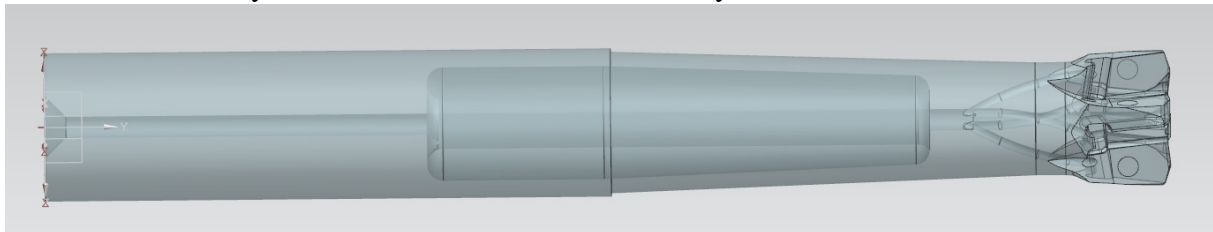
Verze 1.1 má stejně jako všechny ostatní přívod procesní kapaliny na čelo i hřbet VBD. Celé tělo frézy je tvořeno spečeným práškem, vyjma kanálků pro přívod kapaliny v něm nejsou žádné dutiny.



Obr. 43 Fréza 1.1 -Plná

### Fréza 1.2 – Dutá s práškem

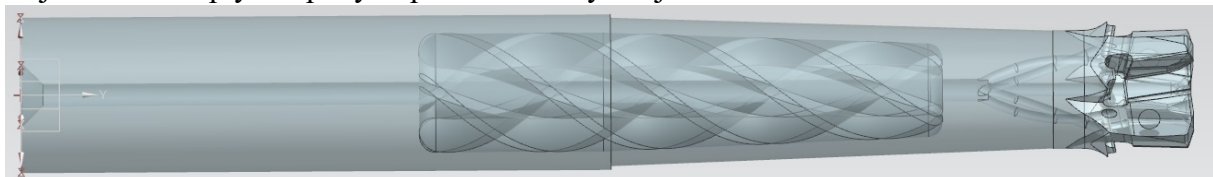
Oproti Fréze 1.1 má fréza uvnitř popisované oblasti těla dutinu vyplněnou nespečeným práškem MS1. Tato dutina by měla sloužit k tlumení vibrací frézy.



Obr. 44 Fréza 1.2 - Dutá s práškem

### Fréza 1.3 – Spirála

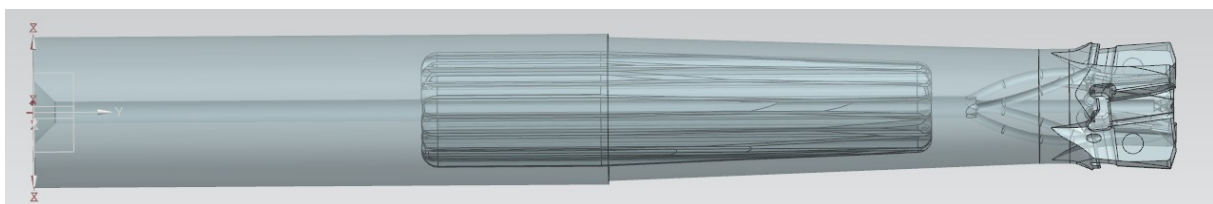
Uvnitř popisované oblasti má tato verze čtyři shodné spirály vzájemně pootočené o 90°. Spirály mají za úkol rozptýlení pohybu prášku a tím rychleji utlumit vibrace.



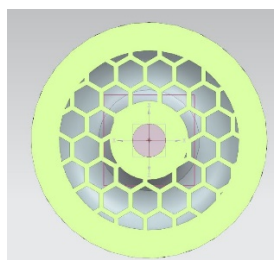
Obr. 45 Fréza 1.3 - Spirála

### Fréza 1.4 – Vnitřní struktura Honeycomb

Stejný účel jako předešlé tvary má i vnitřní struktura ve verzi 1.4. Vnitřní struktura se nazývá Honeycomb a má podobu medových pláství. V této verzi frézy byl pohyb prášku nejvíce omezen.



Obr. 46 Fréza 1.4 - Vnitřní struktura Honeycomb



Obr. 47 Fréza 1.4 - Vnitřní struktura Honeycomb – Řez

### 3.1.2 Upínací část fréz 1.x

Upínací část nástroje je stejně jako jeho zbylé části vyrobená aditivní technologií z materiálu MS1. Středem upínací části prochází u verzí fréz 1.x kanálek o průměru 3 mm pro přívod procesní kapaliny. Až do vzdálenosti 54 mm od čela upínací části je fréza z plného materiálu. V této vzdálenosti začínají u fréz verze 1.2 až 1.4 různé struktury uvnitř frézy, které mají za úkol tlumit vibrace. Struktury jsou vyplněny nespečeným práškem MS1. Fréza verze 1.1 je z plného materiálu.

### 3.1.3 Kónická část fréz 1.x

Kónická část frézy spojuje upínací a řeznou část frézy. Tato část je u frézy verze 1.1 z plného materiálu. Ve verzích 1.2 až 1.4 pokračují tlumící struktury, které končí ve vzdálenosti 33 mm od čela řezné části. Středem frézy pokračuje kanálek pro přívod procesní kapaliny, který se těsně před řeznou částí rozvětzuje do menších kanálků.

### 3.1.4 Řezná část

Řezná část je hlavní část frézy, připevňují se na ni vyměnitelné břitové destičky. Řezná část je připravena pro upnutí čtyř VBD. V řezné části ústí celkem osm kanálků pro řeznou kapalinu. Na každou VBD tedy spadají dva vývody procesní kapaliny, jeden na čelo a druhý na hřbet VBD.

Nástroj	Ocelová fréza	Kompozitní fréza	AT fréza 1.1 Plná	AT fréza 1.2 Dutá s práškem	AT fréza 1.3 Spirála	AT fréza 1.4 Honeycomb
Průměr nástroje [mm]	20	20	20	20	20	20
Průměr stopky [mm]	20	20	20	20	20	20
Délka nástroje [mm]	160	160	160	160	160	160
Hmotnost [g]	320	174	344	309	318	326
Počet zubů	4	4	4	4	4	4
Vnitřní prvek pro tlumení vibrací	NE	NE	NE	ANO	ANO	ANO

Tab. 1 Základní vlastnosti nástroje

### Kanátky pro přívod procesní kapaliny

Středem frézy prochází hlavní kanálek o průměru 3 mm. V blízkosti řezné části se z něj oddělují čtyři kanálky o průměru 1,3 mm a přivádějí procesní kapalinu na čelo břitu každé ze čtyř VBD. Dále se středový kanálek zužuje na průměr 1,8 mm a těsně před čelem frézy se dělí do čtyř kanálků o průměru 1 mm, které přivádějí procesní kapalinu na hřbet každé VBD.

### Vyměnitelné břitové destičky

Fréza je osazena destičkami typu LNMU0303ZER od firmy Tungaloy.

### 3.1.5 Výroba fréz

Výroba frézy probíhala v hale KTO na ZČU. Fréza se vyráběla aditivní technologií na 3D tiskárně EOS M290. Kontaktní plochy na lůžku pro VBD byly vytištěny s přídavkem 0,3 mm. Upínací část frézy – stopka byla vytištěna s přídavkem 0,5 mm na stěnu, tedy 1 mm na průměr. Po vyjmutí platformy s výtisky z tiskárny bylo nutné frézy i s platformou vložit do pece a žíhat

je pro snížení pnutí. Následovalo obrábění funkčních částí fréz, tedy upínací části frézy a lůžek pro VBD ve spolupráci s fy Hofmeister, s.r.o..



Obr. 48 Postup výroby fréz

### 3.2 Použité nástrojové upínače

Do procesu testování byly zahrnuty dva typy nástrojových upínačů, přitom oba fungují na hydraulickém principu a jejich systém upínání je shodný. Jedná se o upínače typu HSK A63. Jeden upínač je celý kovový. Druhý upínač je kompozitní. Na funkční upínací část vyrobenou z kovu je nanášeno několik vrstev uhlíkového kompozitu. Tento upínač testoval ve své diplomové práci (31) Ing. Miloslav Štýs. Výsledkem bylo snížení vibrací při použití kompozitního upínače.

Název	Schunk Tendo	CFRP upínač
Typ upínání	Hydraulické	Hydraulické
Zakončení upínače	HSK A63	HSK A63
Průměr stopky pro upnutí	20h6	20h6
Hloubka otvoru pro upnutí	50 mm	50 mm
Délka vyložení upínače z vřetena	90 mm	90 mm
Upínací tlak	56 MPa	56 MPa
Hmotnost upínače	1 141 g	1 190 g

Tab. 2 Nástrojové upínače

### 3.3 Experimentální modální analýza

Před samotným testováním fréz v řezném procesu byla provedena experimentální modální analýza, která je v posledních letech čím dál více využívanou metodou pro zjišťování modálních vlastností měřených soustav. K podobným účelům se v dnešní době používá i metoda konečných prvků, která však k výpočtu vlastností potřebuje počítačový model, zatímco experimentální modální analýza vyžaduje pro měření hotový výrobek.

Modální analýza je tedy metoda, pomocí které lze měřením získat modální kmitavé vlastnosti existujícího předmětu. Pro popis se využívá rozkladu komplikovaného kmitavého pohybu na jednotlivé modální vlastnosti. Cílem analýzy je zjištění vlastní frekvence a vlastních tvarů kmitů testovaného dílu nebo soustavy. Tyto výstupy nám dávají dohromady požadované dynamické vlastnosti soustavy, které zásadně ovlivňují její kmitání. Cílem využití modální analýzy je zjištění vlivu dynamického namáhání nástroje. Při frézování je fréza vystavena právě dynamickému zatížení, které důsledkem vibrací negativně ovlivňuje kvalitu obráběného



povrchu i životnost nástroje. Proto je důležité určení oblastí vlastních frekvencí nástroje či nástrojové sestavy. Tyto oblasti jsou stěžejní pro volbu řezných rychlostí frézy. (31)

### 3.3.1 Průběh měření modální analýzy

Experimentální modální analýza se měřila několikrát. Po výrobě fréz 1.1 a 1.2 proběhlo první měření na jeho základě se zjistilo, že v oblasti vnitřních tvarů je potřeba další výzkum. Proto bylo vytvořeno osm vzorků ve tvaru kvádrů, vzorky měly uvnitř speciální tvary navržené pro tlumení vibrací. Všechny osm vzorků se testovalo pomocí experimentální modální analýzy. Předpokladem pro tento postup bylo stejné chování vnitřních tvarů v tyči (fréze) i čtyřhranu (vzorek). Na základě výsledků byly vybrány vnitřní tvary, které se implementovali do fréz. Po výtisku fréz s vybranými vnitřními tvary se frézy také testovaly pomocí experimentální modální analýzy. Na závěr proběhlo ještě měření experimentální modální analýzy dvanácti nástrojových sestav, které byly v průběhu měření upnuty přímo v obráběcím stroji DMG MORI DMU 40 eVo linear.

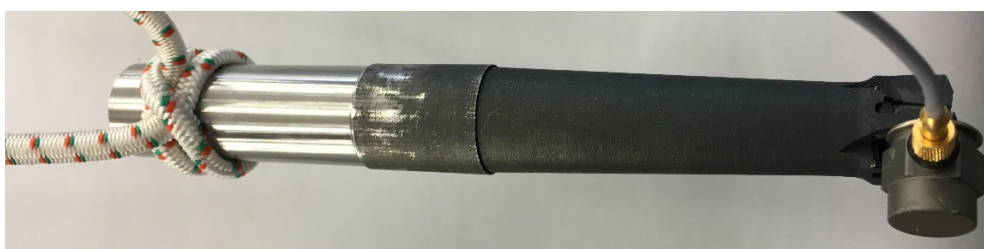
Měření se uskutečnilo v halových laboratořích RTI na Západočeské univerzitě v Plzni. K dispozici byla měřicí aparatura od firmy Brüel & Kjær Type 3160-A-042 a k ní přidružený software PULSE LabShop. Budící síla se vyvozovala úderem speciálním rázovým kladívkem a odezva se snímala jednoosým akcelerometrem.



Obr. 49 Aparatura pro měření modální analýzy fréz

### Průběh měření modální analýzy fréz

Kvůli přesnosti a vypovídající hodnotě byly frézy zavěšeny na pružném laně volně ve vzduchu, tím se dosáhlo toho, že se v FRF neprojevovaly vlastnosti jiných soustav. Jednoosý akcelerometr byl přilepen k lůžku pro VBD. Úder kladívka způsobující buzení směřoval do spodní poloviny upínací části frézy. Rozsah pro měřené frekvence byl omezen na 6,4 kHz.



Obr. 50 Fréza zavěšená na pružném laně (obrázek je vůči realitě otočený o 90°)

### Průběh měření modální analýzy nástrojových sestav

Měření modální analýzy nástrojových sestav probíhalo přímo ve stroji, kdy byla nástrojová sestava upnuta ve vřetení. Při upnutí do nástrojového upínače byly frézy zasunuty až na doraz a jejich vyložení se pohybovalo těsně kolem hodnoty  $5xD$ . Úder kladívka způsobující buzení směřoval do stopky frézy ve vzdálenosti asi 20 mm od upínače. Jednoosý akcelerometr byl přilepen k lůžku pro VBD. Rozsah pro měřené frekvence byl omezen na 6,4kHz.

### Verze testovaných nástrojových sestav

Název sestavy	Nástrojový upínač	Nástroj
Sestava A	Ocelový upínač	Ocelová fréza
Sestava B	Ocelový upínač	Kompozitní fréza
Sestava C	Ocelový upínač	Fréza 1.1
Sestava D	Ocelový upínač	Fréza 1.2
Sestava E	Ocelový upínač	Fréza 1.3
Sestava F	Ocelový upínač	Fréza 1.4
Sestava G	Kompozitní upínač	Ocelová fréza
Sestava H	Kompozitní upínač	Kompozitní fréza
Sestava I	Kompozitní upínač	Fréza 1.1
Sestava J	Kompozitní upínač	Fréza 1.2
Sestava K	Kompozitní upínač	Fréza 1.3
Sestava L	Kompozitní upínač	Fréza 1.4

Graf 1 Verze testovaných nástrojových sestav

### Průběh měření modální analýzy vzorků ve tvaru kvádrů


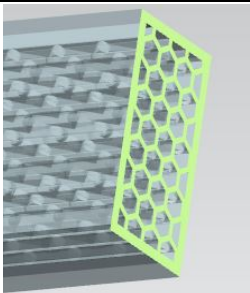
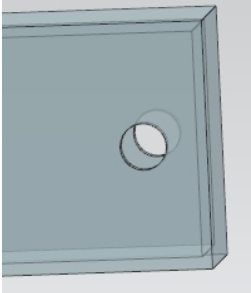
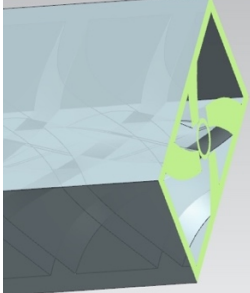
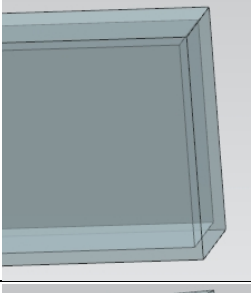
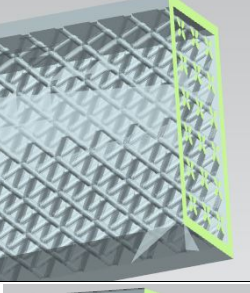
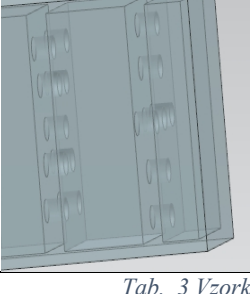
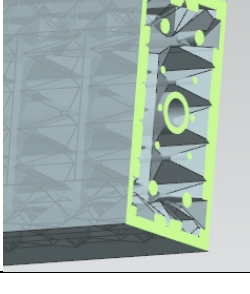
Pro měření experimentální modální analýzy vzorků ve tvaru kvádrů se používalo stejné měřicí zařízení, nicméně měření probíhalo jinak, vycházelo z experimentu Ing. Pavla Hanzla, vědecko-výzkumného pracovníka RTI. Kvádr byl jedním koncem upnut do svěráku a na druhém konci bylo připevněno závaží. Délka zasunutí vzorku do svěráku byla vždy 20 mm.



Obr. 51 Upevnění vzorku při měření tlumících charakteristik

### Verze testovaných kvádrů

Vnější tvar všech verzí kvádrů je kromě otvoru na vysypání prášku stejný, kvádry se liší pouze vnitřními tvary. Otvor nehraje při testech žádnou roli, protože je při testování schovaný v závaží. Dolní část z plného materiálu je upnuta ve svěráku. Všechny verze lze vidět v Tab. 3.

Název	Pohled na model	Název	Pohled na model
Plný		Honeycomb	
Skořepina		Spirála	
Dutina s práškem		Lattice structure	
Přepážky		Jehlany	

Tab. 3 Vzorky s vnitřními tvary

### 3.3.2 Způsob měření a vyhodnocení dat

Pro měření bylo důležité nastavení podmínek měření v SW PULSE LabShop, tak aby byly výsledky věrohodné a zároveň měření proveditelné. Úder byl softwarem přijat, pokud se jeho síla pohybovala v určitém rozsahu a zároveň se nejednalo o dvojitý úder, který by měření znehodnotil. Měření se vyhodnocovalo ze tří korektně provedených úderů kladívkem.

Cílem vyhodnocení dat týkajících se fréz bylo získání dvou typů parametrů:

- Tlumící charakteristiky sestav a nástrojů (TDF)

- Frekvenční charakteristiky sestav a nástrojů (FRF)

Cílem vyhodnocení dat týkajících se kvádrů s vnitřními tvary bylo získání jednoho parametru:

- Tlumící charakteristiky kvádrů s vnitřními tvary (TDF)

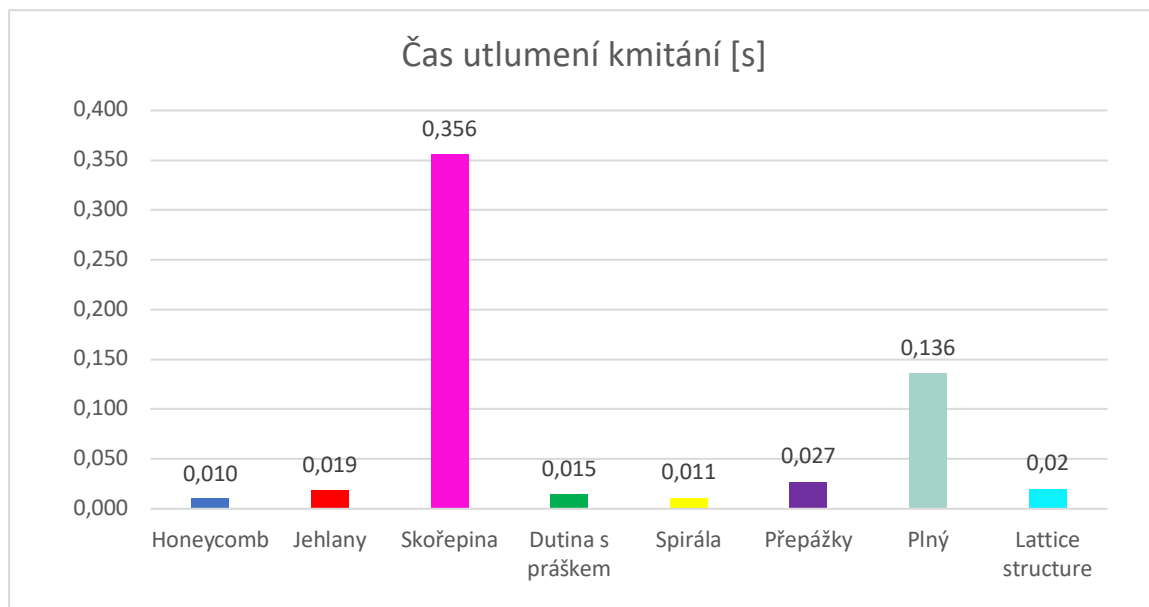
Výsledkem měření bylo získání frekvenční odezvové funkce FRF a časové funkce TDF, přičemž FRF byla kompletně popsána pomocí reálné a imaginární části. Pro získání tlumících charakteristik sloužila časová funkce TDF, ta popisuje vztah amplitudy kmitání a času utlumení kmitání. TDF byla vyhodnocena v SW Excel. Frekvenční charakteristiky nástrojových sestav se získaly z FRF pomocí SW Excel.

### 3.3.3 Tlumící vlastnosti vnitřních tvarů

Důležitou roli při vyhodnocení tlumících vlastností hraje čas utlumení kmitání, právě ten byl hlavním parametrem pro srovnání. Čím kratší byl čas utlumení vibrací, tím lépe se daný vnitřní tvar umístil. V úvahu byl brán i tvar křivky tlumení. Čím strměji křivka mířila k nule, tím lépe. Úder kladívka byla programem přijat pouze pokud se pohyboval v určitém rozmezí budící síly. Kvůli uchycení vzorků přitom nedocházelo k přebuzení snímače, proto při měření nevznikaly žádné problémy. Na základě podobných sil lze jednotlivé vzorky mezi sebou přímo porovnávat. Za referenční kvádr byl považován plný kvádr, s ním byly ostatní vzorky porovnávány. Ze všech vzorků byly vybrány dva nejlepší tvary, které se následně implementovaly do fréz.

#### Čas utlumení kmitání

Pro jasné srovnání všech vzorků byl vytvořen Graf 2, který zobrazuje časy utlumení kmitání všech vzorků. Za hodnotu ustálení byla považována hodnota 5 [m/s<sup>2</sup>]. Vybuzení kmitů nastalo v čase 0,066 sekundy, tento čas byl odečten od času ustálení. Po dosažení hodnoty ustálení probíhalo tlumení u všech vzorků plynule dál.

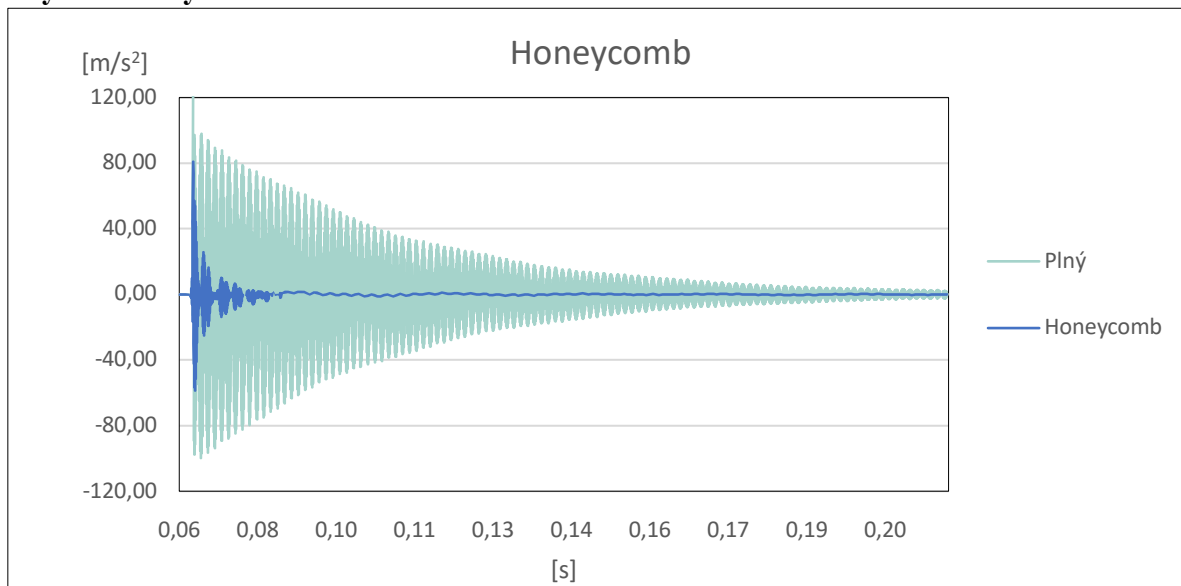


Graf 2 Čas utlumení kmitání vzorků

Jak lze vidět z grafu, nejlepších výsledků dosahují tvary zvané „Honeycomb“ a „Spirála“, těsně za nimi je tvar „Dutina s práškem“, která je horší o 0,004 respektive o 0,005 sekundy.

V následujících grafech jsou zobrazeny reálné kmity dvou nejlepších tvarů v porovnání s plným.

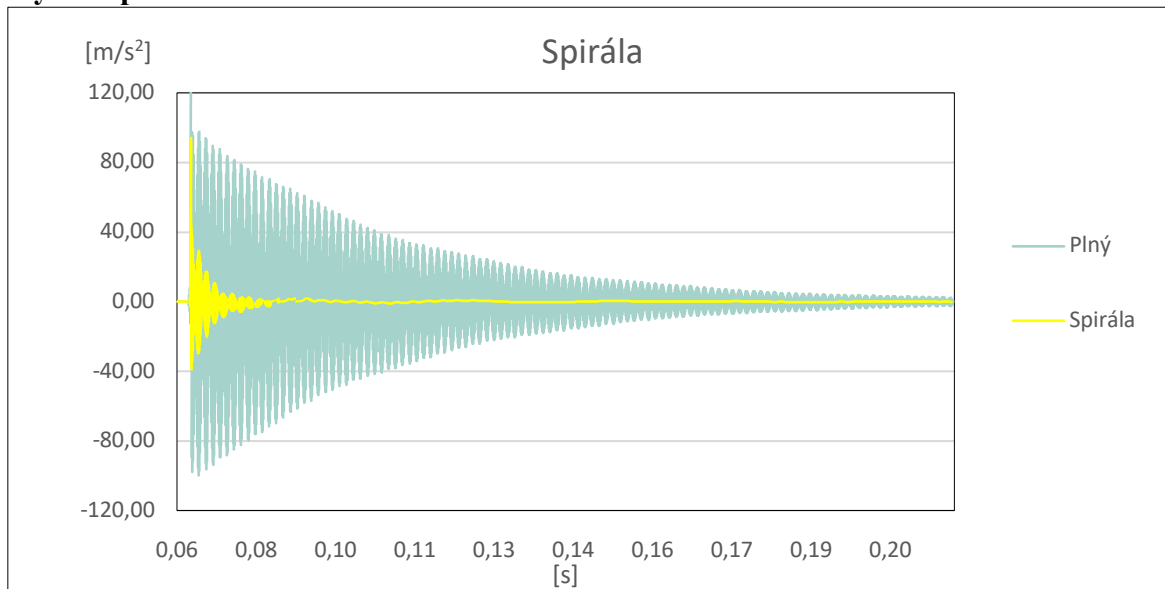
### Plný vs. Honeycomb



Graf 3 Plný vs. Honeycomb

Vnitřní struktura ve tvaru medových pláští splnila svůj účel a rozrušovala pohyb nespečeného prášku, nicméně je v grafu vidět velké kolísání amplitudy, což naznačuje, že by se různým přizpůsobováním této struktury dalo dosáhnout ještě lepších výsledků. V porovnání s plným kvádrem je tlumení výrazně lepší.

### Plný vs. Spirála



Graf 4 Plný vs. Spirála

Tlumení ve tvaru spirál uvnitř kvádrů prokázalo vysoký účinek a vibrace utlumilo v jednom z nejkratších časů. Po výrazném utlumení snížení vibrací se křivka kmitů pohybuje v mírně sinusovém tvaru. Křivka tlumení je přitom plynulá a bez výrazných výkyvů či vln.

### Celkové hodnocení vnitřních tvarů

Kromě kvádrů zvaného „Skořepina“ dosáhly všechny kvádry lepších výsledků než referenční plný kvádr. Tento výsledek lze považovat za velmi zdařilý, na jehož základě by se všechny tvary kromě skořepiny daly implementovat do fréz. Nicméně cílem tohoto experimentu je vybrat pouze ty nejlepší tvary, tím snížit počet testovaných fréz a zjednodušit tak testování. Proto byly na základě předchozích výsledků pro implementaci do fréz vybrány pouze následující tvary:

- Spirála
- Honeycomb

### 3.3.4 Výsledky experimentální modální analýzy fréz – tlumící charakteristiky

Tlumící charakteristika fréz je důležitá pro znalost křivky tlumení samotných fréz. Při měření se kvůli přebuzení snímače často měnil rozsah budící síly, proto je amplituda u některých fréz výrazně menší oproti jiným. Při vyhodnocení se hodnotil směr křivky tlumení. Například ocelová fréza vede svým tělem vibrace dobře, proto docházelo při jejím měření k přebuzení snímače a budící síla musela být pro její měření snížena.

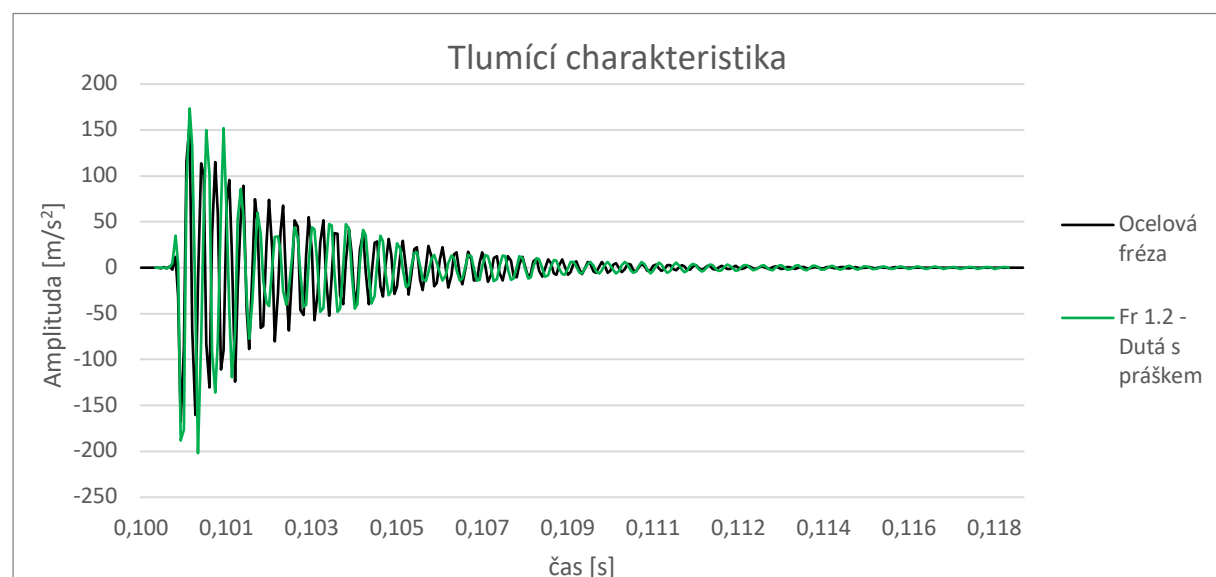
#### Vyhodnocení křivek tlumení

Křivky fréz jsou velmi odlišné a z hlediska průběhu měření budou posouzeny pouze podle křivek tlumení. V následující tabulce jsou seřazeny zleva od nejlepší po nejhorší.

Pořadí	1	2	3	4	5	6
Název	Kompozitní fréza	Fréza 1.4 Honeycomb	Fréza 1.3 Spirála	Fréza 1.2 Dutá s práškem	Fréza 1.1 Plná	Ocelová fréza

Tab. 4 Vyhodnocení křivek tlumení fréz

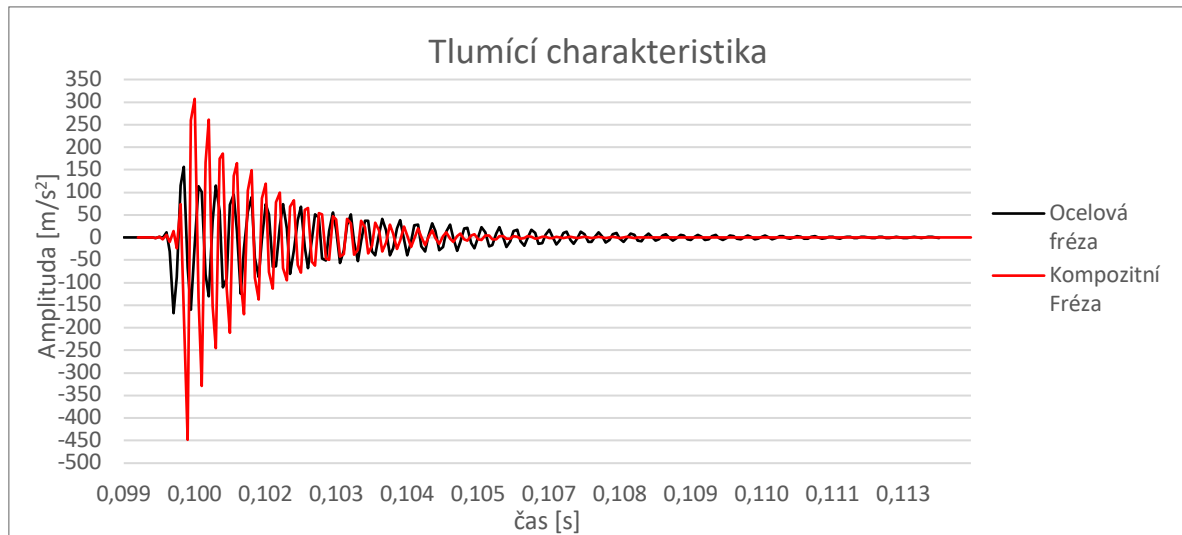
Pro názornost jsou zde detailněji popsány vybrané grafy zobrazující vlastní kmity.



Graf 5 Tlumící charakteristika Frézy 1.2 v porovnání s ocelovou frézou

Křivka znázorňující tlumení Frézy 1.2 – Dutá s práškem má kolísavý tvar, nejprve prudce utlumí vibrace až k hodnotě 35 [m/s<sup>2</sup>], poté ale amplituda opět naroste na 50 [m/s<sup>2</sup>], podobný děj při nižších hodnotách amplitudy se opakuje ještě jednou a poté už amplituda plynule klesá

k nule. Takový průběh tlumení je nejspíše způsobený volným práškem v dutině frézy. Volný prášek nejprve utlumí vibrace, poté ale nejspíše dojde k jeho pohybu a opět frézu rozvibruje. Na základě tohoto výsledku byly zkonstruovány další Frézy 1.3 Spirála a 1.4 Honeycomb, které mají uvnitř dutiny různé elementy, které by měly rozrušovat volný pohyb prášku.



Graf 6 Tlumící charakteristika ocelová fréza vs. kompozitní fréza

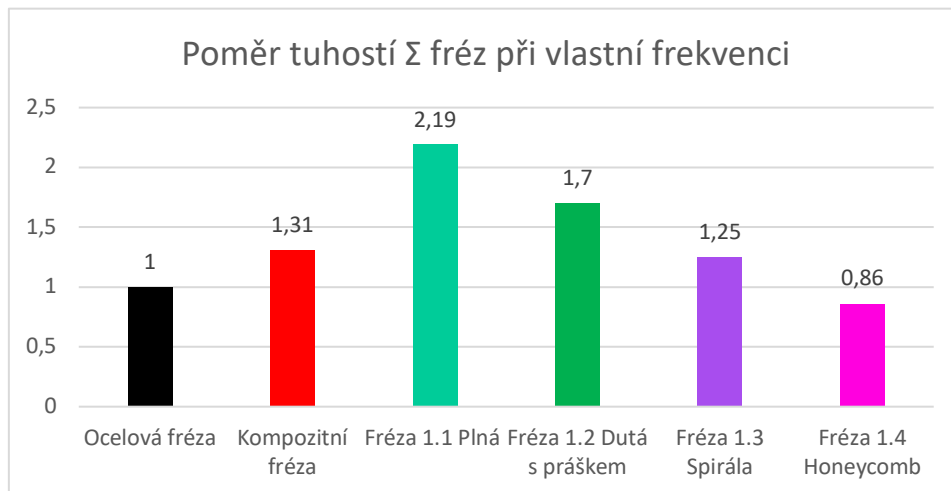
Na první pohled lze vidět, že kompozitní fréza má křivku tlumení daleko prudší a vibrace utlumila lépe. Ocelová fréza má pozvolnější utlumení vibrací. Tvar tlumení je u obou fréz plynulý a bez výkyvů. Křivka tlumení kompozitní frézy má zpočátku několik mírných amplitud, až poté dosáhne amplituda maxima. U ocelové frézy se projevují zbytkové kmity, zatímco u kompozitní frézy nikoliv.

### 3.3.5 Výsledky experimentální modální analýzy fréz – frekvenční odezvoová funkce

V tomto hodnocení experimentální modální analýzy jsou stěžejními parametry amplituda a hodnota vlastní frekvence fréz. Amplituda je vyjádřena pomocí  $[(m/s^2) / N]$ , tudíž lze jednotlivé amplitudy mezi sebou přímo porovnávat. Čím větší je amplituda, tím menší je tuhost. Pro lepší srovnání bude uveden i poměr tuhosti ( $\Sigma$ ) referenční ( $k_A$ ) a testované ( $k_t$ ) frézy. Při vyhodnocení je uvažováno, že amplituda je přímo úměrná tuhosti. Za referenční nástroj byla považována ocelová fréza.

$$\Sigma = \frac{k_A}{k_t}$$

### Poměr tuhostí fréz



Graf 7 Poměr tuhostí fréz

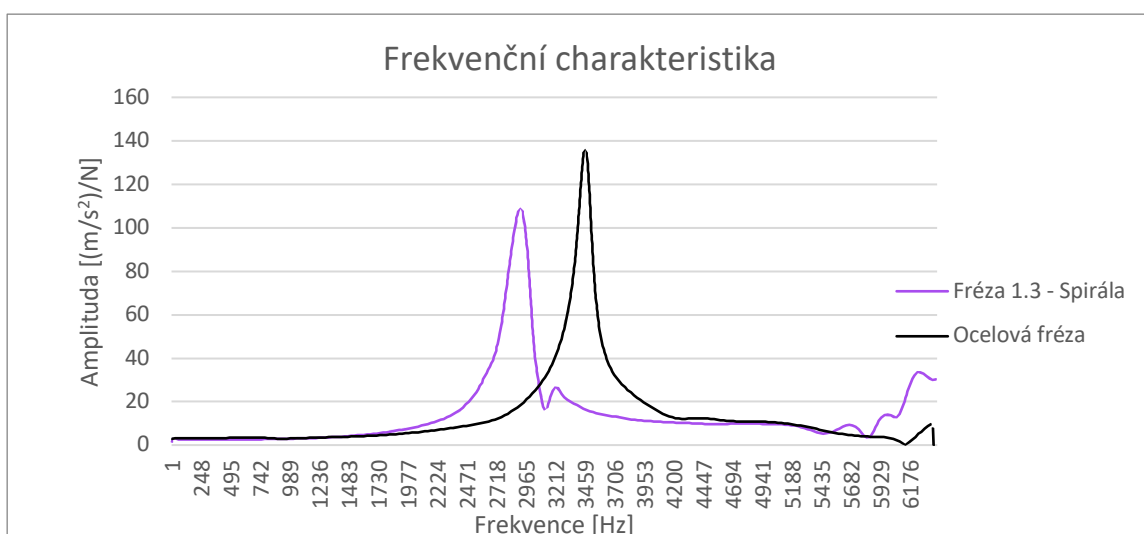
V Graf 7 lze vidět srovnání poměrů tuhostí fréz při vlastní frekvenci. Tuhosti fréz jsou vztažené k ocelové fréze, proto je poměr tuhosti ocelové frézy roven jedné. Nejvyšší tuhosti při vlastní frekvenci dosahuje Fréza 1.1, naopak nejvyšší amplitudy při vlastní frekvenci, a tedy nejnižší tuhosti dosahuje Fréza 1.4.

### Vlastní frekvence fréz

Nástroj	Ocelová fréza	Kompozitní fréza	Fréza 1.1 Plná	Fréza 1.2 Dutá s práškem	Fréza 1.3 Spirála	Fréza 1.4 Honeycomb
Vlastní frekvence $\Omega$ [Hz]	3458	4111	3399	3011	2928	2947

Tab. 5 Vlastní frekvence fréz

Vlastní frekvence všech fréz se pohybují nad frekvencí obrábění, která dle teorie měla být by pro zvolenou řeznou rychlost pro experiment 169 Hz. Ve skutečnosti se však může vlivem všech prvků soustavy SNOF či vlivem okolí výrazně měnit. Vlastní frekvence všech fréz se pohybují v úplně jiných hodnotách, proto by při experimentu nemělo dojít k jejich rezonanci.



Graf 8 Frekvenční charakteristika ocelová fréza vs. Fréza 1.3 – Spirála



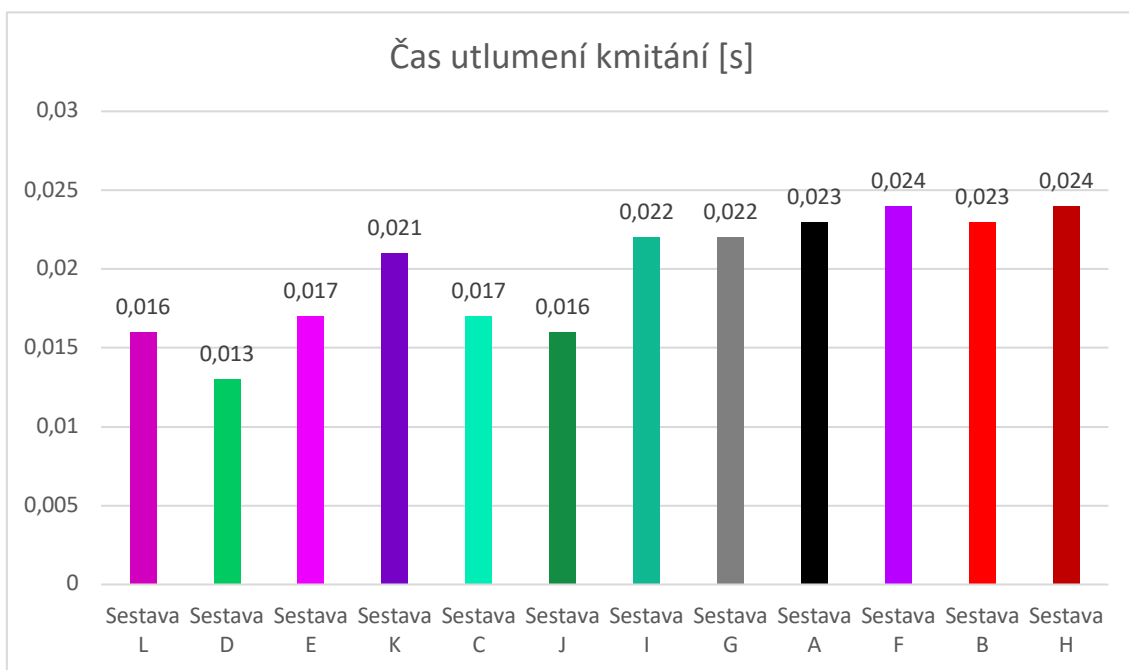
V Graf 8 je zobrazena frekvenční charakteristika Frézy 1.3 Spirála porovnaná s frekvenční charakteristikou ocelové frézy. Lze vidět že Fréza 1.3 Spirála je nalazena na nižší frekvenci a má při této vlastní frekvenci nižší amplitudu, tedy větší tuhost.

### 3.3.6 Výsledky experimentální modální analýzy nástrojových sestav – tlumící charakteristiky

Důležitou roli při vyhodnocení tlumících vlastností nástrojových sestav hraje čas utlumení kmitání i tvar křivky tlumení. Čím kratší byl čas utlumení vibrací, tím lépe se daný vnitřní tvar umístil. Čím strměji křivka mířila k nule, tím lépe. Úder kladívka byla programem přijat pouze pokud se pohyboval v určitém rozmezí budící síly. Kvůli uchycení sestav ve stroji přitom nedocházelo k přebuzení snímače, proto při měření nevznikaly žádné problémy. Na základě podobných budících sil lze jednotlivé sestavy mezi sebou přímo porovnávat. Za referenční sestavu byl považována Sestava A.

#### Čas utlumení kmitání

Pro jasné srovnání všech vzorků byl vytvořen Graf 9, který zobrazuje časy utlumení kmitání všech vzorků. Za hodnotu ustálení byla považována hodnota 5 [m/s<sup>2</sup>]. Vybuzení kmitů nastalo v čase 0,100 sekundy, tento čas byl odečten od času ustálení.



Graf 9 Čas utlumení kmitání nástrojových sestav

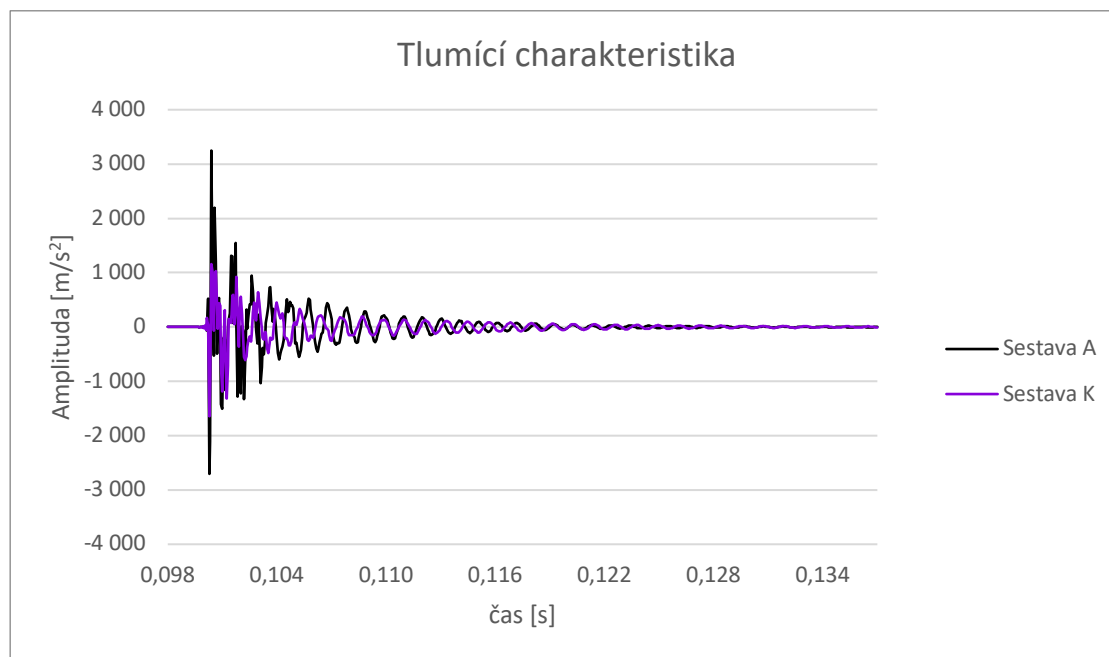
Sestavy jsou v grafu řazeny zleva od nejlepší po nejhorší. Při hodnocení byl hodnocen nejen čas utlumení kmitání, ale i průběh tlumení. Grafy tlumení jednotlivých sestav jsou přiloženy v příloze. Pro přehlednost je na další straně znovu vložen seznam sestav.

### Verze testovaných nástrojových sestav

Název sestavy	Nástrojový upínač	Nástroj
Sestava A	Ocelový upínač	Ocelová fréza
Sestava B	Ocelový upínač	Kompozitní fréza
Sestava C	Ocelový upínač	Fréza 1.1
Sestava D	Ocelový upínač	Fréza 1.2
Sestava E	Ocelový upínač	Fréza 1.3
Sestava F	Ocelový upínač	Fréza 1.4
Sestava G	Kompozitní upínač	Ocelová fréza
Sestava H	Kompozitní upínač	Kompozitní fréza
Sestava I	Kompozitní upínač	Fréza 1.1
Sestava J	Kompozitní upínač	Fréza 1.2
Sestava K	Kompozitní upínač	Fréza 1.3
Sestava L	Kompozitní upínač	Fréza 1.4

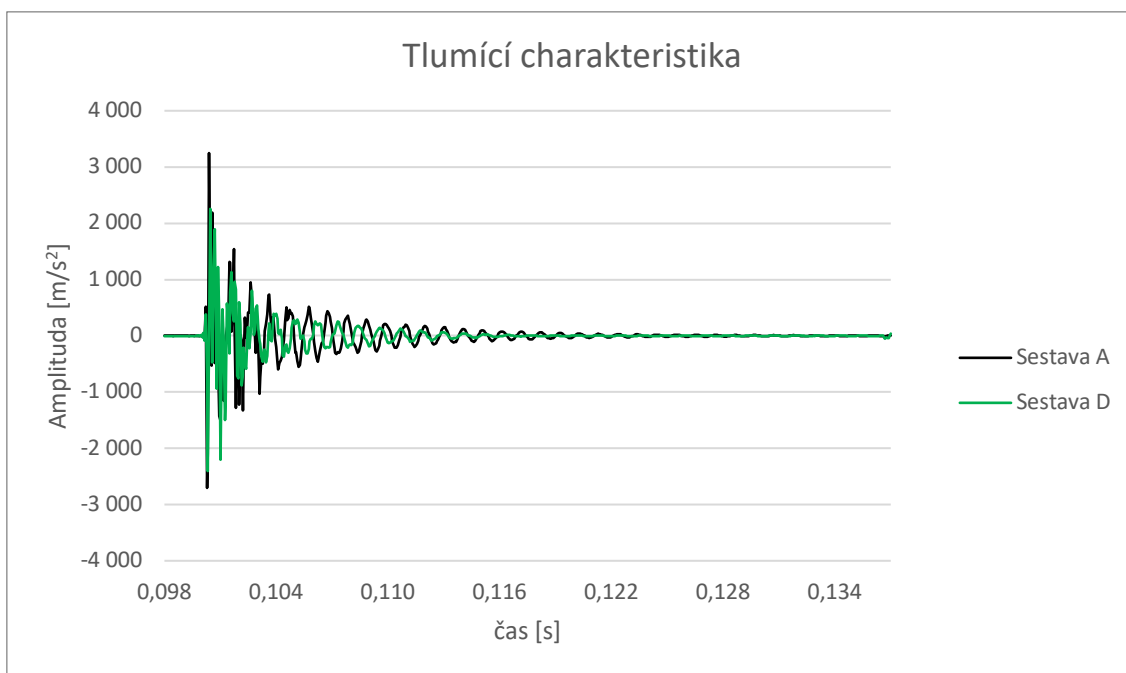
Tab. 6 Verze testovaných nástrojových sestav

Pro detailnější popis byly vybrány dvě nástrojové sestavy, ty jsou zobrazeny v následujících grafech.



Graf 10 Tlumicí charakteristika sestava A vs. K

Sestava K má křivku tlumení s rychlým snížením amplitudy zejména v prvních kmitech. Poté už tlumení probíhá pozvolněji, ale to už vibrace nedosahují velkých hodnot.



Graf 11 Tlumící charakteristika sestava A vs. D

Sestava D dosáhla velmi dobrého výsledku, protože je její křivka tlumení velmi strmá a vibrace utlumí v poměrně krátkém čase. Navíc u této sestavy nejsou od hranice 0,122 sekundy viditelné zbytkové kmity. V sestavě je použita Fréza 1.2 Dutá s práškem která při měření na laně vykazovala vlnitost křivky, v Sestavě D se vlnitost neprojevila.

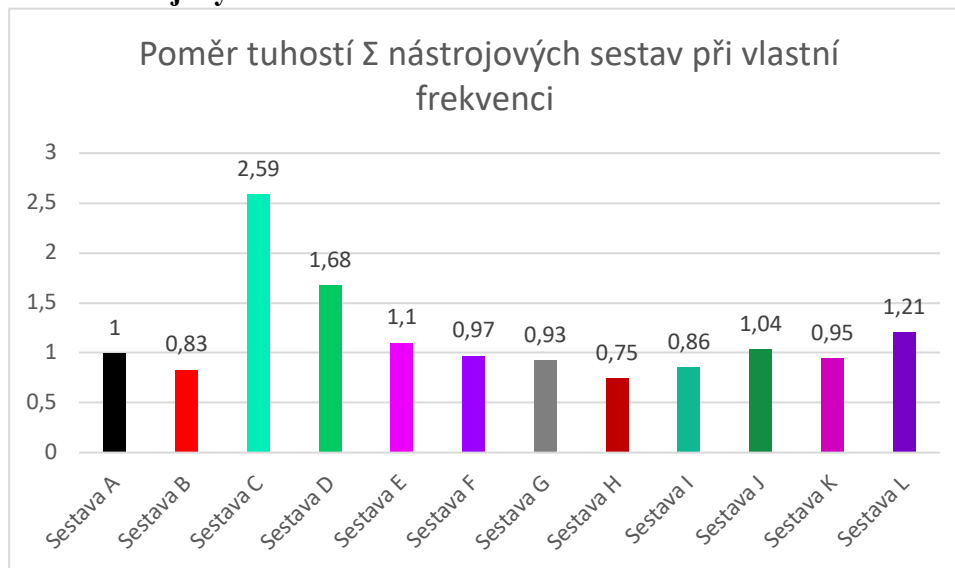
### 3.4 Výsledky experimentální modální analýzy nástrojových sestav – frekvenční charakteristika

V tomto hodnocení experimentální modální analýzy jsou stěžejními parametry amplituda a hodnota vlastní frekvence nástrojových sestav. Amplituda je vyjádřena pomocí  $[(m/s^2) / N]$ , tudíž lze jednotlivé amplitudy mezi sebou porovnávat. Čím větší je amplituda, tím menší je tuhost. Pro lepší srovnání bude uveden i poměr tuhosti ( $\Sigma$ ) referenční ( $k_A$ ) a testované ( $k_t$ ) frézy. Při vyhodnocení je uvažováno, že amplituda je přímo úměrná tuhosti. Za referenční sestavu byla považována Sestava A.

$$\Sigma = \frac{k_A}{k_t}$$

Pro výpočet poměru tuhosti budou uvažovány hodnoty prvních vlastních frekvencí, tj. do 1500 Hz. Strmá křivka při frekvenci téměř 1 Hz u většiny grafů je chyba způsobena rušením či převodem signálu. Za referenční sestavu byla považována sestava ocelové frézy a ocelového HSK upínače (sestava A).

### Poměr tuhostí nástrojových sestav



Graf 12 Poměr tuhostí nástrojových sestav

Pro přehlednost je zde znovu vložen seznam sestav.

### Verze testovaných nástrojových sestav

Název sestavy	Nástrojový upínač	Nástroj
Sestava A	Ocelový upínač	Ocelová fréza
Sestava B	Ocelový upínač	Kompozitní fréza
Sestava C	Ocelový upínač	Fréza 1.1 Plná
Sestava D	Ocelový upínač	Fréza 1.2 Dutá s práškem
Sestava E	Ocelový upínač	Fréza 1.3 Spirála
Sestava F	Ocelový upínač	Fréza 1.4 Honeycomb
Sestava G	Kompozitní upínač	Ocelová fréza
Sestava H	Kompozitní upínač	Kompozitní fréza
Sestava I	Kompozitní upínač	Fréza 1.1 Plná
Sestava J	Kompozitní upínač	Fréza 1.2 Dutá s práškem
Sestava K	Kompozitní upínač	Fréza 1.3 Spirála
Sestava L	Kompozitní upínač	Fréza 1.4 Honeycomb

Tab. 7 Verze testovaných sestav

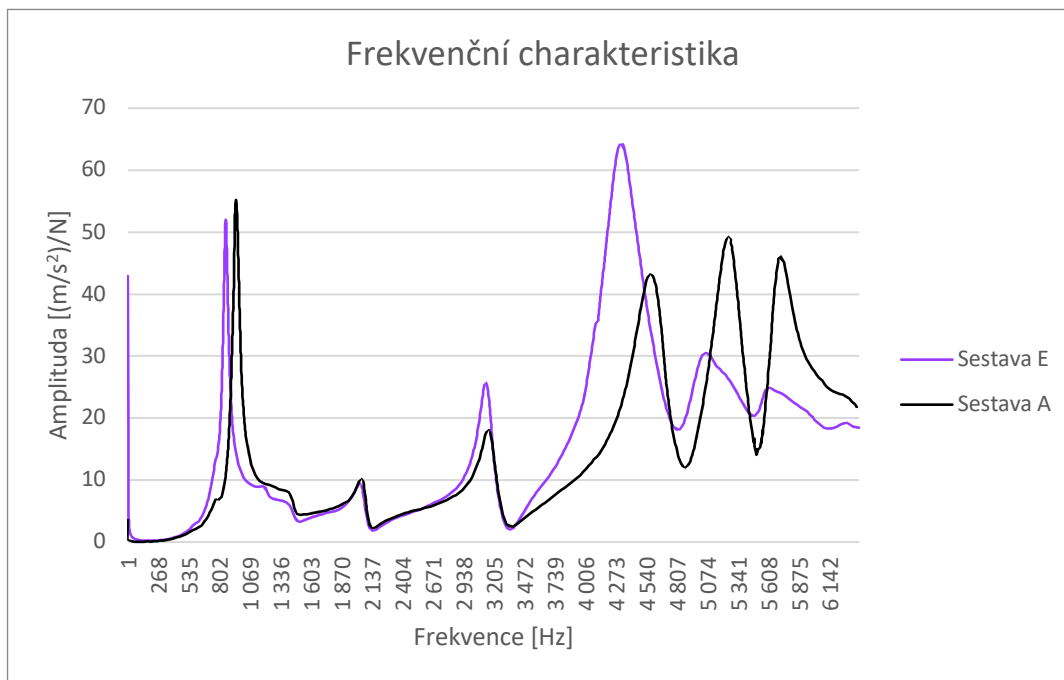
V Graf 12 lze vidět srovnání poměrů tuhostí nástrojových při vlastní frekvenci. Tuhosti sestav jsou vztažené k referenční Sestavě A, proto je poměr tuhosti Sestavy A roven jedné. Nejvyšší tuhosti při vlastní frekvenci dosahuje Sestava C, naopak nejvyšší amplitudy při vlastní frekvenci, a tedy nejnižší tuhosti dosahuje Sestava H. Sestava C se svou tuhostí vymyká z výsledků ostatních sestav, hned za ní je s poměrem tuhostí při vlastní frekvenci 1,68 Sestava D.

### Vlastní frekvence nástrojových sestav

Sestava	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
Vlastní frekvence $\Omega$ [Hz]	952	1070	887	870	850	855	928	1083	887	866	847	857

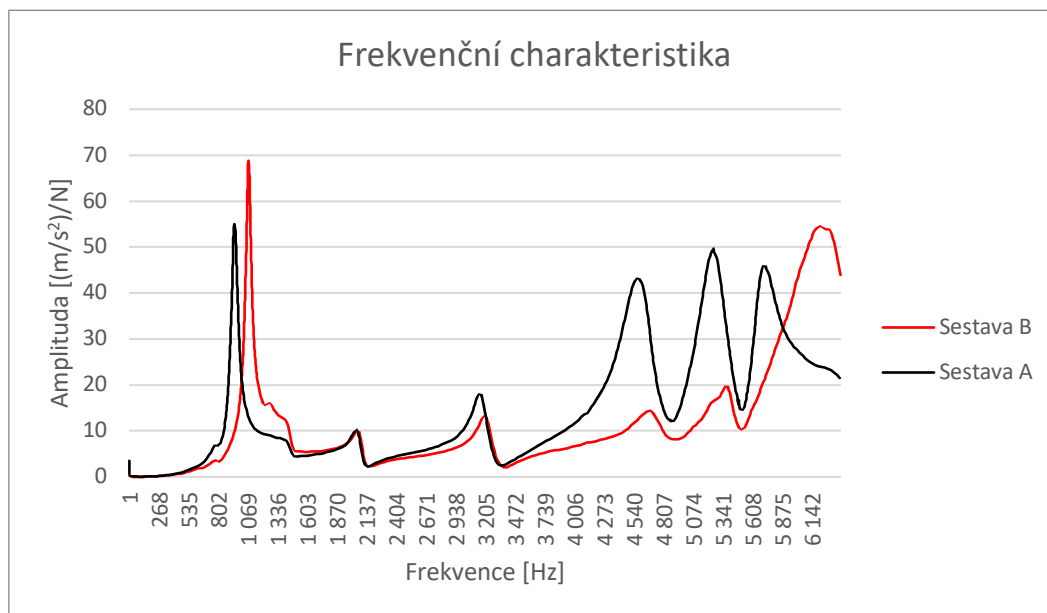
Tab. 8 Vlastní frekvence nástrojových sestav

Pro názornost je níže popsán Graf 13.



Graf 13 Frekvenční charakteristika Sestav A a E

Sestava E je nalazena na mírně nižší frekvence než Sestava A, jedná o rozdíl 102 Hz. Pokud by obrábění probíhalo při frekvenci 850 Hz, tedy vlastní frekvenci sestavy E, byl by rozdíl vibrační výrazný. Sestava E vyniká vlastnostmi při vyšších frekvencích, tj nad 5000 Hz, tam se její amplituda pohybuje v mnohem menších hodnotách než Sestava A.



Graf 14 Frekvenční charakteristika Sestav A a B

Sestava B je díky použití kompozitního nástroje nalazena na vyšší frekvence než Sestava A. Sestava B vyniká vyšším útlumem hlavně při vyšších frekvencích od 3500 do 5000 Hz.

### 3.5 Vlastní experiment

Po obrobení a usazení VBD proběhla kontrola geometrie fréz. Měření proběhlo na přístroji Zoller Genius 3s. Šlo především o zjištění obvodového a čelního házení, které jsou pro ovlivnění vibrací zásadní. Kompletní protokoly měření jsou přiloženy v příloze. Frézy 1.3 spirála a 1.4 Honeycomb nebyly tomuto měření podrobeny, protože se nestihly obrobit jejich lůžka pro VBD.

	Ocelová fréza	Kompozitní fréza	Fréza 1.1	Fréza 1.2
Obvodové házení [mm]	0,022	0,040	0,041	0,083
Čelní házení [mm]	0,021	0,015	0,017	0,045

Tab. 9 Házení fréz

Pro běžné použití jsou všechny hodnoty v pořádku a v rámci běžných tolerancí. Pro účely diplomové práce je však důležité, aby všechny frézy měly podobné házení. Obvodové házení Frézy 1.2 dosahuje až čtyřnásobné hodnoty obvodového házení ocelové frézy.

#### Ověření funkčnosti fréz

Před samotným měřením vibrační fréz v řezu bylo potřebné ověřit funkčnost fréz. Měření vibrační bude probíhat při otevřených dveřích stroje a při případném poškození frézy by mohlo dojít ke zranění přítomných osob. Ověření se provedlo při řezných podmínkách zobrazených v Tab. 10. Jako obráběný materiál byl vybrán hranol z oceli 12 050.

Řezné podmínky	
Řezná rychlost $v_c$	110 [m/min]
Posuv na zub $f_z$	0,65 [mm/z]
Axiální hloubka řezu $a_p$	0,6 [mm]
Radiální hloubka řezu $a_e$	8 [mm]

Tab. 10 Řezné podmínky

#### 3.5.1 Měření vibrační nástroje při obrábění

Měření vibrační bylo stěžejní částí práce, protože právě ono mělo potvrdit či vyvrátit žádané vlastnosti vyrobených fréz. Měření probíhalo u frézách 1.1 a 1.2 a také u ocelové a kompozitní frézy. U Fréz 1.3 Spirála a 1.4 Honeycomb se z časových důvodů nestihly obrobit lůžka pro VBD a frézy tak nemohly být otestovány. Pro měření vibrační bylo k dispozici více přístrojů a bylo potřebné z nich vybrat ten nejvhodnější.

#### Vibrometr Polytec PDV 100

Pro měření vibrační byl potřeba přístroj, který dokáže měřit vibrace frézy v řezu. K tomu je nejlepší bezkontaktní vibrometr, který může být v průběhu měření umístěn mimo pracovní prostor stroje. Takové podmínky splňuje laserový vibrometr Polytec PDV 100, který je na ZČU k dispozici. Vibrometr pracuje na základě Dopplerova efektu, měří posun fází vyslaného a přijatého paprsku, díky tomu je možné měřit rychlost kmitání měřeného objektu. Rozsah měřitelných rychlostí snímání vibrometru je 0-20 [mm/s], 0-100 [mm/s] a 0-500 [mm/s]. Nevýhodami použití laserového vibrometru jsou nutnost otevřených dveří stroje a nemožnost použití procesní kapaliny v průběhu obrábění.



Obr. 52 Vibrometr Polytec PDV 100

### Obráběcí stroj pro testování

Obrábění probíhalo na frézovacím stroji DMG MORI DMU 40 eVo linear v halových laboratořích Katedry technologie obrábění na Západočeské univerzitě v Plzni.

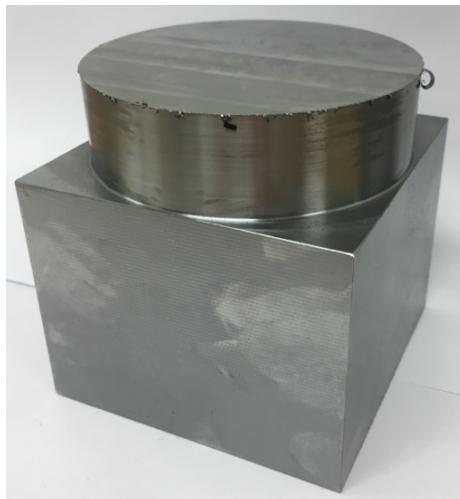
### Upnutí obrobku

Upnutí obrobku by mělo zachycovat všechny působící síly, mělo by být, pokud možno, dokonale tuhé. Nedostatečná tuhost upnutí by mohla zkreslit výsledky měření, proto je vysoká tuhost upnutí při měření zvláště důležitá. Obrobek byl upnut do mechanického svěráku HILMA SCS 120 s tvrdými čelistmi. Tvrdé čelisti byly použity právě kvůli vyšší tuhosti. Zhoršená jakost povrchu pod čelistmi nehrála při experimentu žádnou roli. Šířka čelistí tohoto svěráku je, jak plyne z názvu, 120 mm. Hloubka upnutí byla rovna 3 mm.

### 3.5.2 Polotovar

Polotovar byl z materiálu ČSN 34CrNiMo6, tj. středně legovaná ušlechtilá chrom-nikl-molybdenová ocel vhodná k zušlechťování. Vzhledem k charakteru experimentu bylo žádáno, aby byl materiál polotovaru homogenní. Bylo tedy provedeno kalení, po němž následovalo popouštění na dolní pevnost. Požadované vlastnosti materiálu byly následující: tvrdost materiálu polotovaru  $45 \pm 2$ HRC a mez pevnosti v tahu  $R_m$  1100MPa.

Rozměry polotovaru byly 90x90x120 mm. Jednalo se tedy o čtyřhrannou tyč. Polotovar byl předem obroben tak, aby v jeho horní části vznikl čep s průměrem 88 mm. Úpravu vyžadoval způsob měření vibrací, při kterém fréza mohla vykonávat pouze řezný rotační pohyb.



Obr. 53 Polotovar

### 3.5.3 Řezné podmínky

Řezné podmínky byly voleny na základě doporučení výrobce VBD (Tungaloy, LNMU0303ZER – MJ, třída karbidu AH725). Řezná rychlost byla volena v rozsahu 95–160 [m/min], posuv na zub dosahoval hodnot od 0,5 do 1 [mm]. Maximální axiální hloubka třísky  $a_p = 0,7$  mm, maximální radiální tloušťka třísky  $a_e = 15$  mm. Řezné podmínky jsou sepsány v Tab. 11.

Úrovně	Řezná rychlost ( $v_c$ )	Posuv na zub ( $f_z$ )	Hloubka třísky ( $a_p$ )	Tloušťka třísky ( $a_e$ )
1	95	0,5	0,5	5
2	110	0,7	0,7	15
3	120	1	0,6	8
4	160	0,65	0,55	10

Tab. 11 Řezné podmínky

Kvůli snížení časové náročnosti experimentů byla pro výběr řezných podmínek použitých při experimentu použita Taguchiho matice. Původní počet experimentů pro každou nástrojovou sestavu byl roven  $4^4=256$  experimentů. Faktory  $a_p$  a  $a_e$  byly pro výpočet počtu experimentů sloučeny, čímž se jejich počet snížil na  $4^3=64$ , to je ale stále vysoké číslo, proto byl použit právě Taguchiho přístup, který snížil počet variant podmínek na 16.

Kombinace ŘP	Faktor 1	Faktor 2	Faktor 3	Faktor 4
1	1	1	1	1
2	1	1	2	2
3	1	2	3	3
4	1	2	4	4
5	2	3	1	1
6	2	3	2	2
7	2	4	3	3
8	2	4	4	4
9	3	1	1	1
10	3	1	2	2
11	3	2	3	3
12	3	2	4	4
13	4	3	1	1
14	4	3	2	2
15	4	4	3	3
16	4	4	4	4

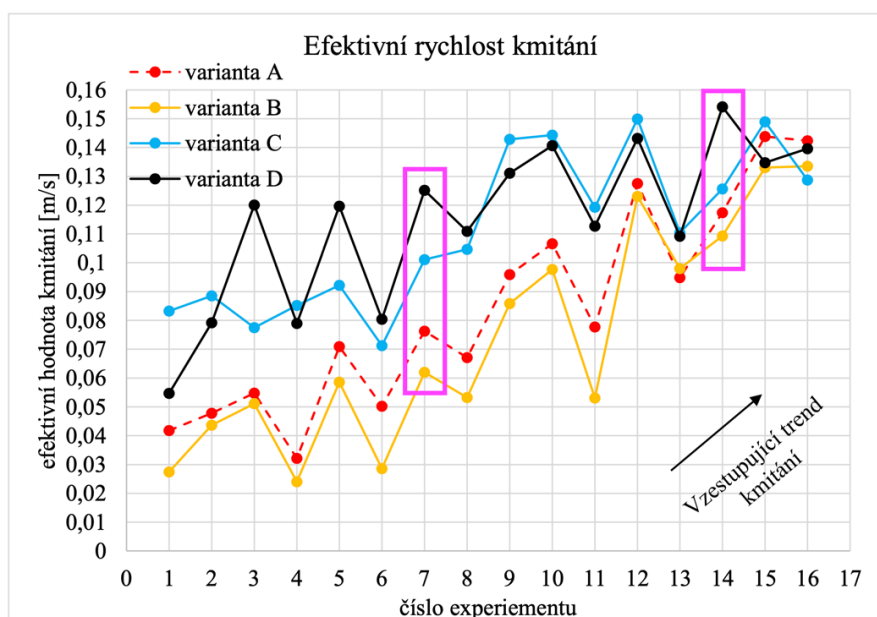
Tab. 12 Kódované označení plánu experimentu



Kombinace ŘP	Řezná rychlost $v_c$ [m/min]	Posuv na zub $f_z$ [mm/z]	Axiální hloubka řezu $a_p$ [mm]	Radiální tloušťka řezu $a_e$ [mm]
1	95	0,5	0,5	5
2	95	0,5	0,7	15
3	95	0,7	0,6	8
4	95	0,7	0,55	10
5	110	1	0,5	5
6	110	1	0,7	15
7	110	0,65	0,6	8
8	110	0,65	0,55	10
9	120	0,5	0,5	5
10	120	0,5	0,7	15
11	120	0,7	0,6	8
12	120	0,7	0,55	10
13	160	1	0,5	5
14	160	1	0,7	15
15	160	0,65	0,6	8
16	160	0,65	0,55	10

Tab. 13 Všechny měřené kombinace řezných podmínek

Pro každou nástrojovou sestavu by měření mělo být provedeno dvakrát. Dohromady bylo použito 8 nástrojových sestav. Celkem to dává  $16 \cdot 2 \cdot 8$  měření = 256 měření. Takový počet měření je opravdu veliký, proto byly z diplomové práce (31) Ing. Miloslava Štýse použity pouze dvě kombinace řezných podmínek, ve kterých se rozdíly v tlumení projevily nejvíce. Jedná se o kombinace č. 7 a č. 14. Ve zmíněné diplomové práci bylo totiž prokázáno, že vibrace v zásadě rostou a klesají u různých nástrojových sestav ve stejném smyslu v závislosti na řezných podmínkách. U lépe tlumících sestav jsou vibrace nižší zpravidla pro všechny řezné podmínky. Řezné podmínky pro testování jsou dosti odlišné, liší se zejména řeznou rychlostí (110 vs. 160 [m/s]), posuvem na zub (0,65 vs. 1 [mm/z]) a radiální tloušťkou řezu  $a_e$  (8 vs. 15 [mm]).



Obr. 54 Výsledky diplomové práce Miloslava Štýse: efektivní rychlost kmitání pro různé nástrojové sestavy a různé řezné podmínky (31)

Obr. 54 ukazuje výsledky měření v diplomové práci (31) Ing. Miloslava Štýse a verifikuje tvrzení v předešlém odstavci. V růžovém rámečku jsou zobrazeny výsledky ze zmíněné diplomové práce pro kombinace řezných podmínek č.7 a 14. Celkem bylo tedy provedeno  $8 \cdot 2 \cdot 2 = 32$  měření. Pro každou nástrojovou sestavu byly kvůli věrohodnosti provedeny 2 měření.

### 3.5.4 Příprava měření

Promyšlení experimentu dopředu bylo v tomto případě zvlášť důležité, protože vibrometr umí měřit jen vibrace předmětu, který se vůči němu nepřemísťuje. Bylo nutné sestavit program pro řízení stroje tak, aby nástroj vykonával pouze hlavní řezný pohyb – rotační. Ostatní posuvné pohyby musel vykonávat obrobek. Stůl stroje ale není konstruován k posuvným pohybům, nabízí pouze rotaci. Bylo tedy nutné mít obrobek ve tvaru kruhu, který by obíhal kolem nástroje. Velmi důležitá byla při tomto řešení soustřednost obrobku a stolu, protože při nedostatečné soustřednosti by byl nástroj vystaven kolísavému zatížení, takové zatížení by značně ovlivnilo vznik vibrací.

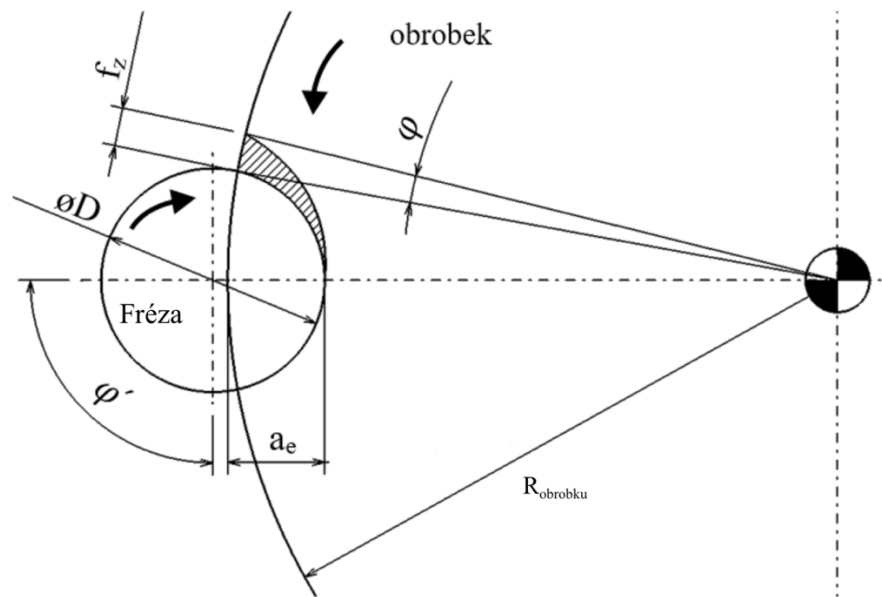
Postup měření byl následující:

- Upnutí polotovaru s maximální soustředností ke stolu frézky
- Nastavení nástroje do požadované souřadnice v ose Z
  - Tím se nastavila  $a_p$
- Při zapnutých otáčkách najetí do požadovaných souřadnic v rovině XY
  - Tím se zahájil řez, nastavilo  $a_e$  a současně se nástroj dostal do polohy pro měření vibrací
- Rotace obrobku a obrábění obrobku kolem dokola
- Ukončení měření a vyjetí z řezu

Pohyb frézy a obrobku musel být pro dodržení daného posuvu na zub synchronizován. Pro správnou synchronizaci bylo potřeba nastavit správné otáčky stolu. Tento výpočet ve své diplomové práci (31) již provedl Miloslav Štýs, postup výpočtu byl převzat z této práce.

Výpočet vycházel z uvedené podmínky:

Čas, za který rotující nástroj opíše délku oblouku v rozmezí úhlu  $\varphi$  ( $90^\circ$ ) na poloměru nástroje ( $r=D/2$ ) se rovná času, za který se opíše délka oblouku na poloměru obrobku ( $R_{\text{obrobku}}$ ) v rozmezí úhlu  $\varphi$ . Náčrt situace pro výpočet zobrazuje Obr. 55.



Obr. 55 Náčrt vzájemných pohybů frézy a obrobku (31)

$$\Delta t_{frézy} = \frac{\Delta \varphi'}{\omega'} = \frac{\Delta \varphi}{\omega} = \Delta t_{obrobku}$$

Vypočtené otáčky stolu nesměly překročit maximální otáčky stolu ( $n_{\max} = 60$  ot/min).  
Uvedený příklad výpočtu je pro následující řezné podmínky:

- Řezná rychlost  $v_c = 95$  [m/min]
- Posuv na zub  $f_z = 0,5$  [mm]

$$\text{Otáčky nástroje } n' = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot D} = \frac{95 \cdot 1000}{3,14 \cdot 20} = 1512 \text{ [ot/min]}$$

$$\text{Úhlová rychlost nástroje } \omega' = \frac{2 \cdot \pi \cdot n'}{60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 1512}{60} = 158,33 \text{ [rad/s]}$$

$$\text{Přírůstek úhlu } \Delta \varphi = \frac{f_z \cdot 180}{\pi \cdot R} = \frac{0,5 \cdot 180}{3,14 \cdot 44} = 0,651^\circ$$

Důležité: poloměr R se během obrábění snižuje a je nutné tomu výpočet přizpůsobit!

$$\text{Přírůstek úhlu } \Delta \varphi = 0,651 \cdot (\pi/180) = 0,0114 \text{ [rad]}$$

Přírůstek úhlu  $\Delta \varphi' = \frac{\pi}{2} = 1,5708$  [rad] ... Fréza má čtyři zuby s rovnoměrnou roztečí  $90^\circ$ .

$$\text{Úhlová rychlost stolu } \omega = \frac{\Delta \varphi}{\Delta \varphi'} \cdot \omega' = \frac{0,0114}{1,5708} \cdot 158,33 = 1,1454 \text{ [rad/s]}$$

$$\text{Otáčky stolu } n = \frac{60 \cdot \omega}{2 \cdot \pi} = \frac{60 \cdot 1,1454}{2 \cdot 3,14} = 10,94 \text{ [ot/min]}$$

Nejrychlejší otáčky stolu  $n$  vyšly pro následující řezné podmínky:

- Řezná rychlost  $v_c = 160$  [m/min]
- Posuv na zub  $f_z = 1$  [mm]

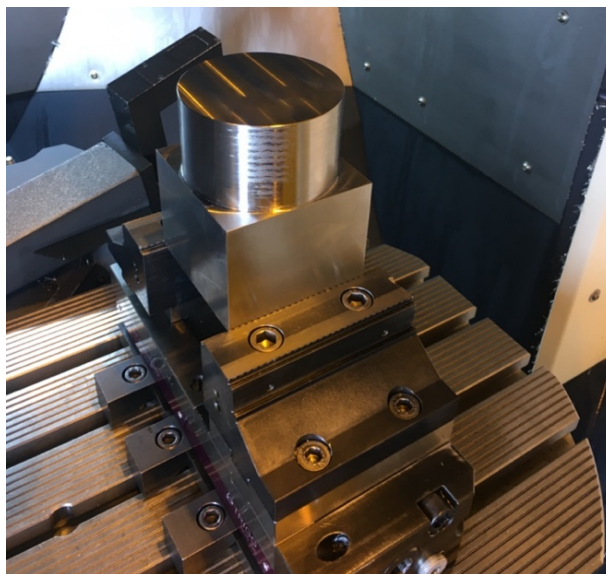
Otáčky stolu  $n = 36,84$  [ot./min]

Pro tyto řezné podmínky je minimální poloměr  $R = 28$  mm, při menším poloměru obrobku by otáčky stolu přesahovaly hodnotu  $n = 60$  [ot./min]. Hodnota poloměru je rovna vzdálenosti mezi osou polotovaru a osou frézy.

Výpočet otáček stolu byl proveden v SW MS Excel, díky tomu bylo možné mít ihned po změně vstupů (řezných podmínek) k dispozici výsledek (otáčky stolu).

### 3.5.5 Průběh měření vibrací

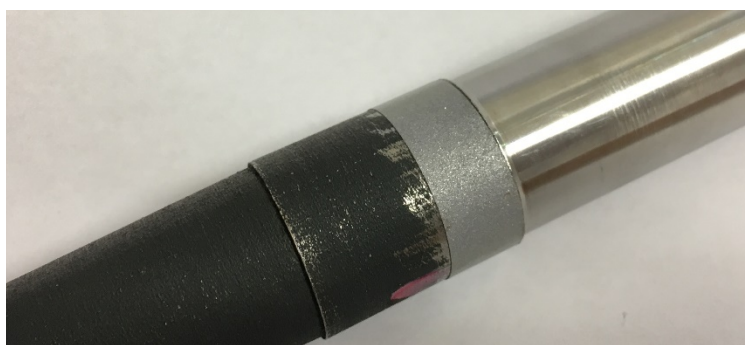
Před samotným měřením proběhlo kompletní zapojení měřicího zařízení – laseru a jeho kalibrace. Polotovár byl upnut do zoubků ve svěráku HILMA SCS 120, přitom byl kladen důraz na jeho vystředění. Polotovár byl vystředěn s odchylkou jedné setiny milimetru. Zaměření nástrojů se provedlo pomocí laserového zaměřování přímo ve stroji. Pro testování byly k dispozici čtyři frézy – ocelová, kompozitní a dvě tištěné a dva nástrojové hydraulické upínače HSK A63 – jeden klasický ocelový a druhý kompozitní. Celkem se tedy testovalo osm nástrojových sestav. Pro každou sestavu se měření kvůli věrohodnosti provedlo dvakrát. Paprsek laserového vibrometru byl zaostřen do oblasti vzdálené cca 60 mm od čela stopky frézy.



Obr. 56 Vystředěný polotovár

Laserový vibrometr byl od fréz vzdálen cca jeden metr, taková vzdálenost je doporučena výrobcem. Rozsah měřitelných rychlostí snímání vibrometru byl nastaven na 0-500 [mm/s].

Miloslav Štýs ve své diplomové práci (31) prokázal, že různé povrchy fréz (kompozit, ocel) nezkrslují výsledky měření. Povrch vytvořený 3D tiskem byl hodně hrubý a světlo laseru rozptyloval tak, že bylo obtížné získat dostatečně kvalitní signál. Kvůli lepší kvalitě signálu byl na frézy nalepen odrazový pásek, jeho reflexní a hladká vrstva zvýšila kvalitu signálu dvakrát až třikrát. Páska současně sloužila jako vymezení měřené oblasti.



Obr. 57 Odrazový pásek nalepený na Fréze 1.1 Plná

Testování probíhalo v následujícím pořadí:

- Ocelová fréza– ocelový upínač – podmínky 7 – 2x
- Ocelová fréza– ocelový upínač – podmínky 14 – 2x
- Otočení destiček
- Ocelová fréza – kompozitní upínač – podmínky 7 – 2x
- Ocelová fréza – kompozitní upínač – podmínky 14 – 2x

Po každém přejezdu byla plocha zarovnána čelní frézou, následující měření tak probíhalo za stejných podmínek s výjimkou nižšího polotovaru. Měření probíhalo stejným způsobem i pro další frézy, ty byly testovány v následujícím pořadí:

- Kompozitní fréza
- Fréza 1.1 – Plná
- Fréza 1.2 – Dutá s práškem

Kvůli zvolené metodě měření probíhalo testování při otevřených dveřích stroje, proto bylo potřebné vložit do otvoru přepážku, která zabraňovala vyletování třísek ze stroje. V přepážce byl vyříznut otvor ve tvaru čtverce a stranách cca 5x5 centimetrů, tímto otvorem procházel paprsek laseru.



Obr. 58 Měření vibrací

Pohyby stroje při měření vibrací byly následující:

Nástroj nejprve najel na požadovanou Z-souřadnici pro danou hloubku řezu ( $a_p$ ), v této poloze se roztočil do plných otáček a pomalým posuvem v ose Y se začal přibližovat k obrobku a zahajovat řez. Po dosažení dané polohy ( $a_e$ ) se stůl stroje s vystředěným obrobkem otočil o 360° a nástroj pak vyjel z řezu.

### 3.5.6 Měřené vlastnosti

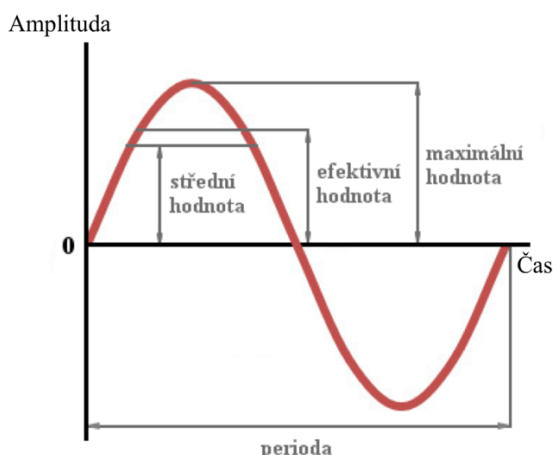
Předmětem zkoumání byly dvě vlastnosti nástrojů:

- Efektivní hodnota rychlosti kmitání fréz
- Vlastní kmitání fréz

#### **Efektivní hodnota rychlosti kmitání frézy**

Efektivní hodnota je objektivní hodnota, které se používá v diagnostických předpisech, je zvláště užitečná při posuzování proměnné, která je střídavě kladná a záporná, rychlost kmitání je právě taková. Z anglického názvu efektivní hodnoty lze lépe pochopit o jakou hodnotu se jedná, název zní: Root mean square nebo quadratic mean, což ve volném překladu znamená druhá odmocnina ze střední hodnoty kvadrátu veličiny. (35) (36)

$$\text{Efektivní rychlost vibrací } v_{\text{ef}} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T v^2(t) dt} \quad [\text{m/s}]$$



Obr. 59 Efektivní hodnota (37)

Při vyhodnocování této veličiny budou jednotlivé výsledky porovnávány s referencí, přičemž platí: čím nižší efektivní hodnota rychlosti kmitání, tím lepší výsledek. Je předpoklad skokových změn efektivní hodnoty rychlosti kmitání se změnou řezných podmínek.

### Vlastní kmity fréz

Při hodnocení této veličiny se do grafu zobrazil průběh rychlostí kmitů dvou měřených nástrojových sestav. Bylo žádoucí, aby se oba grafy vzájemně co nejvíce překrývaly a bylo možné je mezi sebou porovnávat, i zde platí, že čím je efektivní rychlost kmitání nižší, tím je nástroj lepší.

## 3.1 Výsledky měření vibrací nástrojových sestav

V této kapitole jsou uvedeny výsledky měření vibrací fréz v řezu, ty jsou jednou ze stěžejních částí práce.

### 3.1.1 Základní údaje o měření

Vibrometr:	Polytec PDV-100
<b>Nastavení vibrometru pro danou úlohu</b>	
Rozsah:	500 mm/s
Digitální FIR filtr – dolní propust:	1 kHz
Analogový výstup:	Rychlost, $\pm 4$ V, 24-bit DAC
Měřicí hardware:	National Instruments, cDAQ - 9172, 8-slot chassis s modulem NI 9234, $\pm 5$ V, 24 bit pro měření vibrací a hluku
Měřicí a ovládací software:	Labview 2016
Vzorkovací frekvence:	2048 Hz
Doba měření:	5 s (frekvenční rozlišení 0.2 Hz)
Zpracování signálu:	Flat top window

Tab. 14 Základní údaje o měření

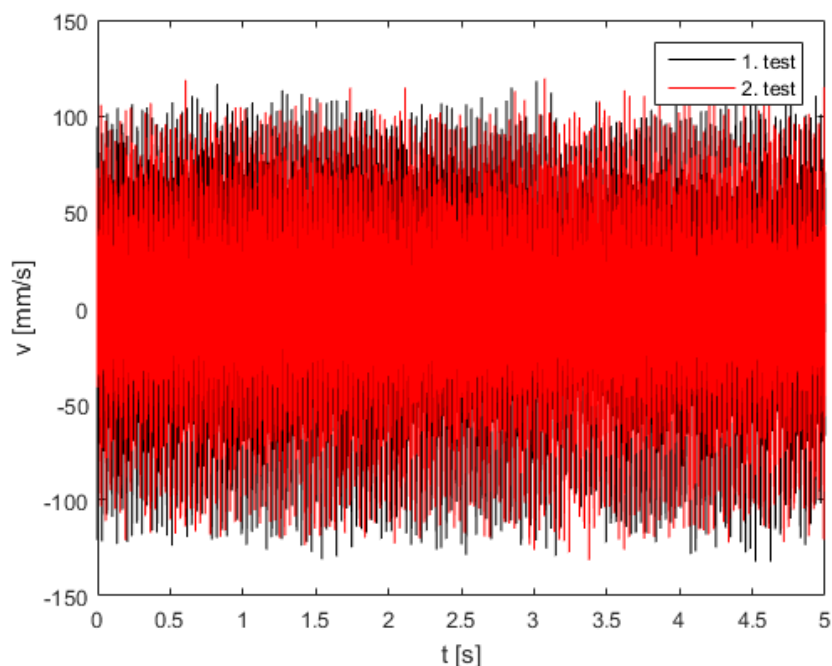
### 3.1.2 Testovací matice

	Počet opakovaných měření	Počet řezných podmínek
Ocelová fréza – ocelový upínač	2	2
Ocelová fréza – kompozitní upínač	2	2
Kompozitní fréza – ocelový upínač	2	2
Kompozitní fréza – kompozitní upínač	2	2
Fréza 1.1 - Plná – ocelový upínač	2	2
Fréza 1.1 - Plná – kompozitní upínač	2	2
Fréza 1.2 – Dutá s práškem – ocelový upínač	2	2
Fréza 1.2 – Dutá s práškem – kompozitní upínač	2	2
<b>Celkový počet měření</b>	<b>32</b>	

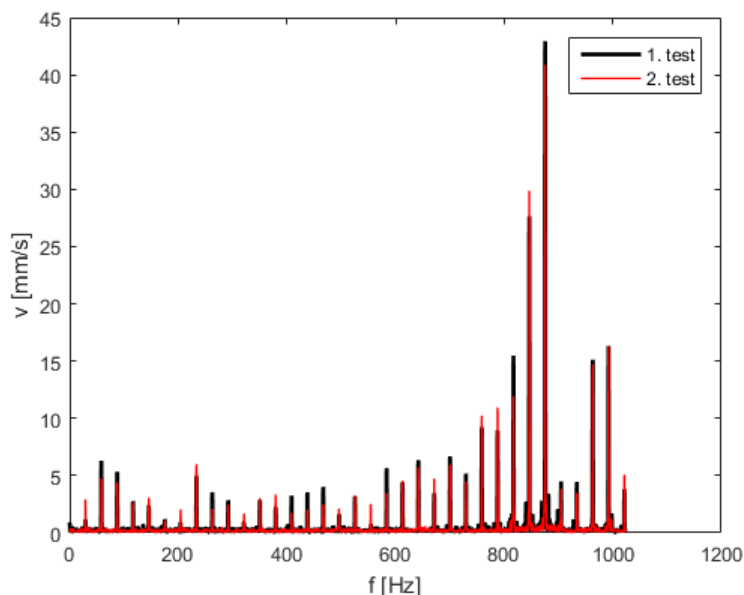
Tab. 15 Testovací matice měření

### 3.1.3 Podobnost opakovaného měření

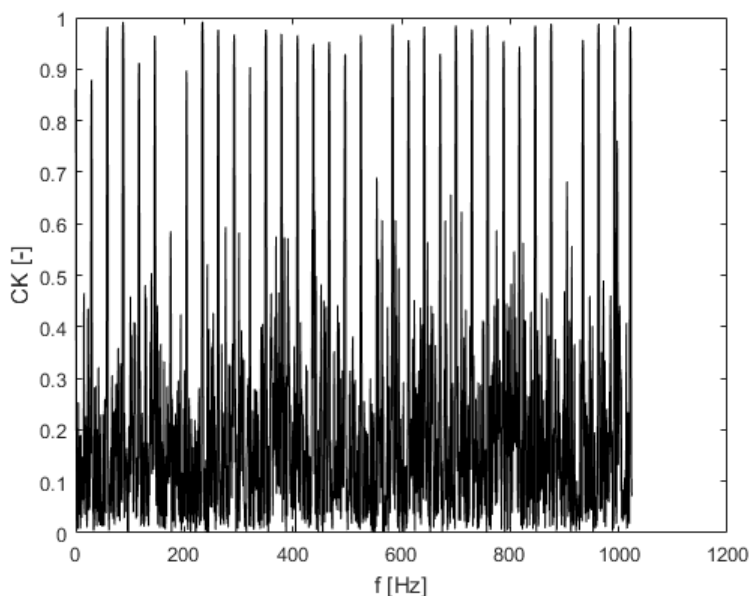
Každý typ nástrojové sestavy i řezných podmínek byl opakovaně proměřen. Příkladem je uvedeno srovnání opakovaného měření na Fréze 1.2 Dutá s práškem s ocelovým upínačem pro řezné podmínky č. 7. Na Obr. 60 jsou uvedeny časové záznamy procesu frézování. Oba signály mají téměř identickou hodnotu RMS tj. 44.5733 a 44.0629 [mm/s] a obdobný průměr tj. 0.4734 a 0.4222 [mm/s]. Dobrá opakovatelnost měření je názorná na Obr. 61, kde jsou uvedena příslušná amplitudová spektra. Amplitudy signálů jsou v kvantitativní i kvalitativní shodě na všech frekvencích odpovídajících násobkům základní frekvence (otáčení frézy 1741 RPM = 29 Hz). Tuto shodu lze demonstrovat i pomocí Obr. 62, kde se drtivá většina mocninné koherence na zmíněných frekvencích blíží hodnotě jedna, což znamená maximální korelaci obou časových signálů ve frekvenčním prostoru. Obecně lze uvést, že ve všech testovaných situacích byla nalezena uspokojivá opakovatelnost, a proto jsou v dalším rozboru uvedeny již jen průměrné hodnoty z obou měření.



Obr. 60 Příklad časového záznamu opakovaného měření



Obr. 61 Příklad amplitudového spektra opakovaného měření

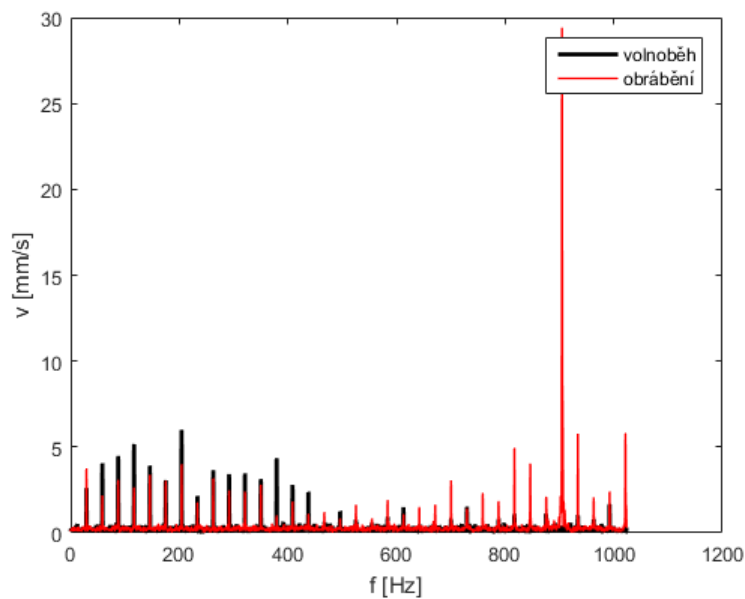


Obr. 62 Koherence signálu opakovaného měření

### 3.1.4 Porovnání volnoběhu a obrábění

Na Obr. 63 je uvedeno porovnání amplitudového spektra při volnoběhu a obrábění pro případ ocelové frézy s kompozitním upínačem za řezných podmínek č. 7. Jsou zcela jasné násobky frekvence otáčení frézy (29 Hz) a je patrné, že při obrábění došlo k nárůstu vibrací na vyšších frekvencích s maximem kolem 905 Hz. Proces byl doprovázen silným akustickým projevem, který již je lidské ucho schopno dobře vnímat (vnímání hluku je u lidského ucha potlačeno pro nízké frekvence a začíná být intenzivní právě kolem 1000 Hz). Toto měření bylo limitováno rozsahem do 1024 Hz, ale je možné, že na vyšších frekvencích se vyskytují další výrazné amplitudy. Pro doplnění, časový záznam volnoběhu měl hodnotu  $RMS = 11.9756$  [mm/s], zatímco při obrábění byla hodnota  $RMS = 21.6531$  [mm/s].

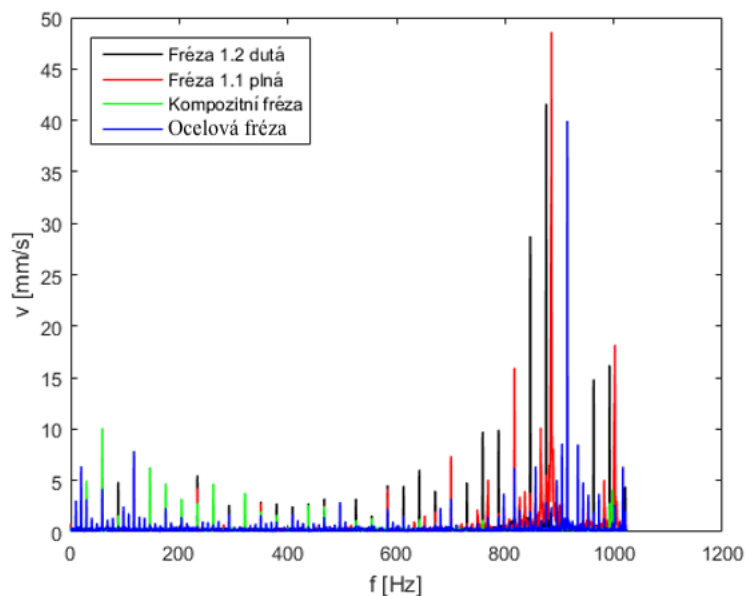




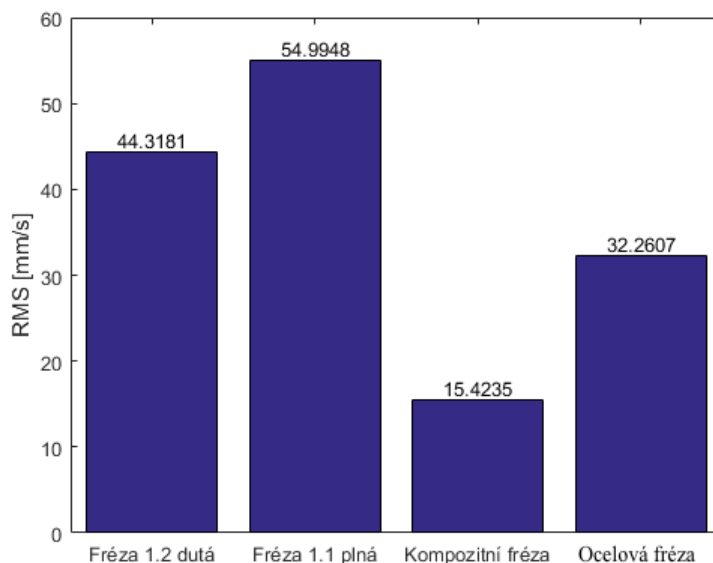
Obr. 63 Porovnání amplitudového spektra při volnoběhu a při obrábění

### 3.1.5 Standardní ocelový nástrojový upínač – řezné podmínky č.7

Se standardním ocelovým upínačem byly testovány čtyři různé frézy. Obr. 64 zobrazuje příslušná amplitudová spektra při obrábění za podmínek č. 7. Kromě kompozitní frézy mají ostatní frézy výrazné vibrace nad 800 Hz. Zajímavostí jsou subharmonické frekvence (násobky 9.7 Hz) u ocelové frézy. Kompozitní fréza vykazuje pouze vibrace na nízkých frekvencích a má nízkou hodnotu RMS (blízkou volnoběhu), jak dokládá Obr. 65. Je možné se domnívat, že vibrace byly v tomto případě vyšší než testovaný rozsah. Ve zkoumaném frekvenčním pásmu vychází jako nejhorší fréza s označením 1.1 plná, nejlépe dopadla ocelová fréza.



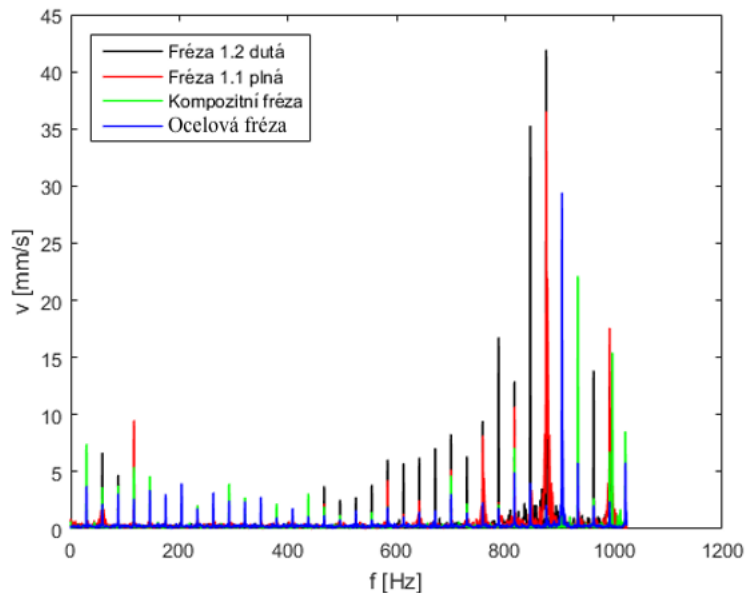
Obr. 64 Amplitudová spektra při obrábění pro standardní nástrojový upínač pro řezné podmínky č.7



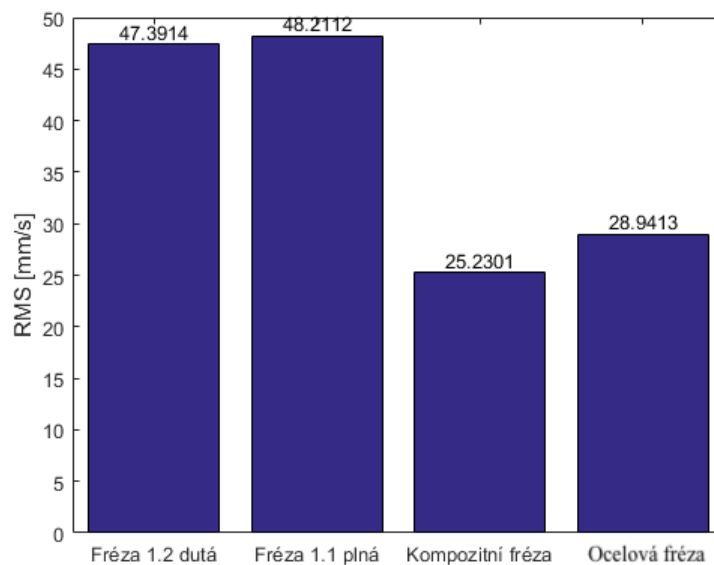
Obr. 65 RMS hodnoty signálů při obrábění pro standardní nástrojový upínač pro řezné podmínky č.7

### 3.1.6 Kompozitní nástrojový upínač – řezné podmínky č.7

Obr. 66 zobrazuje příslušná amplitudová spektra při obrábění za řezných podmínek č. 7 pro kompozitní upínač. Jsou zde již vidět výrazné vibrace nad 800 Hz u všech fréz. Z RMS hodnot vychází opět jako nejhorší Fréza 1.1 - Plná (Obr. 67). Obdobné úvahy jako v předchozí kapitole platí pro kompozitní frézu. Nejlépe dopadla ocelová fréza.



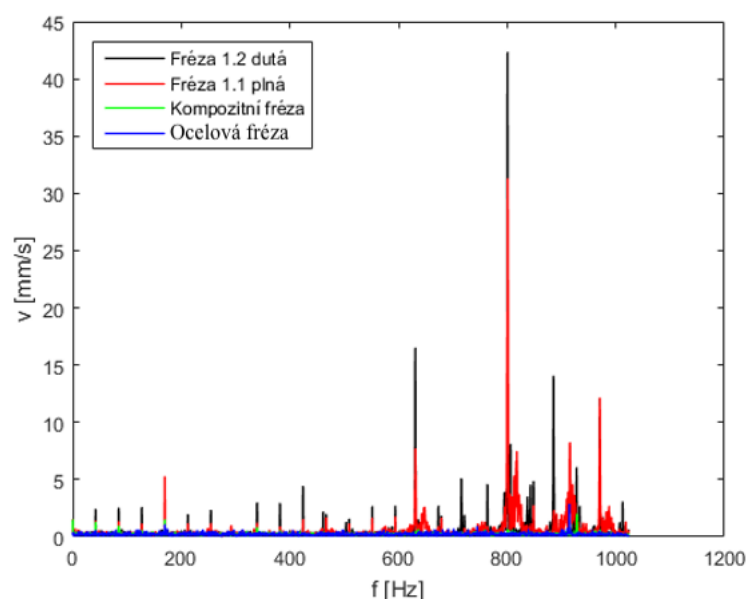
Obr. 66 Amplitudová spektra při obrábění pro kompozitní upínač při řezných podmínkách č.7



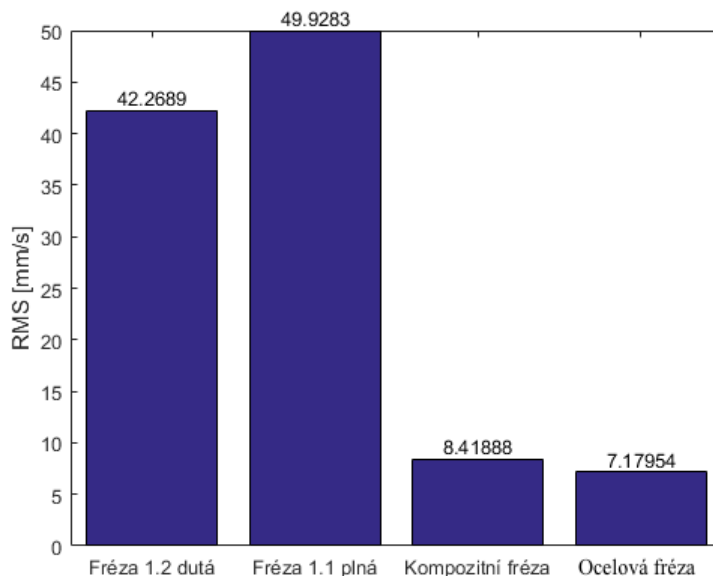
Obr. 67 RMS hodnoty signálů při obrábění pro kompozitní upínač při řezných podmínkách č.7

### 3.1.7 Standardní ocelový nástrojový upínač – řezné podmínky č.14

Obr. 68 a Obr. 69 ukazují amplitudová spektra a RMS hodnoty procesu obrábění pro standardní nástrojový upínač za řezných podmínek č. 14. Je jasné, že kromě dat z měření Frézy 1.2 Dutá s práškem a 1.1 Plná, výsledky nejsou platné. To bylo zřejmě způsobeno změnou pozice obráběcího nástroje, který se dostal mimo bod zaměření laseru. Tato příčina byla odhalena až po měření. Ostatní signály, ač ukazovaly průběžně nějaký dynamický děj, nezachycovaly zkoumané děje, což vyplynulo až *ex post* z analýzy naměřených dat. Nicméně zde existuje přímé srovnání procesu obrábění na standardním nástrojovém upínači s Frézou 1.2 Dutá s práškem pro dva typy odlišných řezných podmínek. Oba procesy mají obdobné kvadratické průměry – pro podmínky č. 7 je  $RMS = 44.3181$  [mm/s] a pro podmínky č. 14 je  $RMS = 42.2689$  [mm/s]. Obdobně lze srovnat Frézu 1.1 Plná, která vykazuje zvětšené vibrace při podmínkách č. 7. Graf na Obr. 68 správně zachycuje nárůst otáček frézy na 42.5 Hz (2250 RPM).



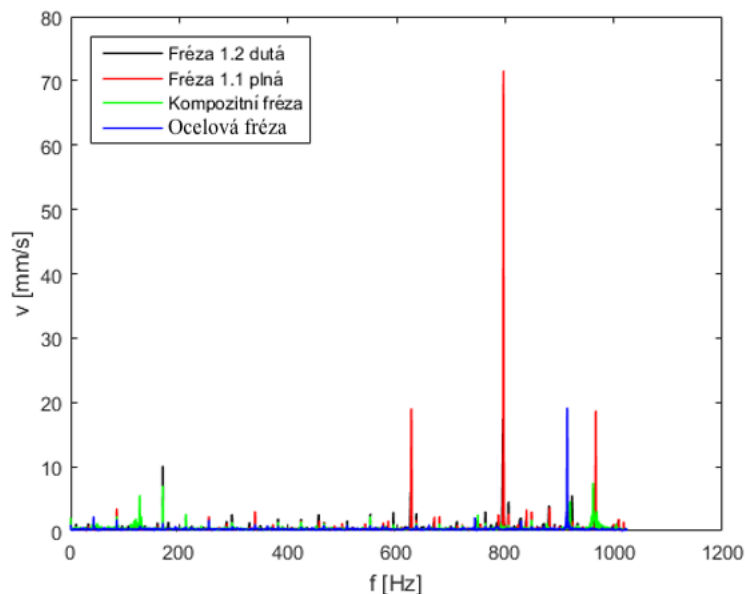
Obr. 68 Amplitudová spektra při obrábění pro standardní nástrojový upínač při řezných podmínkách č.14



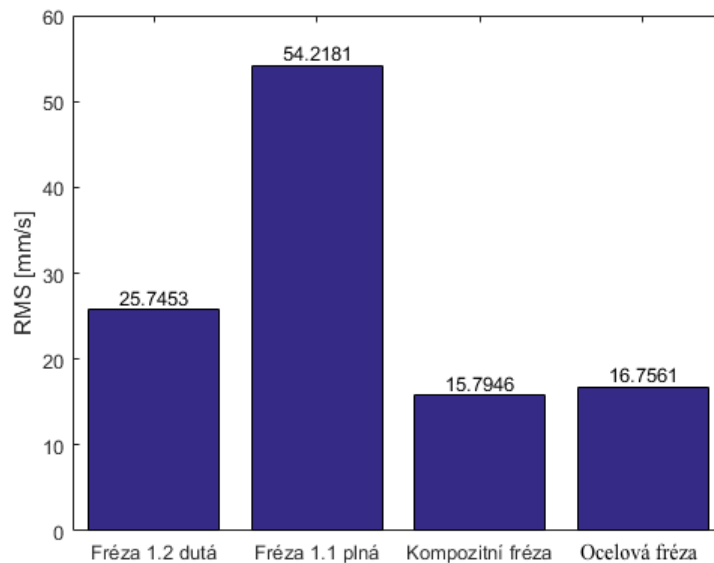
Obr. 69 RMS hodnoty signálů při obrábění pro standardní nástrojový upínač při řezných podmínkách č.14

### 3.1.8 Kompozitní nástrojový upínač – řezné podmínky č.14

Nedostatky měření popsané v předchozí kapitole se projevily i v případě kompozitního upínače pro řezné podmínky č. 14. Obr. 70 a Obr. 71 ukazují příslušná amplitudová spektra a RMS hodnoty. Jediným platným výsledkem je měření Frézy 1.1 Plná a je tedy možné provést přímé srovnání procesu obrábění pro dva typy odlišných řezných podmínek. Tato fréza vykazuje zvětšené vibrace při podmínkách č. 14.



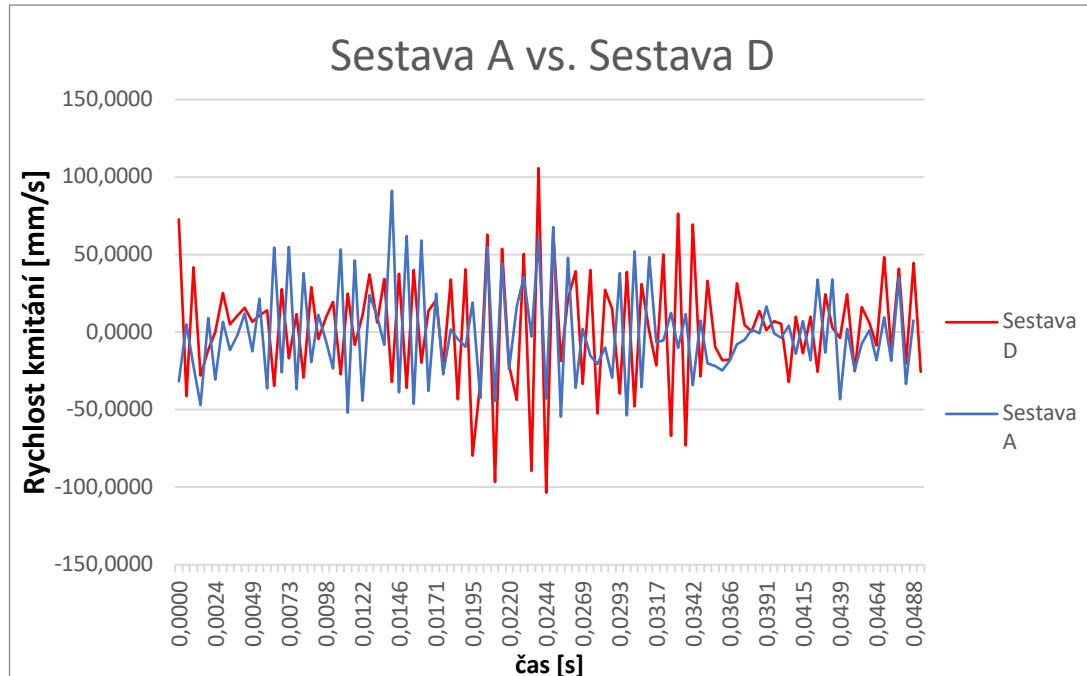
Obr. 70 Amplitudová spektra při obrábění pro kompozitní upínač při řezných podmínkách č.14



Obr. 71 RMS hodnoty signálů při obrábění pro kompozitní upínač při řezných podmínkách č.14

### 3.1.9 Hodnocení vlastních kmitů fréz

Pro ověření dynamických vlastností nástrojových sestav byly vytvořeny grafy zobrazující vlastní kmity sestav. Zobrazené kmity potvrzují správný výpočet RMS. Graf 15 zobrazuje kmity nástrojových sestav A a D. Ostatní grafy zobrazující kmity sestav jsou přiloženy v příloze.



Graf 15 Porovnání kmitů nástrojových sestav A a D

Sestava D je oproti ostatním sestavám charakteristická nejdříve nízkými kmity a poté jejich prudkým nárůstem. Celý cyklus střídání velkých a nízkých kmitů se přitom neustále opakuje. Možnou příčinou takového průběhu může být volný prášek uvnitř těla Frézy 1.2. Prášek zpočátku svým pohybem vibrace tlumí, po určitém navýšení jeho pohybu však začne vibrace naopak podporovat.

## 4 Zhodnocení výsledků a jejich sumarizace

Tato část je stěžejní částí diplomové práce a jsou v ní vysvětleny všechny získané výsledky měření experimentální modální analýzy, pevnostní analýzy a měření vibrační fréz v řezu. Na základě výsledků získaných v předchozí kapitole byly stanoveny závěry shrnující výsledky práce, a tím i potenciál využití aditivních technologií v oblasti řezných nástrojů.

### 4.1 Pevnostní analýza

Pro ověření pevnosti tištěných fréz byla provedena výpočtová analýza. Analýza hodnotí a porovnává tištěné frézy 1.1 až 1.4.

#### 4.1.1 Zadané okrajové podmínky

##### **Materiál**

Pro výpočtové modely byl jako materiál zvolen ocelový prášek pro tisk MS1 o pružnosti  $160 \pm 30$  GPa, hustotě  $8.0\text{--}8.1$  g/cm<sup>3</sup> a s Poissonovým číslem 0,3.

##### **Vazby**

Simulace předpokládaného upnutí je tvořena vazbami na celé ploše upínací stopky a zabraňuje radiálnímu i axiálnímu posuvu a rotaci.

##### **Zátěžný stav**

Zátěžné parametry byly uvažovány pro vyšší řezné podmínky, než budou použity pro testování.

Zadané parametry pro staticky řešený zatěžný stav:

Řezná síla:  $F_c = 1950$  N

Krouticí moment:  $M_k = 23$  Nm

Výkon:  $P = 4,5$  KW

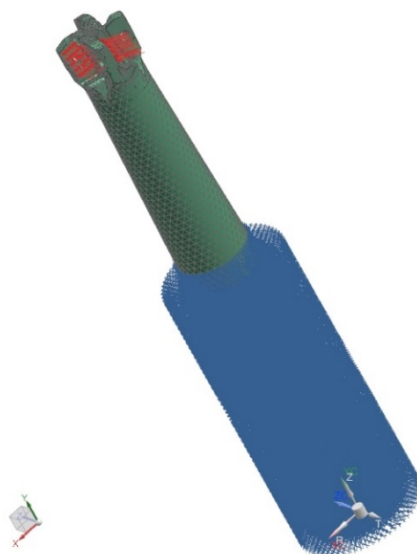
Počet VBD v řezu je volen v rámci předběžného výpočtu:

$n = 1$ ks

$n = 2$ ks

#### 4.1.2 Simulace

Simulace využívala metodu konečných prvků a byla provedena v SW Siemens NX11 ve výpočtovém modulu Nastran. Pro výpočet byly užity prvky tetraedrové sítě CTETRA 10 o velikosti 0,5 až 2,5 mm s různými modifikacemi nastavení. Pro definici hodnoty napětí je užita hypotéza Von-Mises (HMH).



Obr. 72 Okrajové podmínky aplikované na model frézy – počet VBD v řezu  $n = 2$  ks

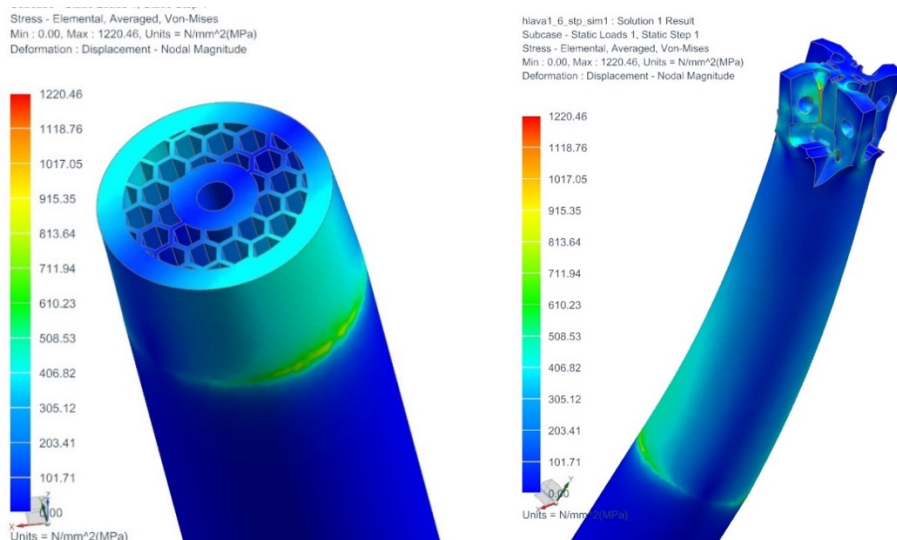
### 4.1.3 Vyhodnocení

Simulací byly získány hodnoty uvedené v Tab. 16.

	Maximální předpokládané napětí $\sigma_{\max}$ / krit. elementu $\sigma_{\text{element max}}$ [MPa]	Napětí v průřezu $\sigma_p$ [MPa]	Deformace v průřezu $\Delta_p$ [ $\mu\text{m}$ ]	Deformace $\Delta_{\max}$ [ $\mu\text{m}$ ]
VBD v řezu $n = 1$ ks				
1.1 Plný materiál	790/1200	350	144	347
1.2 Dutá s práškem	1000/1200	420	180	468
1.3 Spirála	950/1080	450	175	447
1.4 Honeycomb	1000/1200	460	180	429
VBD v řezu $n = 2$ ks				
1.1 Plný materiál	1000/1350	400	240	594
1.2 Dutá s práškem	950/1200	475	295	795
1.3 Spirála	960/1200	480	320	792
1.4 Honeycomb	1200/1400	500	300	750

Tab. 16 Souhrnný přehled získaných hodnot

Konstrukční řešení využívající vnitřní struktury v těle frézy, má prokazatelně vliv na výsledné hodnoty v rámci řešené simulace, a to snížením deformační tuhosti. Dle simulací dosahuje hodnota snížení deformační tuhosti hodnoty až 22 %. V rámci hodnot napětí se jedná především o změnu jeho rozložení na daný průřez vnitřní struktury jednotlivých variantách a navýšení mezních hodnot až o 20 %.



Obr. 73 Zatížení Frézy 1.4 – Honeycomb;  $n=2$  ks

## 4.2 Celkové hodnocení experimentální modální analýzy

### Celkové hodnocení tlumících charakteristik fréz

U Frézy 1.2 Dutá s práškem se potvrdil předpoklad účinného tlumení pohybem prášku, nicméně jeho příliš volný pohyb způsobil opětovné zvýšení vibrací. Frézy 1.3 Spirála a 1.4 Honeycomb měly za úkol opravit tuto konstrukční chybu. Opětovný nárůst vibrací se u Frézy 1.3 Spirála projevil jen mírně a u Frézy 1.4 Honeycomb se neprojevil, proto lze konstrukci těchto fréz považovat za úspěšnou. Výborné tlumící vlastnosti má sama o sobě kompozitní fréza, která má křivku tlumení strmou a zároveň plynulou.

### Celkové hodnocení frekvenčních charakteristik fréz

Všechny frézy jsou nalazeny do vysokých frekvencí, jejich vlastní frekvence se pohybují od 3 do 4 tisíc Hz. Tištěné frézy jsou charakteristické nižšími vlastními frekvencemi těsně kolem 3 tisíc Hz, vlastní frekvence ocelové frézy je 3458 Hz a kompozitní fréza je nalazena na nejvyšší vlastní frekvenci dosahující hodnoty 4111 Hz. Tato informace nemá takovou výpovědní hodnotu, protože se s uchycením do nástrojového upínače a stroje vlastní frekvence výrazně změní. Určitě je zajímavé porovnat tuhosti fréz při vlastní frekvenci, kdy Fréza 1.1 Plná dosáhla více než dvojnásobné tuhosti při vlastní frekvenci. Obecně všechny frézy kromě Frézy 1.4 Honeycomb dosáhly vyšší tuhosti než referenční ocelová fréza. U kompozitní frézy je tento výsledek opodstatněný jiným materiálem, u tištěných fréz je možným opodstatněním technologie výroby či jiná ocel.

### Celkové hodnocení tlumících charakteristik nástrojových sestav

Negativní stránka Frézy 1.2 Dutá s práškem se projevuje i v tomto měření. V Sestavě J, kde je použita tato fréza dochází k rychlému utlumení vibrací ale poté k opětovnému částečnému nárůstu vibrací. Je zajímavé, jak použití kompozitního upínače s různými frézami působí na tlumení sestav, v některých případech má jeho použití pozitivní přínos, v některých nikoliv. Nejlepších tlumících vlastností mají dle výsledků Sestavy L a D, Sestava D dosáhla utlumení v nejkratším čase, přesto se umístila až na druhém místě. Sestava L má totiž zpočátku plynulejší průběh tlumení. Tlumící vlastnosti kompozitní frézy se při tomto měření nepotvrdily, naopak sestavy obsahující kompozitní frézu dopadly díky pomalému utlumení jako jedny z nejhorších.



### Celkové hodnocení frekvenčních charakteristik nástrojových sestav

Vlastní frekvence se u nástrojových sestav vůči samotným nástrojům podstatně změnily, což se dalo očekávat. Přelazení způsobil nástrojový upínač i upnutí ve stroji. Použití kompozitního upínače namísto ocelového nemělo u většiny sestav žádný vliv na jejich naladění, u některých se jednalo pouze o vliv minimální (do 30 Hz). Vlastní frekvence nástrojových sestav se přiblížily frekvenci při obrábění během experimentu (169 Hz). I přesto, že je teoretická frekvence při obrábění daleko nižší, mohla by se při určitých podmínkách blížit například frekvenci 600 Hz, při které se už amplituda některých nástrojových sestav zvyšuje. Z hlediska tuhosti při vlastní frekvenci dopadla výborně Sestava C a následně Sestava D, ostatní sestavy se více či méně pohybují kolem referenční Sestavy A. Kompozitní upínač měl kromě sestav s Frézou 1.4 negativní vliv na tuhost při vlastní frekvenci.

### 4.3 Celkové hodnocení měření vibrací

V celkovém hodnocení jsou kvůli věrohodnosti měření vyhodnoceny pouze měření při řezných podmínkách č.7. Nejlepších výsledků při měření vibrací fréz v řezu dosáhla jednoznačně ocelová fréza. Naopak kompozitní fréza svými vibracemi přesahovala měřené rozmezí a dosáhla tak nejhorších výsledků, ty jsou v Tab. 17 zvýrazněny oranžovou barvou. V měřeném rozmezí se jako nejhorší jeví Fréza 1.1 – Plná, tento výsledek je velice zajímavý, protože má kromě chladících kanálků stejnou konstrukci jako ocelová fréza. Příčinou zvýšení vibrací je nejspíše větší hodnota obvodového a čelního házení oproti ocelové fréze. Další příčinou zvýšení vibrací by mohl být odlišný způsob výroby frézy, ocelová fréza je vyráběna konvenčně, zatímco Fréza 1.1 Plná je vytištěna na 3D tiskárně. Dutina ve Fréze 1.2 vyplněná nespečeným práškem splnila svůj smysl a oproti Fréze 1.1 zlepšila tlumení vibrací i přes vyšší hodnoty čelního a obvodového házení, i když v případě použití s kompozitním upínačem šlo jen o nepatrné zlepšení. Jednoznačně navrhuji opakování tohoto měření s přesněji obrobenými Frézami 1.1 Plná a 1.2 Dutá s práškem, tedy aby jejich házení dosahovalo stejných hodnot jako házení ocelové frézy a do experimentu zapojit i Frézy 1.3 Spirála a 1.4 Honeycomb, přitom opět dbát na hodnotu jejich házení. Dále by bylo vhodné sestavy vyvážit.

	Standardní upínač [mm/s]	Kompozitní upínač [mm/s]
Ocelová fréza	32,2607	28,9413
Kompozitní fréza	15,4235	25,2301
Fréza 1.1 - Plná	54,9948	48,2112
Fréza 1.2 - Dutá s práškem	44,3181	47,3914

Tab. 17 RMS pro řezné podmínky č.7

## 5 Závěr

Hlavním úkolem této práce bylo ověřit možnost využití aditivních technologií v oblasti řezných nástrojů, konkrétně při výrobě frézy s dlouhým vyložením. Byla navržena fréza se stejnou řeznou geometrií jako standardní ocelová fréza, standardní fréza sloužila jako reference pro hodnocení výsledků měření. Navržená fréza se od standardní lišila použitím vnitřního vedení chladicího média, které ústilo přímo na hřbetu i na čele VBD. Důvodem pro výrobu fréz byla vidina snížení vibrací při frézování, proto byla navržena ještě druhá fréza, která měla ve svém těle dutinu vyplněnou kovovým práškem. Prášek v dutině měl za úkol rozptýlení pohybu a tím utlumení vibrací. Všechny frézy byly otestovány pomocí experimentální analýzy. Z výsledků vyplynul přínos dutiny s práškem, pohyb prášku byl však příliš veliký a způsoboval opětovný nárůst vibrací, proto jsme navrhli celkem 8 vzorků ve tvaru kvádrů s různými vnitřními tvary. Vzorky se podrobily testování pomocí experimentální modální analýzy a na základě výsledků se vybraly dva vzorky s nejlepšími předpoklady. Vybrané vnitřní tvary ze vzorků se implementovaly do fréz a vznikly s názvem Fréza 1.3 – Spirála a Fréza 1.4 – Honeycomb. Opět následovalo testování pomocí experimentální modální analýzy. Analýza byla provedena jak pro samotné frézy, tak pro nástrojové sestavy upnuté přímo ve frézce. Modální fréz 1.3 Spirála a 1.4 Honeycomb potvrdila přínos těchto dvou vnitřních struktur. Experimentální modální analýza poskytla vhodný pohled na chování nástrojů upnutých ve frézce. Z výsledků vyšla nejlépe Sestava E (ocelový nástrojový upínač a Fréza 1.3 – Spirála) a Sestava L (kompozitní nástrojový upínač a Fréza 1.4 – Honeycomb), přitom bylo zajímavé sledovat vliv použití kompozitního upínače, který byl v závislosti na použité fréze pozitivní nebo negativní. Před samotným měřením vibrací fréz v řezu se provedlo ověření funkčnosti tištěných fréz. Každá tištěná fréza byla použita na devět přejezdů o délce devět centimetrů, všechny obstály bez poškození. Pro experiment měření vibrací fréz v řezu byly použity pouze čtyři frézy, ocelová, kompozitní a Frézy 1.1 Plná a 1.2 Dutá s práškem, u Fréz 1.3 Spirála a 1.4 Honeycomb se nestihly obrobit lůžka pro VBD, proto nebylo možné s nimi obrábět. Následné měření vibrací fréz v řezu nepotvrdilo předpokládané vlastnosti tištěných fréz. Z výsledků měření se zdá být nejlepší standardní ocelová fréza. Fréza 1.1 Plná dosahovala i přes stejnou konstrukci jako ocelová fréza daleko vyšších vibrací v řezu, vibrace byly vyšší až o 70 %. Tento výsledek jsme opravdu nečekali a je těžké nalézt jeho příčinu. Jednou z možných příčin je technologie výroby aditivní technologií sama o sobě. Další příčinou může být způsob tisku fréz, tím jsou myšleny parametry pro tisk jako například směr tisku, tloušťka vrstvy, strategie tisku či výkon laseru. Další možnou příčinou může být použitý materiál MS1, ze kterého se frézy tiskly. Fréza 1.2 Dutá s práškem dosáhla oproti Fréze 1.1 Plná snížení vibrací až o 20 %, což potvrdilo pozitivní vliv dutiny s práškem. Použití aditivních technologií v oblasti řezných nástrojů je určitě do budoucna zajímavé téma, které ale potřebuje více probádat.

## Seznam použitých zdrojů

- [1] Spratt, Ed. Pinkbike. [Online] 5. 4 2019. [Citace: 16. 10 2019.]  
<https://www.pinkbike.com/news/atheron-dh-bike-prototype-2019.html>.
- [2] Atherton Bikes. Atherton Bikes. [Online] [Citace: 16. 10 2019.]  
<https://www.athertonbikes.com>.
- [3] GlobalisAsia. [Online] 23. 4 2019. [Citace: 22. 10 2019.]  
<https://www.globalisasia.com/blog/uncategorized/prototyping-the-future-5-innovations-in-additive-manufacturing-for-enterprises/>.
- [4] Nick. 3D printer and 3D printing news. [Online] 22. 11 2016. [Citace: 22. 10 2019.]  
<https://www.3ders.org/articles/20161122-maker-of-3d-printed-blade-supercar-predicts-flatpack-future-for-auto-industry.html>.
- [5] Thomas. 3D printer and 3D printing news. [Online] 18. 4 2019. [Citace: 22. 10 2019.]  
<https://www.3ders.org/articles/20190418-3d-printed-molds-help-to-insulate-nasas-supersize-space-launch-system.html>.
- [6] Harbaugh, Jennifer. NASA. [Online] 22. 6 2018. [Citace: 22. 10 2019.]  
<https://www.nasa.gov/exploration/systems/sls/insulation-protects-sls-from-fire-and-ice>.
- [7] V., Carlota. 3D natives. [Online] 30. 9 2019. [Citace: 22. 10 2019.]  
<https://www.3dnatives.com/en/3d-printed-pulley-cyclists-300920194/>.
- [8] 3D natives. *BIOLIFE4D bioprints small human heart for the first time in the U.S.* [Online] 16. 9 2019. [Citace: 23. 10 2019.] <https://www.3dnatives.com/en/biolife4d-bioprints-small-human-heart-160920195/>.
- [9] Ivana, Zetková. *Problematika výroby strojních kovových součástí 3D tiskem*. Plzeň : Západočeská Univerzita v Plzni, 2017.
- [10] Epna. Additive Manufacturing. [Online] [Citace: 14. 1 2020.]  
<https://www.epma.com/additive-manufacturing>.
- [11] Dawes, Jason, Bowerman, Robert a Trepleton, Ross. *Introduction to the Additive Manufacturing Powder Johnson Matthey Technol. Rev., 2015, 59, (3), 243–256*. Coventry : Component Technologies, Manufacturing Technology, 20.
- [12] EOS. *Školící materiály - Maraging Steel MS1*. Interní Materiály.
- [13] FABORY. Fabory. [Online] [Citace: 18.12.2019]  
[https://www.fabory.com/cs/knowledge\\_center/technical/steel/influence\\_of\\_alloying\\_elements](https://www.fabory.com/cs/knowledge_center/technical/steel/influence_of_alloying_elements).
- [14] Tumlikovo. Vliv jednotlivých prvků na vlastnosti ocelí. [Online] 2010. [Citace: 18. 12 2018.] <http://www.tumlikovo.cz/vliv-jednotlivych-prvku-na-vlastnosti-oceli/>.
- [15] Ušlechtilé uhlíkové konstrukční oceli třídy 12, jejich složení a tepelné zpracování. [Online] 2010. [Citace: 18. 12 2019.] <http://www.tumlikovo.cz/uslechtilé-uhlíkové-konstrukční-oceli-trídy-12-jejich-složení-a-tepelné-zpracování/#more-3180>.
- [16] EOS. EOS . [Online] EOS, 2019. [Citace: 23. 10 2019.]  
[https://www.eos.info/additive\\_manufacturing/for\\_technology\\_interested](https://www.eos.info/additive_manufacturing/for_technology_interested).
- [17] GAO, YANG a LI, BORUI. *Watching and Safeguarding Your 3D Printer: Online Process Monitoring Against Cyber-Physical Attacks*. [Online] 9 2018. [Citace: 9. 1 2020.]  
[https://www.researchgate.net/publication/327760995\\_Watching\\_and\\_Safeguarding\\_Your\\_3D\\_Printer\\_Online\\_Process\\_Monitoring\\_Against\\_Cyber-Physical\\_Attacks](https://www.researchgate.net/publication/327760995_Watching_and_Safeguarding_Your_3D_Printer_Online_Process_Monitoring_Against_Cyber-Physical_Attacks).
- [18] Kira. 3D printer and 3D printing news. [Online] 4. 12 2014. [Citace: 5. 11 2019.] <https://www.3ders.org/articles/20141204-new-emendo-software-automatically-repairs-errors-in-stl-3d-printing-files.html>.

- [19] Cadalyst. [Online] 3. 1 2019. [Citace: 5. 11 2019.]  
<https://www.cadalyst.com/%5Blevel-1-with-primary-path%5D/last-end-stl-sight-47151>.
- [20] Sedlák, Jan. Lupa. *Metal 3D: V raketové základně u Dobříše se za dotace rozjel 3D tisk z kovu*. [Online] 23. 6 2016. [Citace: 10. 11 2019.]  
<https://www.lupa.cz/clanky/metal-3d-v-raketove-zakladne-u-dobrise-se-za-dotace-rozjel-3d-tisk-z-kovu/>.
- [21] Materialise. [Online] [Citace: 10. 11 2019.]  
<https://www.materialise.com/en/software/magics/magics-24>.
- [22] Materialise. *Materialise Magics - User Manual*. Interní dokument.
- [23] EOS. *Školící materiály - EOS Basic training*. Interní dokumentace. Interní materiály.
- [24] Technický týdeník. Frézujeme inteligentně. *Technický týdeník*. [Online] 15. 9 2014. [Citace: 21. 11 2019.]  
[https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/frezujeme-inteligentne\\_26828.html](https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/frezujeme-inteligentne_26828.html).
- [25] Pavelka, Bc. Rudolf. Analýza vyměnitelných břitových destiček ze slinutých karbidů. *VUTBR*. [Online] 2010. [Citace: 27. 07 2020.]  
[https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=28233](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=28233).
- [26] Sandvik. *Sandvik coromant*. [editor] Přeložil M. Kudela. Praha : Scientia, s.r.o., 1997. Sv. 1. české vydání. ISBN 91-97 22 99-4-6.
- [27] Laudát, Vít. *Bakalářská práce - Tvorba technické části katalogu fréz*. Plzeň: Západočeská Univerzita v Plzni, 2017.
- [28] Bach, Pavel a Svoboda, Ondřej. MM Spektrum. *Frézování bez vibrací?* [Online] 12. 2 2014. [Citace: 21. 1 2020.]  
<https://www.mmspektrum.com/clanek/frezovani-bez-vibraci.html>.
- [29] Sandvik. Jak zvolit zubovou rozteč frézy. [Online] Sandvik. [Citace: 21. 11 2019.] <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/pages/how-to-choose-cutter-pitch.aspx>.
- [30] SECO. SECO. *SteadyLine Brochure*. [Online] [Citace: 24. 11 2019.]  
<https://usercontent.azureedge.net/Content/UserContent/Documents/021919.pdf>.
- [31] Štýs, Ing. Miloslav. *Využití uhlíkových kompozitů v oblasti řezných nástrojů a nástrojových upínačů*. Plzeň : Západočeská Univerzita v Plzni, 2016.
- [32] Komet. Komet. *3D-printed PCD milling cutters*. [Online] [Citace: 24. 11 2019.] [http://www.kometscandinavia.com/images/Komet\\_kataloger/1342CF11-9F85-4819-AD2A-17AF4F0A7AF9webspeed.dk.pdf](http://www.kometscandinavia.com/images/Komet_kataloger/1342CF11-9F85-4819-AD2A-17AF4F0A7AF9webspeed.dk.pdf).
- [33] Hamerník, Jan. Mgr. Jan Hamerník. [Online] 11. 11 2006. [Citace: 16. 12 2019.] <http://jhamernik.sweb.cz/obrabeni.htm>.
- [34] Řehoř, doc. Jan. *Teorie obrábění*, Západočeská Univerzita - Katedra technologie obrábění. *Podklady k předmětu Teorie Obrábění*. Plzeň : Západočeská Univerzita v Plzni.
- [35] Wikipedia. Wikipedia. *Root mean square*. [Online] 4 16, 2020. [Cited: 4 2020, 20.] [https://en.wikipedia.org/wiki/Root\\_mean\\_square?oldid=326409865](https://en.wikipedia.org/wiki/Root_mean_square?oldid=326409865).
- [36] Daniel Zuth, František Voleček. *Automa . časopis pro automatizační techniku*. [Online] 01 2010. [Citace: 08. 06 2020.] [https://automa.cz/cz/casopis-clanky/mereni-vibraci-ve-vibrodiagnostice-2010\\_01\\_40375\\_5744/](https://automa.cz/cz/casopis-clanky/mereni-vibraci-ve-vibrodiagnostice-2010_01_40375_5744/).
- [37] Vagenknecht, Radek. *Dvoukanálový měřič úrovně*. Pardubice : autor neznámý, 2016.
- [38] Tungaloy. *High feed milling cutter with strong inserts and cutter body for improved machining efficiency*. [Online] 10 2018. [Citace: 7. 1 2020.]  
<https://www.tungaloy.com/wp-content/uploads/403.pdf>.

- [39] Tumlikovo. Tumlikovo - metal cutting technologies. *Geometrie břitů fréz*. [Online] 2. 11 2010. [Citace: 9. 1 2020.] <http://www.tumlikovo.cz/geometrie-britu-frez/>.
- [40] EOS. EOS M 290. [Online] [Citace: 23. 1 2020.] <https://www.eos.info/eos-m290>.
- [41] RTI. Regionální Technologický Insitut - Hlavní vybavení. [Online] [Citace: 23. 1 2020.] <https://rti.zcu.cz/laboratore/obrabeni/vybaveni.html>.
- [42] 3R Systems. EOS M 290. [Online] [Citace: 23. 1 2020.] <http://www.3rsystems.cz/3d-tisk-kovu/eos-m290>.
- [43] RTI. *Interní materiály RTI*.

## Seznam obrázků

Obr. 1 Celé kolo Atherton Bikes (1).....	12
Obr. 2 Části rámu Atherton Bikes vyrobené AM (2).....	13
Obr. 3 Superauto Blade vyrobené AM (4).....	13
Obr. 4 Kladka v přehazovačce vyrobená AM (7).....	14
Obr. 5 Srdce vyrobené pomocí AM (8).....	14
Obr. 6 Přehled kovových prášků (10).....	15
Obr. 7 Schéma procesu výroby prášku (11).....	16
Obr. 8 Schéma metody water atomisation (11).....	17
Obr. 9 Schéma metody EIGA (11).....	18
Obr. 10 Schéma metody plasma atomisation (11).....	18
Obr. 11 Mechanické vlastnosti MS1 (12).....	19
Obr. 12 Tvrdost materiálu MS1 (12).....	19
Obr. 13 Postup při 3D tisku (16).....	20
Obr. 14 Princip funkce 3D tiskárny typu DMLS (9).....	20
Obr. 15 Model ve formátu .STL.....	21
Obr. 16 Průběh procesu výroby dílu pomocí AM (17).....	21
Obr. 17 Kvalitní 3D model.STL vlevo a nekvalitní 3D model.STL vpravo (18) (19).....	22
Obr. 18 Funkce podpor (20).....	22
Obr. 19 Podpory a orientace součásti (21).....	23
Obr. 20 Znázornění správného umístění součástí (23).....	23
Obr. 21 Odsazení paprsku (23).....	24
Obr. 22 Parametry tisku (23).....	24
Obr. 23 Průběh tisku.....	25
Obr. 24 Součásti na platformě obklopené kovovým práškem MS1.....	25
Obr. 25 Fréza po obrobení.....	26
Obr. 26 Ukázka vzorků po postprocessingu.....	26
Obr. 27 Úhel sklonu ostří, ortogonální úhel čela a úhel nastavení (26).....	27
Obr. 28 Axiální a radiální úhel čela (26).....	28
Obr. 29 Rozdělení geometrií fréz a) dvojitě pozitivní b) dvojitě negativní c) pozitivně-negativní (25).....	29
Obr. 30 Ostrý břit (25).....	29
Obr. 31 Zaoblený břit (25).....	30
Obr. 32 Břit s fazetou (25).....	30
Obr. 33 Zaoblený břit s fazetou (25).....	30
Obr. 34 Vznik nucených vibrací (28).....	31
Obr. 35 Přínos nerovnoměrné zubové mezery (29).....	32
Obr. 36 Účinek tlumícího systému (30).....	32
Obr. 37 Frézy Komet JEL® (32).....	33
Obr. 38 Oblasti vzniku tepla (34).....	34
Obr. 39 Teplotní pole při obrábění materiálu 12 050 břitem z SK (34).....	34
Obr. 40 Schéma testování.....	36
Obr. 41 Pohled na průhledný model frézy v SW Siemens NX.....	37
Obr. 42 Pohled na řeznou část frézy v SW Siemens NX.....	37
Obr. 43 Fréza 1.1 -Plná.....	38
Obr. 44 Fréza 1.2 - Dutá s práškem.....	38
Obr. 45 Fréza 1.3 - Spirála.....	38
Obr. 46 Fréza 1.4 - Vnitřní struktura Honeycomb.....	38
Obr. 47 Fréza 1.4 - Vnitřní struktura Honeycomb – Řez.....	38
Obr. 48 Postup výroby fréz.....	40

Obr. 49 Aparatura pro měření modální analýzy fréz .....	41
Obr. 50 Fréza zavěšená na pružném laně (obrázek je vůči realitě otočený o 90°) .....	41
Obr. 51 Upevnění vzorku při měření tlumících charakteristik .....	42
Obr. 52 Vibrometr Polytec PDV 100.....	55
Obr. 53 Polotovár.....	55
Obr. 54 Výsledky diplomové práce Miloslava Štýse: efektivní rychlost kmitání pro různé nástrojové sestavy a různé řezné podmínky (31).....	57
Obr. 55 Náčrt vzájemných pohybů frézy a obrobku (31) .....	59
Obr. 56 Vystředěný polotovár.....	60
Obr. 57 Odrazový pásek nalepený na Fréze 1.1 Plná .....	60
Obr. 58 Měření vibrací.....	61
Obr. 59 Efektivní hodnota (37).....	62
Obr. 60 Příklad časového záznamu opakovaného měření .....	63
Obr. 61 Příklad amplitudového spektra opakovaného měření.....	64
Obr. 62 Koherence signálu opakovaného měření .....	64
Obr. 63 Porovnání amplitudového spektra při volnoběhu a při obrábění.....	65
Obr. 64 Amplitudová spektra při obrábění pro standardní nástrojový upínač pro řezné podmínky č.7.....	65
Obr. 65 RMS hodnoty signálů při obrábění pro standardní nástrojový upínač pro řezné podmínky č.7.....	66
Obr. 66 Amplitudová spektra při obrábění pro kompozitní upínač při řezných podmínkách č.7 .....	66
Obr. 67 RMS hodnoty signálů při obrábění pro kompozitní upínač při řezných podmínkách č.7 .....	67
Obr. 68 Amplitudová spektra při obrábění pro standardní nástrojový upínač při řezných podmínkách č.14.....	67
Obr. 69 RMS hodnoty signálů při obrábění pro standardní nástrojový upínač při řezných podmínkách č.14.....	68
Obr. 70 Amplitudová spektra při obrábění pro kompozitní upínač při řezných podmínkách č.14 .....	68
Obr. 71 RMS hodnoty signálů při obrábění pro kompozitní upínač při řezných podmínkách č.14 .....	69
Obr. 72 Okrajové podmínky aplikované na model frézy – počet VBD v řezu $n = 2$ ks.....	71
Obr. 73 Zatížení Frézy 1.4 – Honeycomb; $n=2$ ks.....	72

## Seznam tabulek

Tab. 1 Základní vlastnosti nástroje .....	39
Tab. 2 Nástrojové upínače .....	40
Tab. 3 Vzorky s vnitřními tvary.....	43
Tab. 4 Vyhodnocení křivek tlumení fréz .....	46
Tab. 5 Vlastní frekvence fréz.....	48
Tab. 6 Verze testovaných nástrojových sestav .....	50
Tab. 7 Verze testovaných sestav .....	52
Tab. 8 Vlastní frekvence nástrojových sestav.....	52
Tab. 9 Házení fréz.....	54
Tab. 10 Řezné podmínky .....	54
Tab. 11 Řezné podmínky .....	56
Tab. 12 Kódované označení plánu experimentu.....	56
Tab. 13 Všechny měřené kombinace řezných podmínek .....	57
Tab. 14 Základní údaje o měření .....	62
Tab. 15 Testovací matice měření .....	63
Tab. 16 Souhrnný přehled získaných hodnot.....	71
Tab. 17 RMS pro řezné podmínky č.7.....	73

## Seznam grafů

Graf 1 Verze testovaných nástrojových sestav .....	42
Graf 2 Čas utlumení kmitání vzorků.....	44
Graf 3 Plný vs. Honeycomb.....	45
Graf 4 Plný vs. Spirála .....	45
Graf 5 Tlumicí charakteristika Frézy 1.2 v porovnání s ocelovou frézou .....	46
Graf 6 Tlumicí charakteristika ocelová fréza vs. kompozitní fréza .....	47
Graf 7 Poměr tuhostí fréz.....	48
Graf 8 Frekvenční charakteristika ocelová fréza vs. Fréza 1.3 – Spirála .....	48
Graf 9 Čas utlumení kmitání nástrojových sestav .....	49
Graf 10 Tlumicí charakteristika sestava A vs. K .....	50
Graf 11 Tlumicí charakteristika sestava A vs. D .....	51
Graf 12 Poměr tuhostí nástrojových sestav .....	52
Graf 13 Frekvenční charakteristika Sestavy A a E .....	53
Graf 14 Frekvenční charakteristika Sestavy A a B .....	53
Graf 15 Porovnání kmitů nástrojových sestav A a D .....	69

## Použitý software

Siemens NX  
PulseLabShop  
Microsoft Office  
Labview



## **Seznam příloh**

- Příloha č. 1: Protokoly měření geometrických přesností frézy
- Příloha č. 2: Tlumící charakteristika vzorků s vnitřními tvary
- Příloha č. 3: Tlumící charakteristika fréz
- Příloha č. 4: Frekvenční charakteristika fréz
- Příloha č. 5: Tlumící charakteristika nástrojových sestav
- Příloha č. 6: Frekvenční charakteristika nástrojových sestav
- Příloha č. 7: Vlastní kmity nástrojových sestav

## **Příloha č. 1**

### **Protokoly měření geometrických přesností frézy**

**Zkušební protokol**

1 / 1

»genius Standard«

23.6.2020

Uživatel

zoller

10:32:01



Ident-č. Fr\_D20\_1.1

Ozn. \_\_\_\_\_

Komentář \_\_\_\_\_

Zkušební technik \_\_\_\_\_

SVýsledek	Mod.	Požad.hodn.	-l. tol.	S. tol.	Skut.hodn.	Rozd.hodn.	Tolerance
2 Délka	RD	-1,563			-1,563	0,000	
2 Průměr					19,956		
3 Obvodové házení		0,000			0,041	0,041	
4 Čelní házení		0,000			0,017	0,017	
5 Úh. dělení rel.					90,14		
5 Úh. dělení rel.					89,73		
5 Úh. dělení rel.					89,93		

Všechny jednotky délky v Milimetr, všechny jednotky úhlu v Stupně decimálně

aaa

Tel. +49-7144-8970-0 - Fax +49-7144-8060807 - post@zoller.info - www.zoller.info

**Zkušební protokol**

1 / 1

»genius Standard«

23.6.2020

Uživatel

zoller

10:44:21



Ident.-č. Fr\_D20\_DP

Ozn. 1.2

Komentář

Zkušební technik \_\_\_\_\_

SVýsledek	Mod.	Požad.hodn.	-l. tol.	S. tol.	Skut.hodn.	Rozd.hodn.	Tolerance
2 Délka	RD	-1,563			-1,563	0,000	
2 Průměr					19,935		
3 Obvodové házení		0,000			0,083	0,083	
4 Čelní házení		0,000			0,045	0,045	
5 Úh. dělení rel.					89,88		
5 Úh. dělení rel.					90,03		
5 Úh. dělení rel.					90,15		

Všechny jednotky délky v Milimetru, všechny jednotky úhlu v Stupně decimálně

aaa

Tel. +49-7144-8970-0 - Fax +49-7144-8060807 - post@zoller.info - www.zoller.info

## Zkušební protokol

1 / 1

»genius Standard«

29.6.2020

Uživatel

zoller

12:28:53



Ident.-č. Fr\_D20\_DP

Ozn. HSS

Komentář

Zkušební technik \_\_\_\_\_

SVýsledek	Mod.	Požad.hodn.	I. tol.	S. tol.	Skut.hodn.	Rozd.hodn.	Tolerance
2 Délka	RD	-1,563			-1,563	0,000	
2 Průměr					20,037		
3 Obvodové házení		0,000			0,022	0,022	
4 Čelní házení		0,000			0,021	0,021	
5 Úh. dělení rel.					89,91		
5 Úh. dělení rel.					90,07		
5 Úh. dělení rel.					89,99		

Všechny jednotky délky v Milimetru, všechny jednotky úhlu v Stupně decimálně

aaa

Tel. +49-7144-8970-0 - Fax +49-7144-8060807 - post@zoller.info - www.zoller.info

## Zkušební protokol

1 / 1

»genius Standard«

29.6.2020

Uživatel

zoller

12:35:31



Ident.-č. Fr\_D20\_DP

Ozn. Kompozit

Komentář

Zkušební technik \_\_\_\_\_

SVýsledek	Mod.	Požad.hodn.	I. tol.	S. tol.	Skut.hodn.	Rozd.hodn.	Tolerance
2 Délka	RD	-1,563			-1,563	0,000	
2 Průměr					20,021		
3 Obvodové házení		0,000			0,040	0,040	
4 Čelní házení		0,000			0,015	0,015	
5 Úh. dělení rel.					89,96		
5 Úh. dělení rel.					90,22		
5 Úh. dělení rel.					90,04		

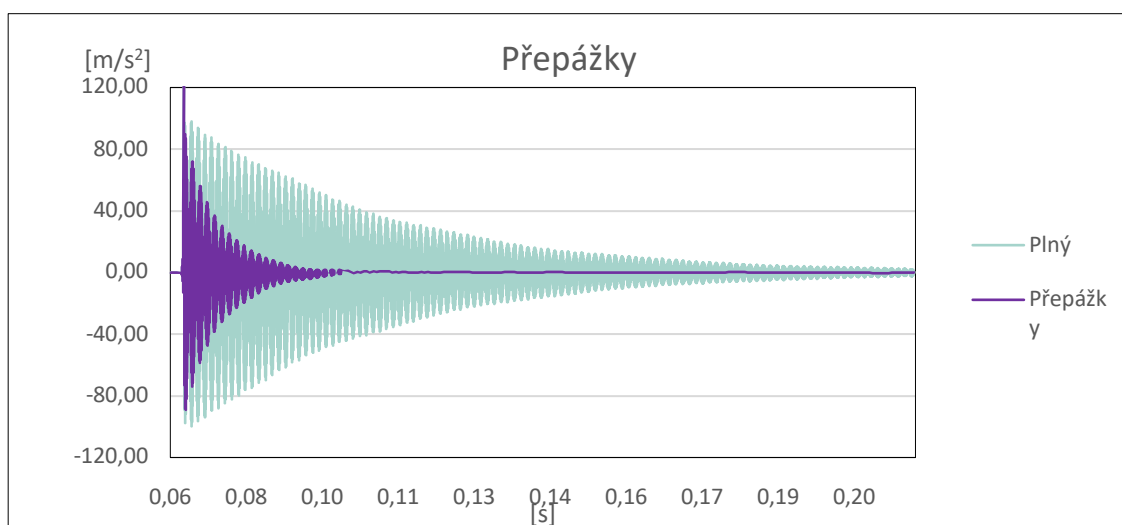
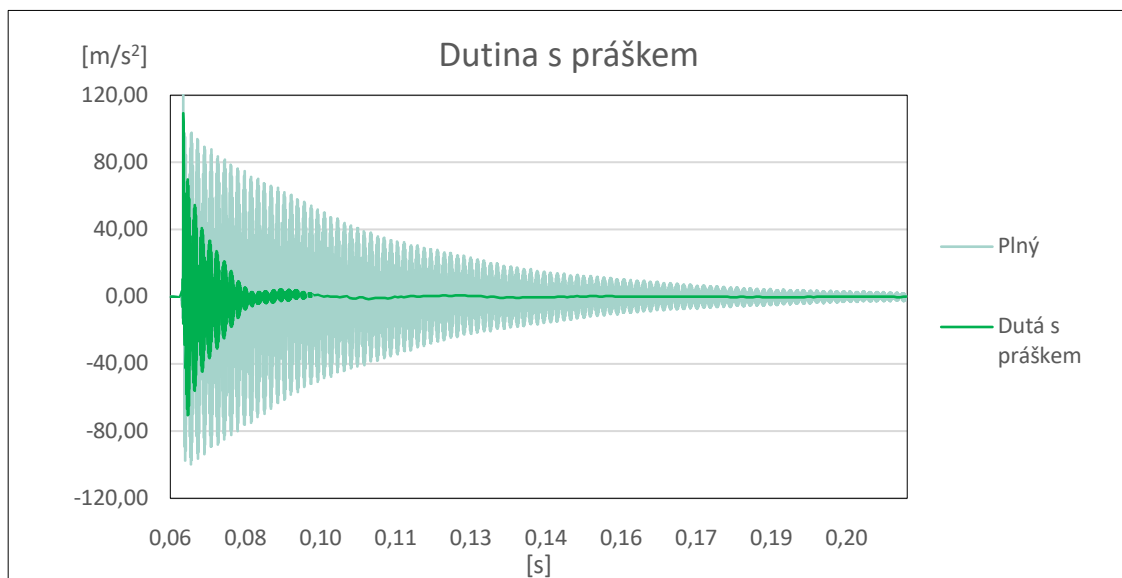
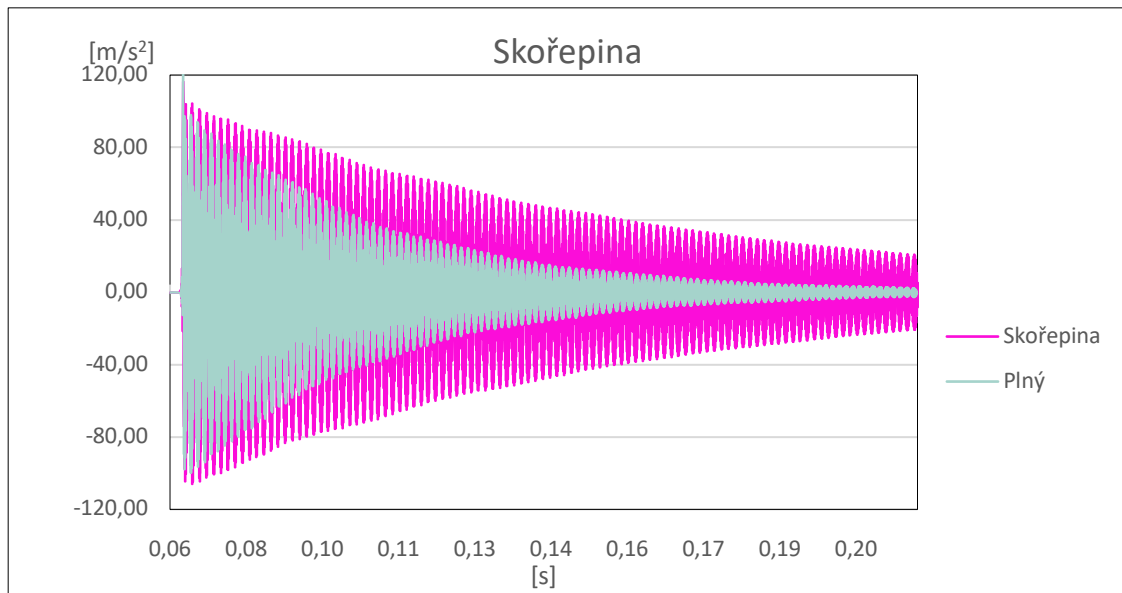
Všechny jednotky délky v Milimetru, všechny jednotky úhlu v Stupně decimálně

aaa

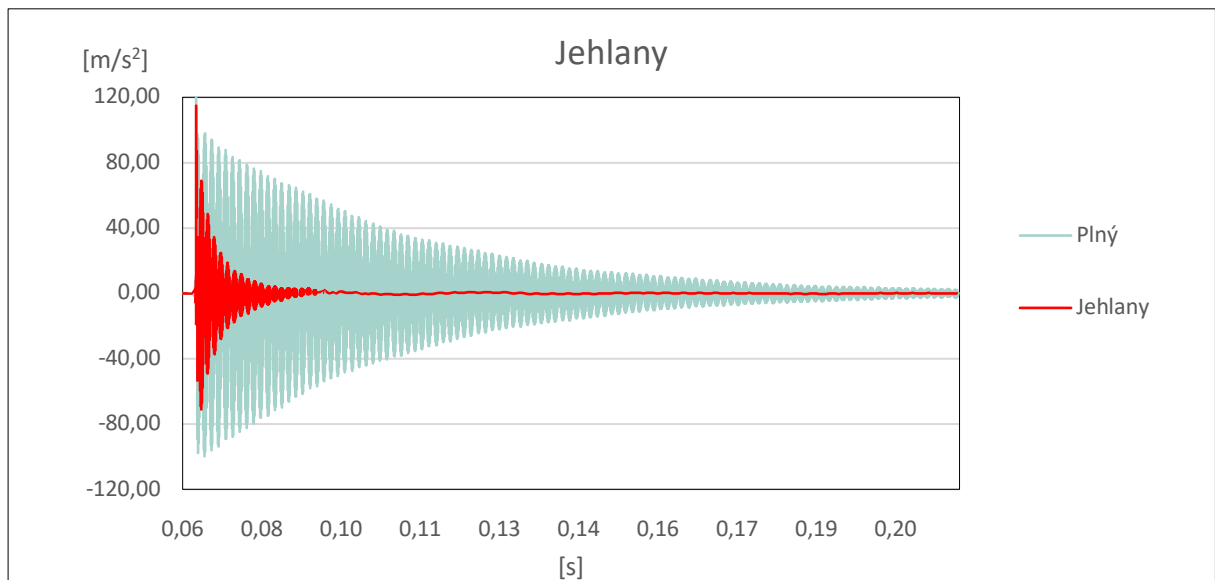
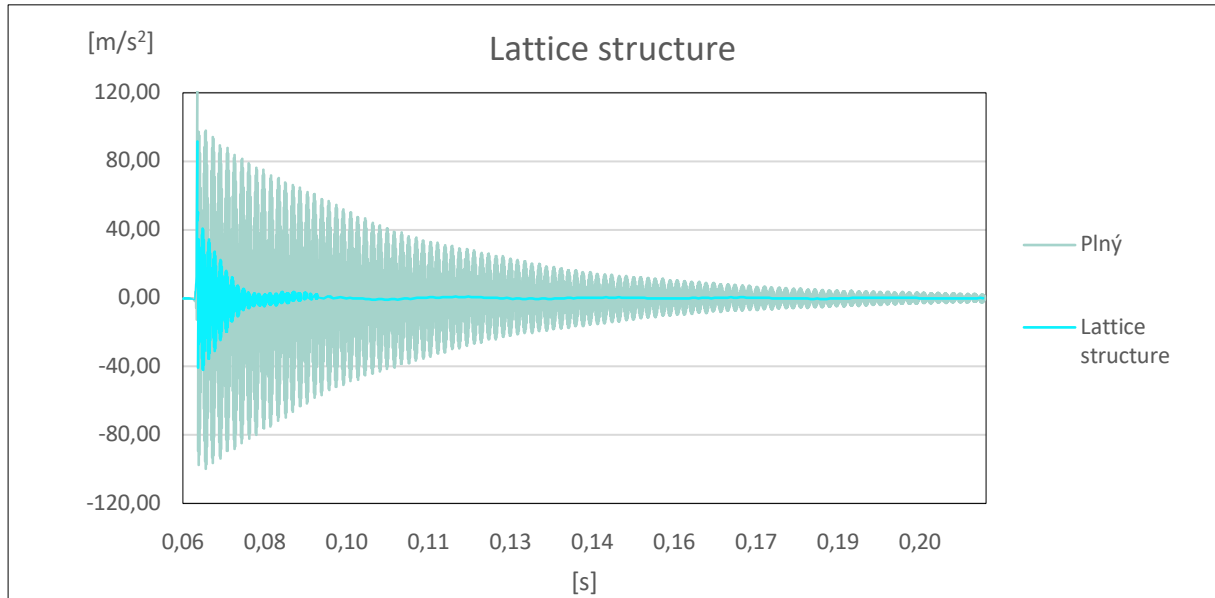
Tel. +49-7144-8970-0 - Fax +49-7144-8060807 - post@zoller.info - www.zoller.info

## **Příloha č. 2**

### **Tlumící charakteristika vzorků s vnitřními tvary**

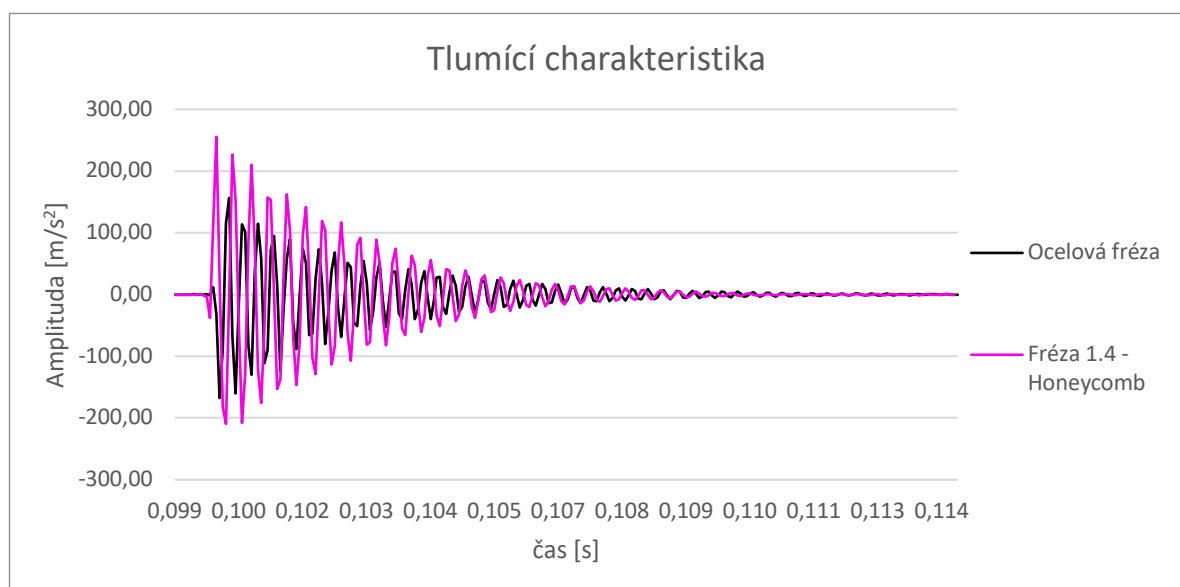
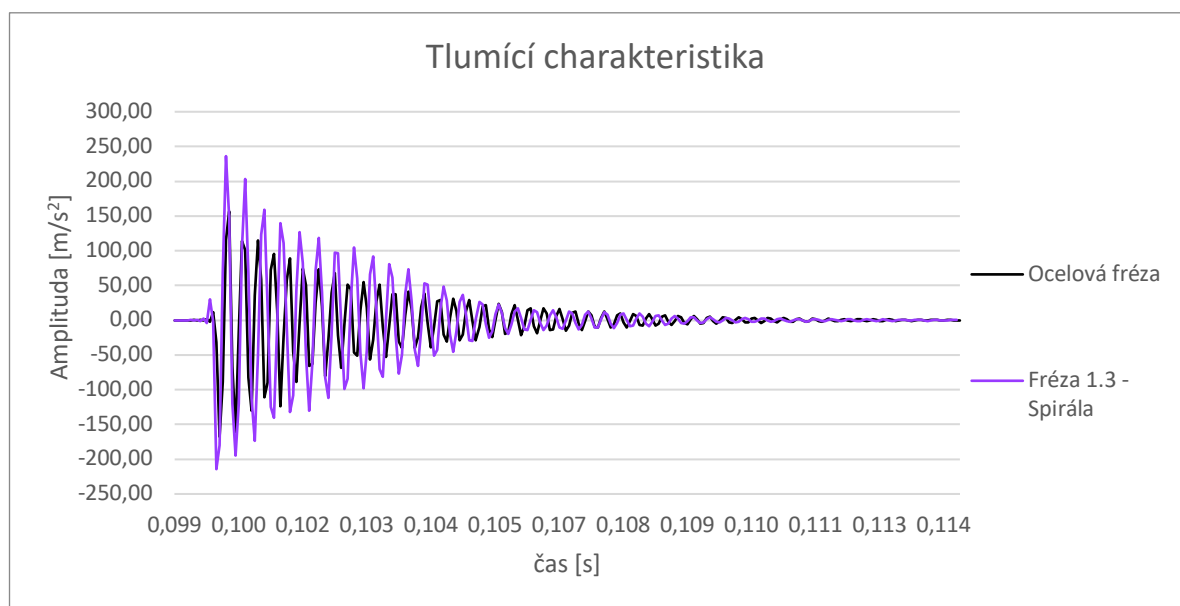
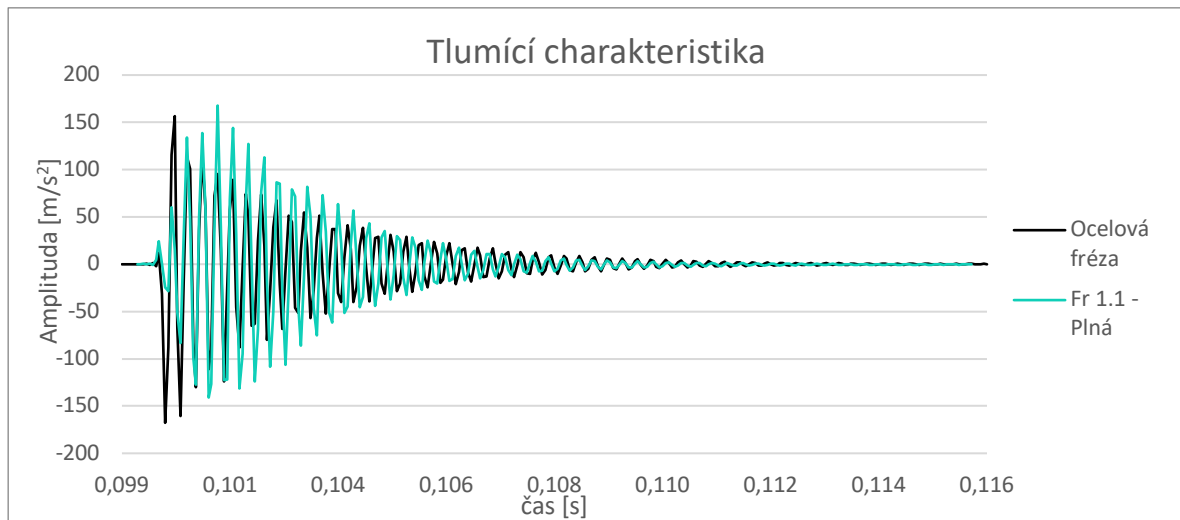






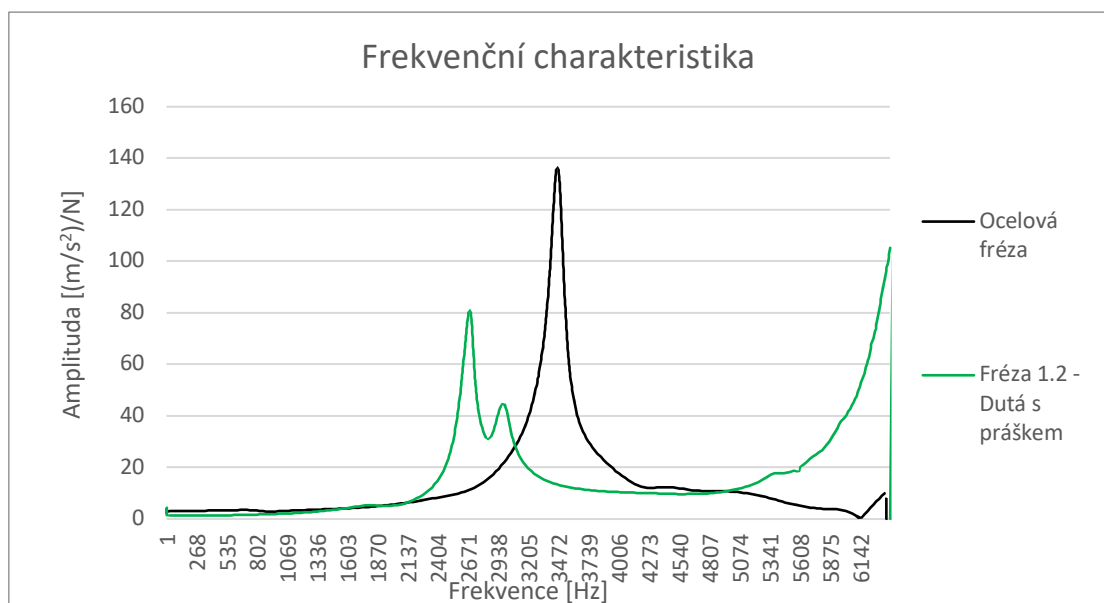
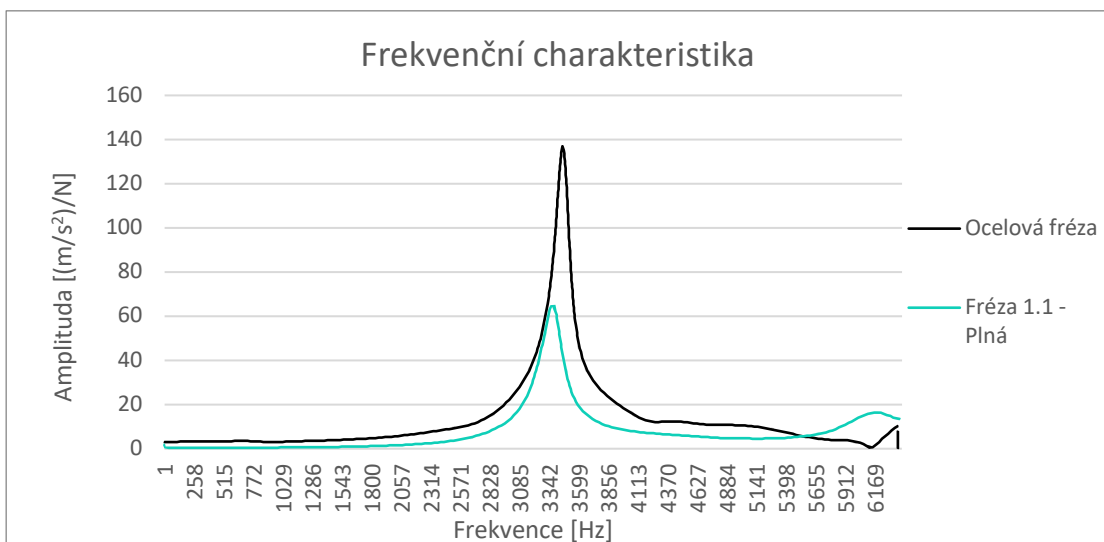
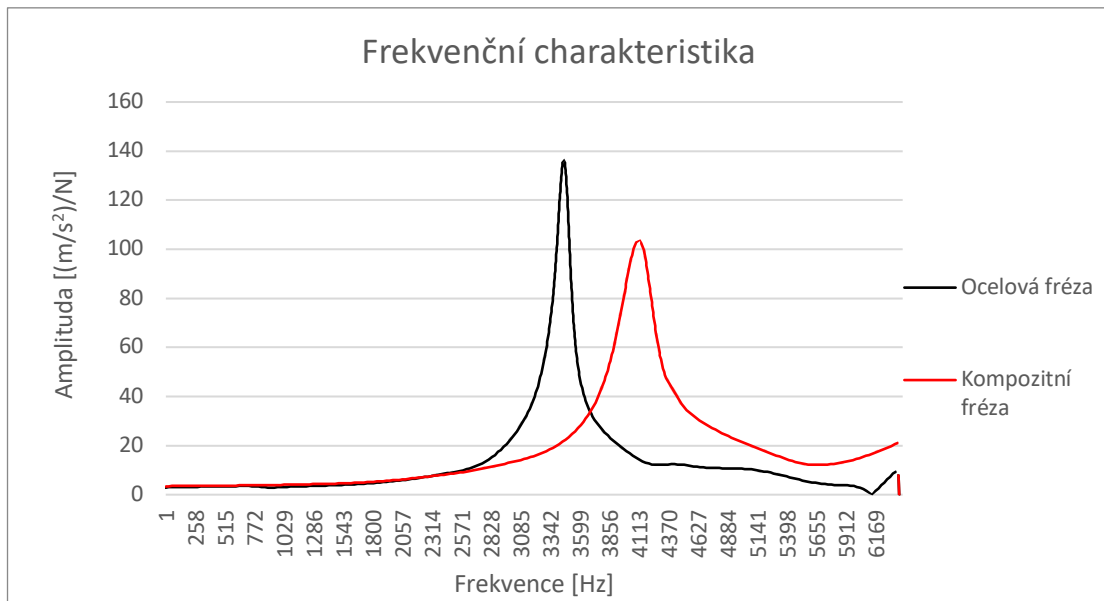
## **Příloha č. 3**

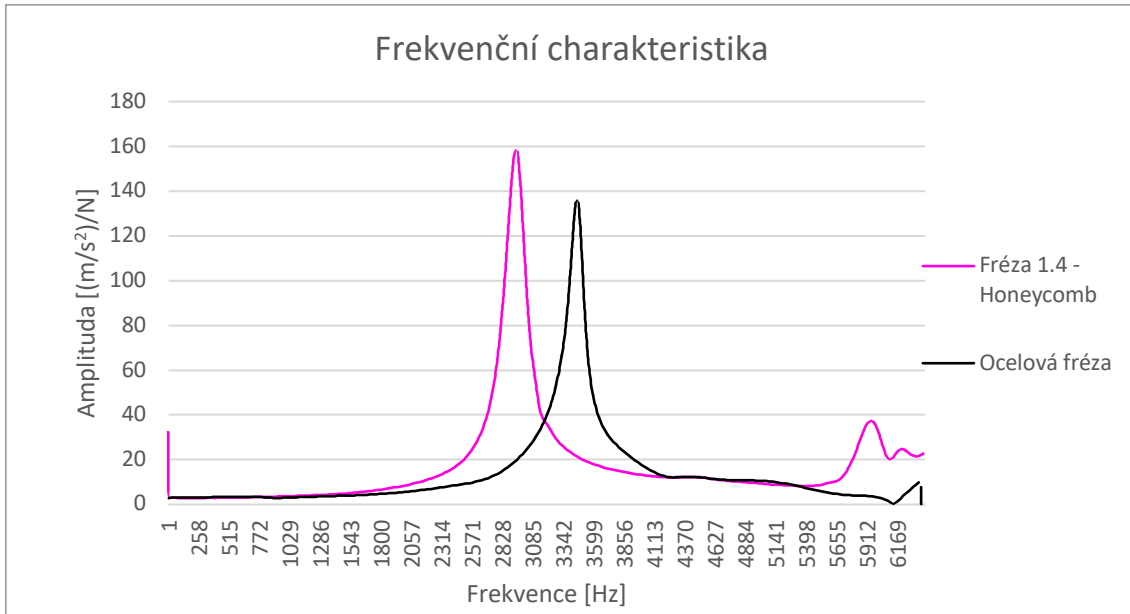
### **Tlumící charakteristiky fréz**



## **Příloha č. 4**

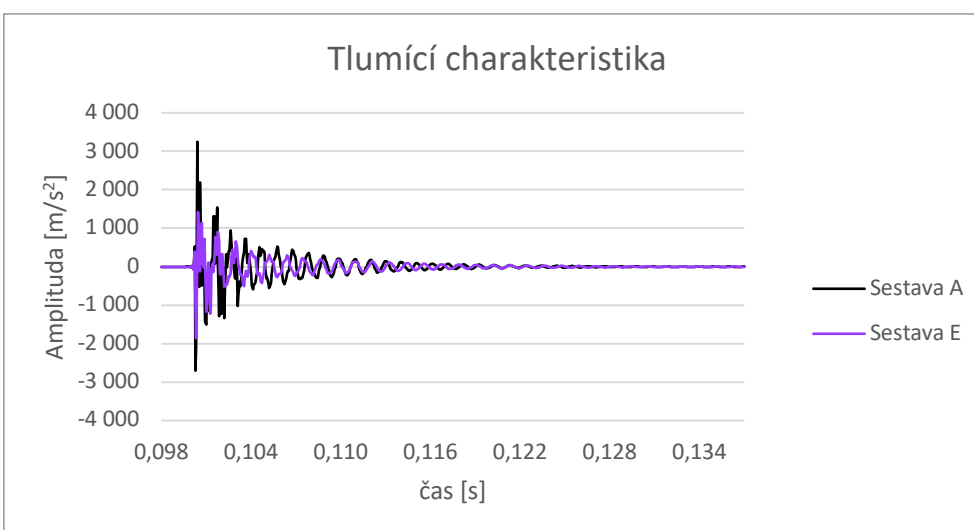
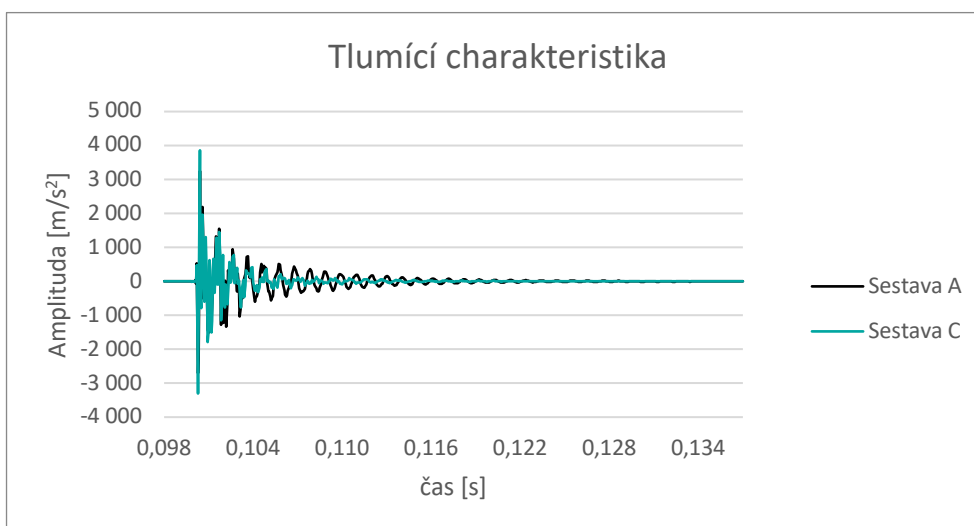
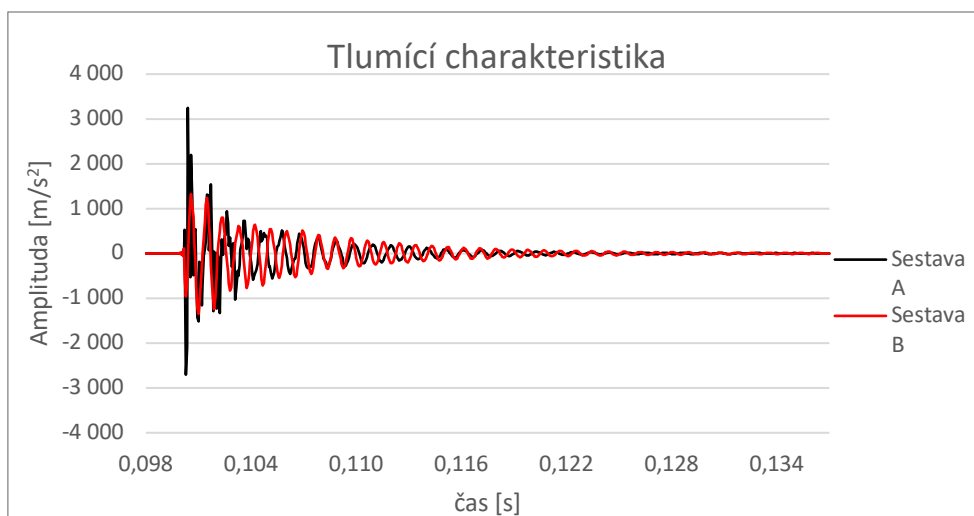
### **Frekvenční charakteristika fréz**



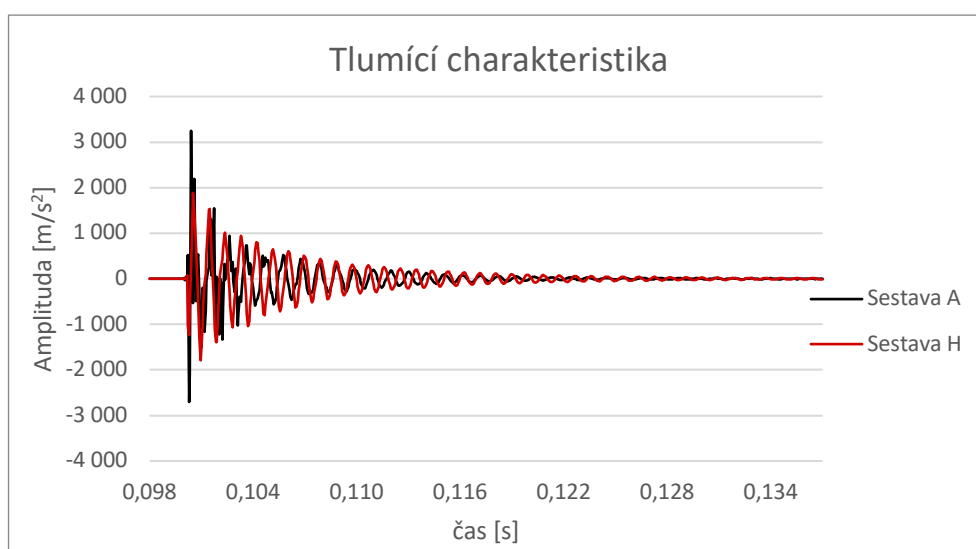
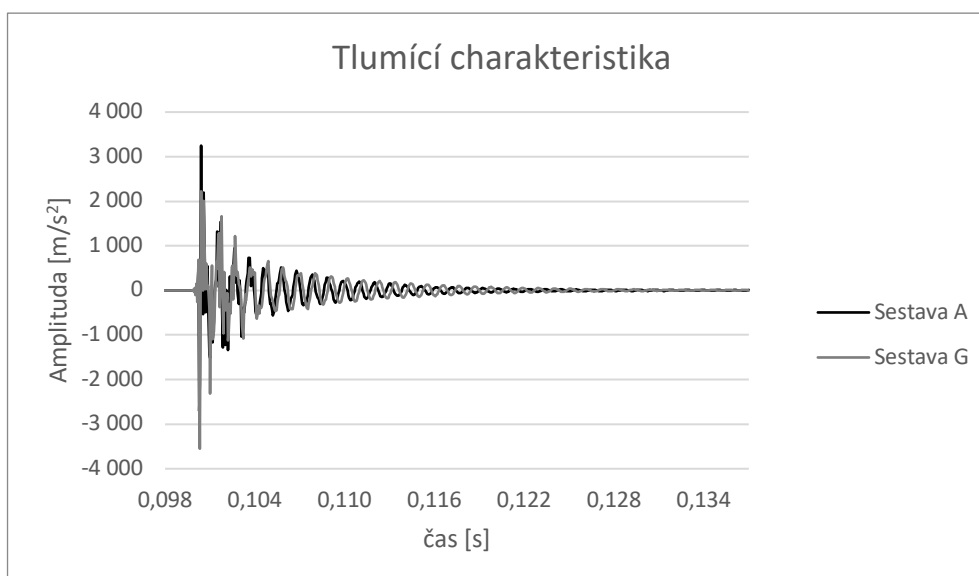
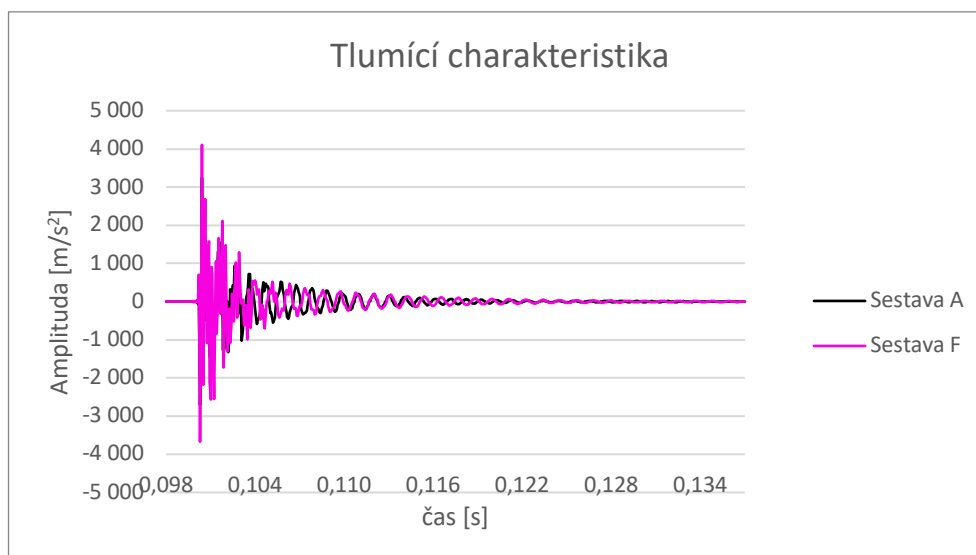


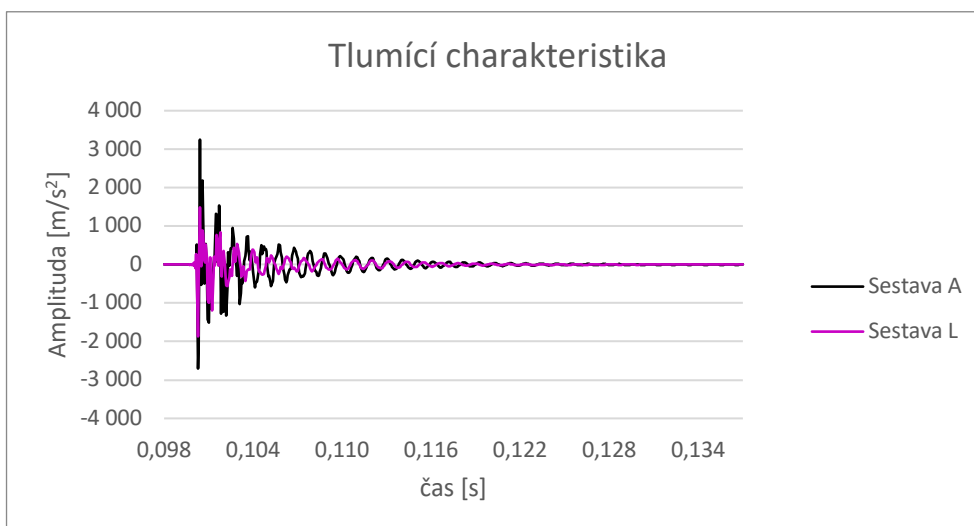
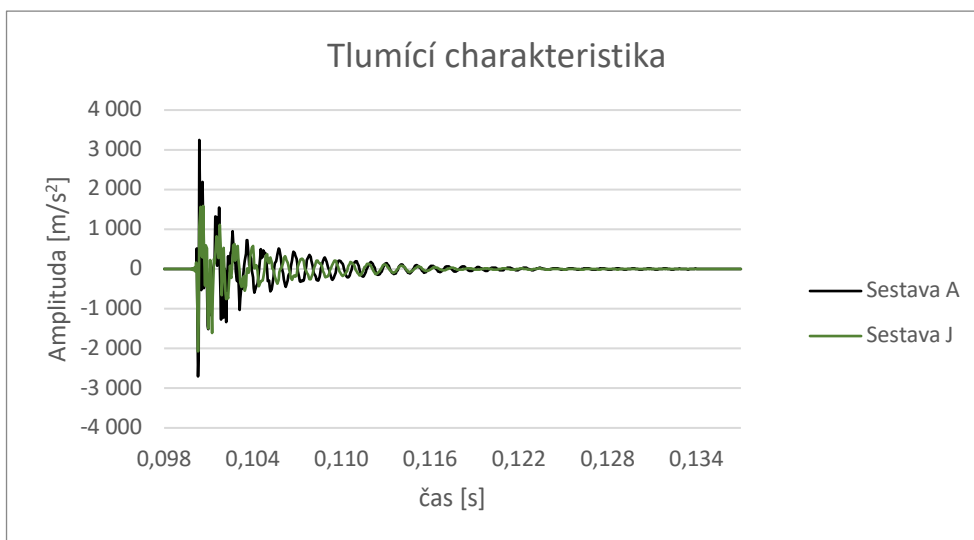
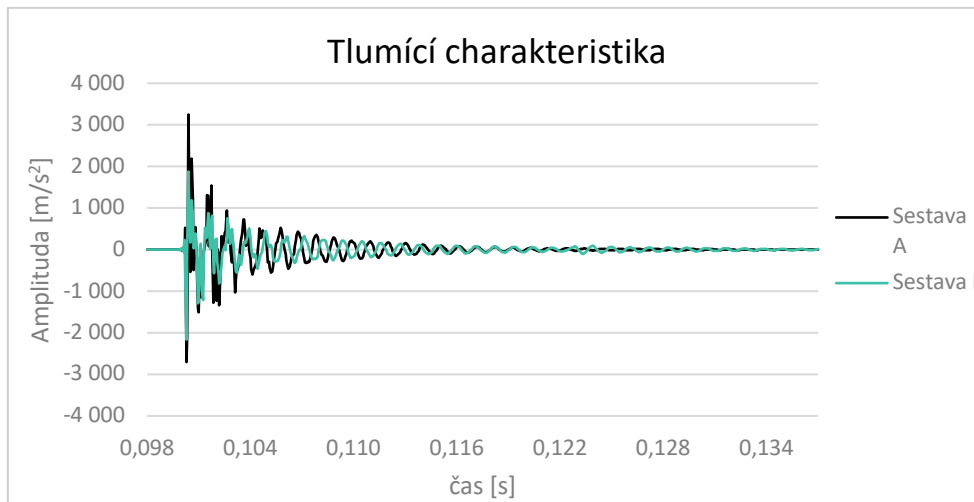
## **Příloha č. 5**

### **Tlumící charakteristika nástrojových sestav**



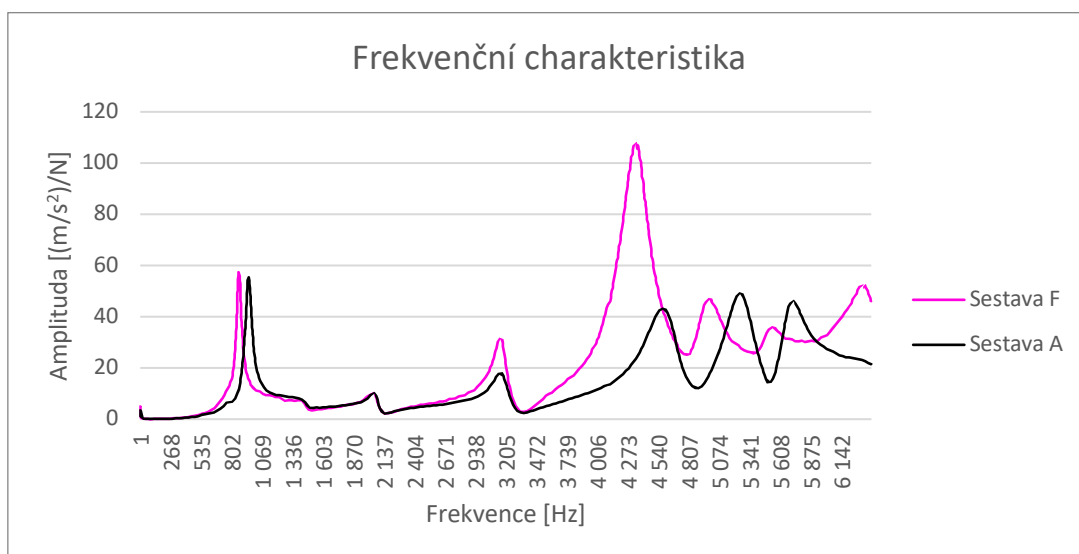
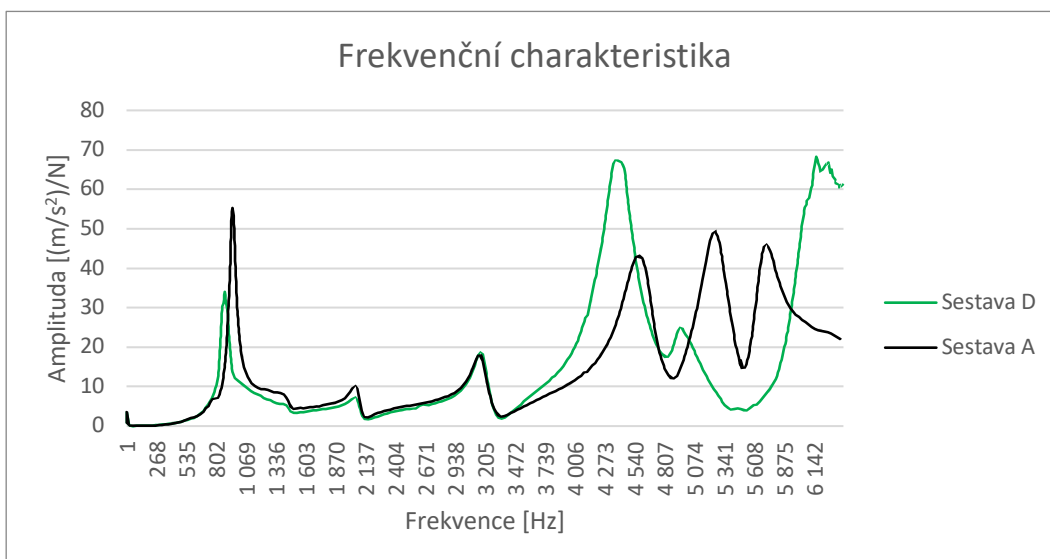
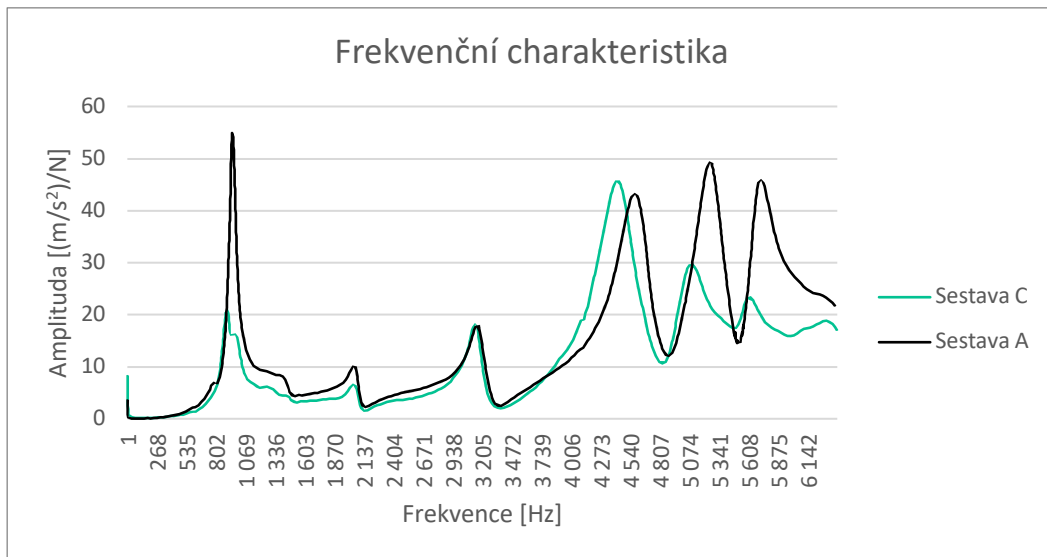


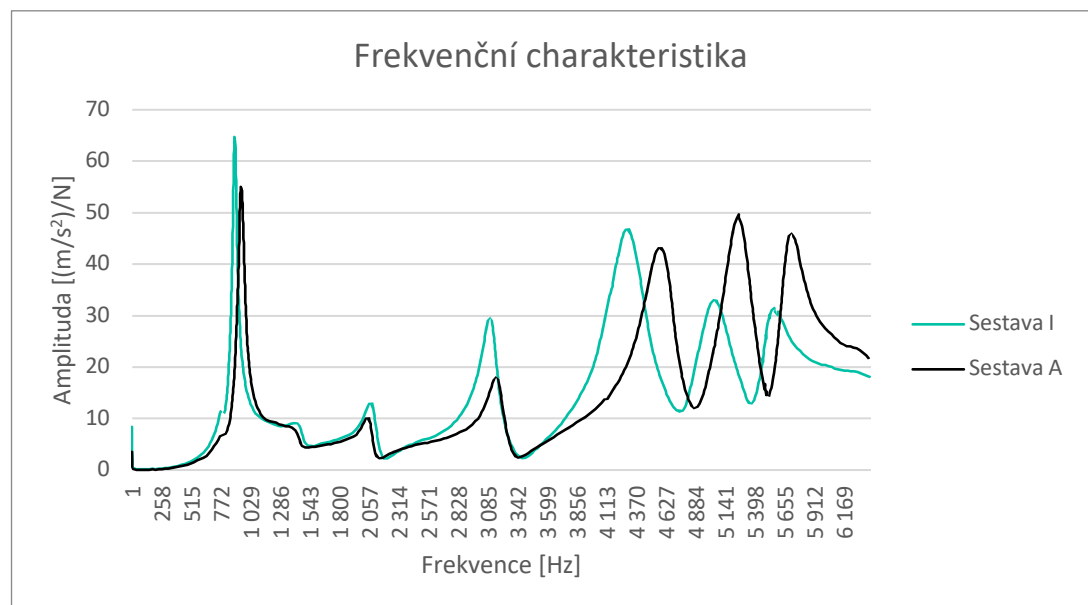
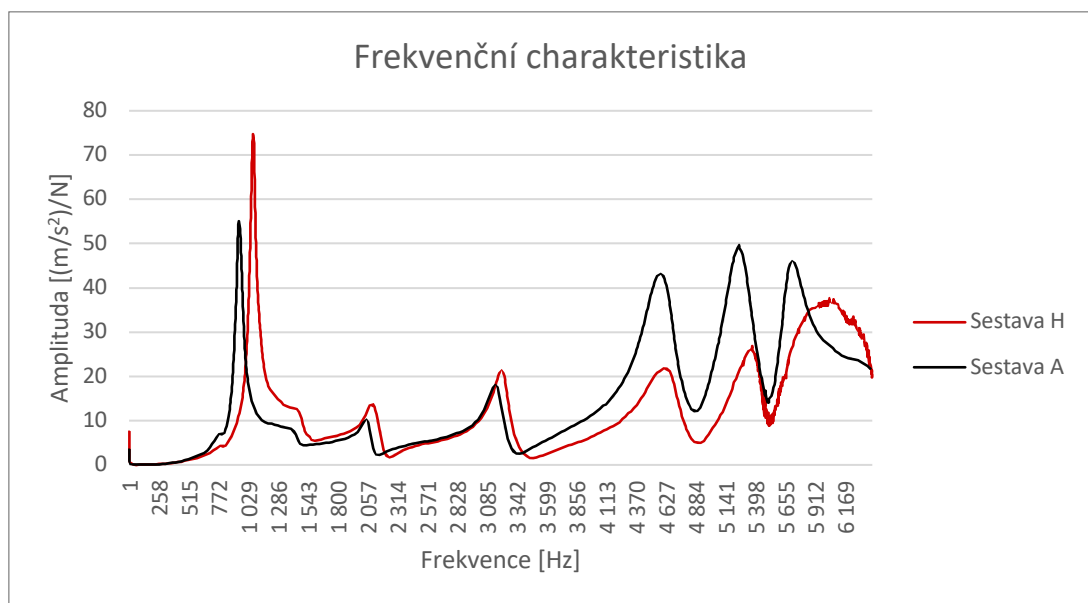
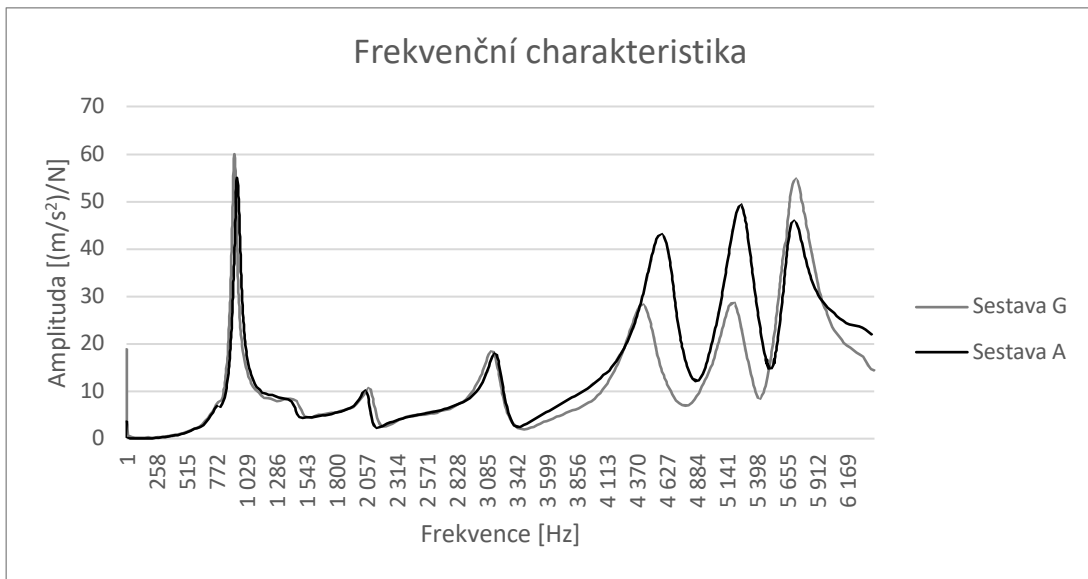


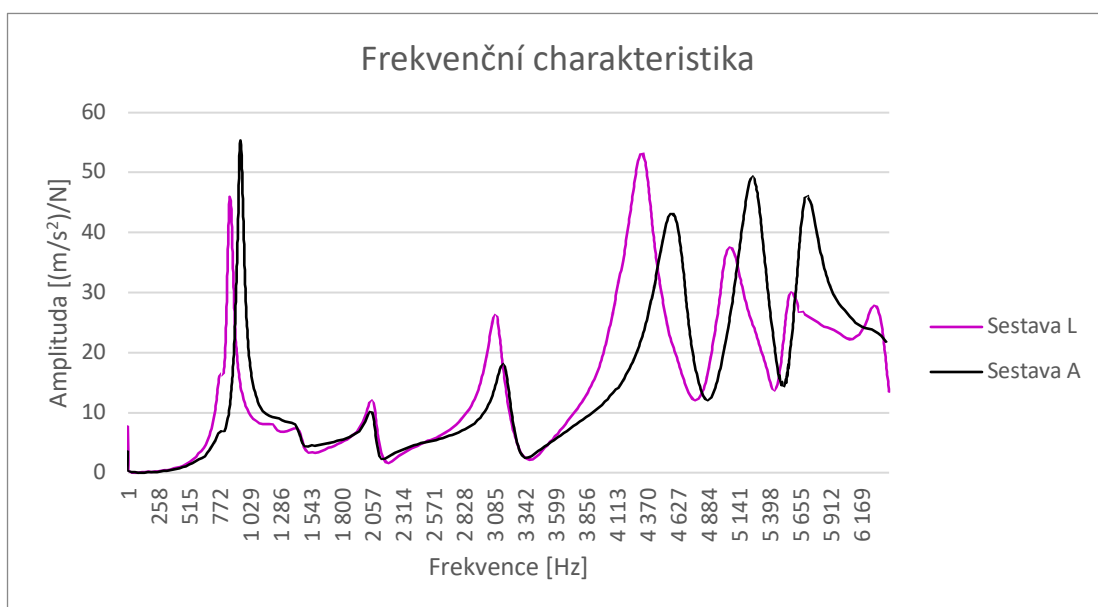
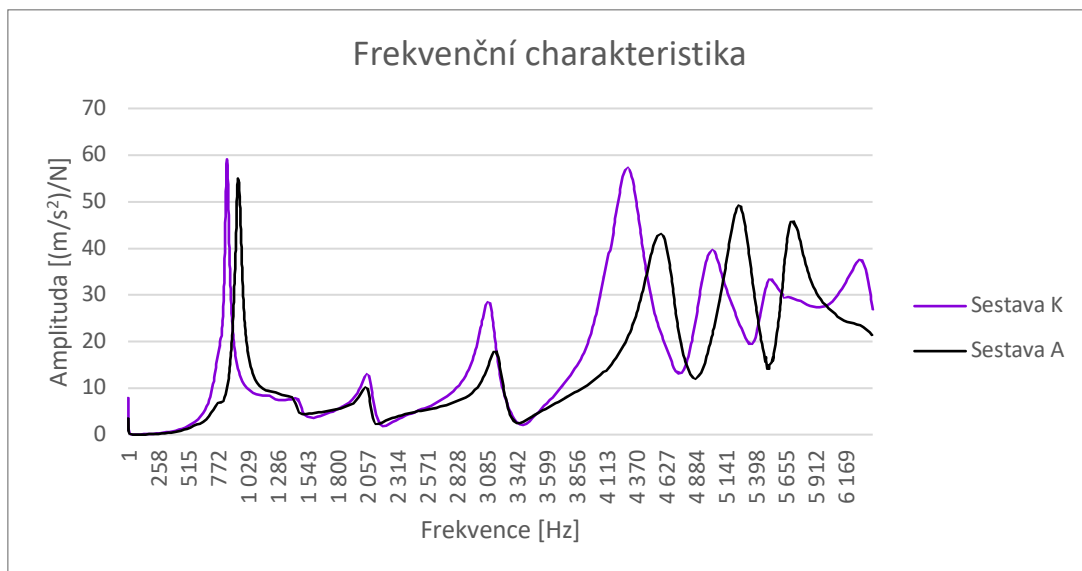
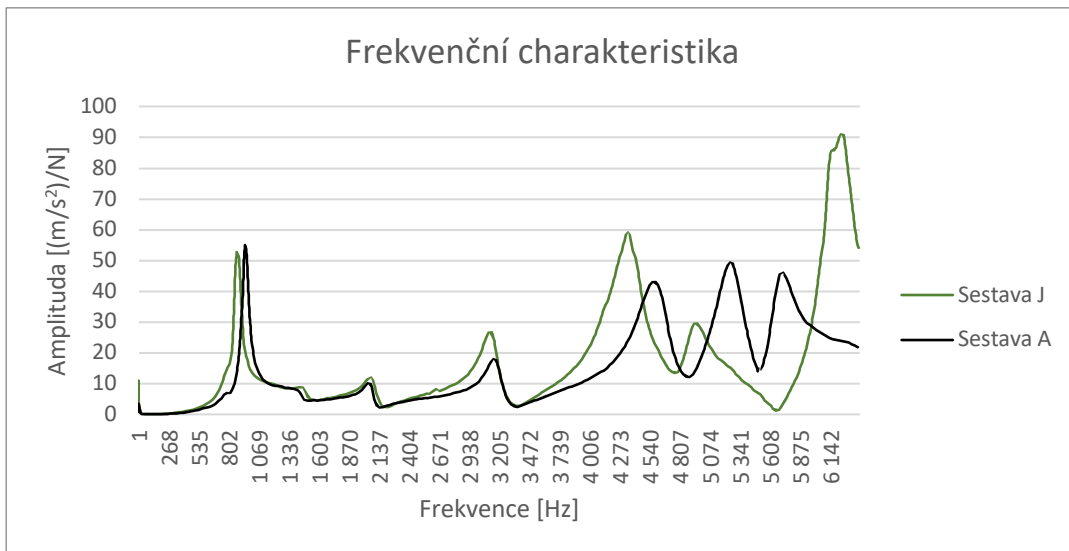


## **Příloha č. 6**

### **Frekvenční charakteristika nástrojových sestav**







## **Příloha č. 7**

### **Vlastní kmity nástrojových sestav**

