

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

**FAKULTA STROJNÍ**

Studijní program: Strojní inženýrství

Studijní zaměření: Strojírenská technologie-technologie obrábění

# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

Výhody snížené hmotnosti frézovací hlavy

Autor: Petr KUČERA

Vedoucí práce: Ing. Ivana ZETKOVÁ, Ph.D.

Akademický rok 2020/2021

## ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2020/2021

# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	<b>Petr KUČERA</b>
Osobní číslo:	<b>S20B0403P</b>
Studijní program:	<b>B0715A270013 Strojní inženýrství</b>
Studijní obor:	<b>Strojírenská technologie-technologie obrábění</b>
Téma práce:	<b>Výhody snížené hmotnosti frézovací hlavy</b>
Zadávací katedra:	<b>Katedra technologie obrábění</b>

## Zásady pro vypracování

1. Úvod
2. Rozbor současného stavu
3. Analýza současného řešení
4. Zhodnocení
5. Závěr

Rozsah bakalářské práce: **30 – 40 stran**  
Rozsah grafických prací: **dle potřeby**  
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

- Jak funguje 3D tisk metodou Direct Metal Laser Sintering [online]. [cit. 2018-12-17]. Dostupné z: <https://www.konstrukter.cz/jak-funguje-3d-tisk-metodou-direct-metal-laser-sintering/>
- Direct metal laser sintering [online]. [cit. 2018-12-17]. Dostupné z: <https://www.axisproto.com/materials/dmls/>
- Additive benefits for cutting tools [online]. [cit. 2019-01-11]. Dostupné z: <https://www.pesmedia.com/additive-benefits-cuttingtools/>
- ISCAR Enters the Age of Additive Manufacturing [online]. [cit. 2019-01-11]. Dostupné z: <http://iscar.co.nz/wordpress/iscaradditive-manufacturing/>
- Can Additive Manufacturing Increase Milling Feed Rates? [online]. [cit. 2019-01-11]. Dostupné z: <https://www.mmsonline.com/blog/post/can-additive-manufacturing-increase-milling-feed-rates>
- KOMET GROUP innovates cutting tools using metal 3D printing technolog [online]. [cit. 2019-01-11]. Dostupné z: <https://www.renishaw.com/en/komet-group-innovates-cutting-tools-using-metal-3d-printing-technology-42311>
- Additive Manufacturing Makes Subtractive Cutting Tools [online]. [cit. 2019-01-11]. Dostupné z: <https://www.additivemanufacturing.media/articles/additive-manufacturing-makes-subtractive-cutting-tools>
- Cutting Tool Made by Additive Manufacturing [online]. [cit. 2019-01-11]. Dostupné z: <http://www.freepatentsonline.com/y2016/0332236.html>
- Machining of thin-walled parts produced by additive manufacturing technologies [online]. [cit. 2019-01-11]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/82286904.pdf>

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Ivana Zetková, Ph.D.**  
Katedra technologie obrábění

Konzultant bakalářské práce: **Doc. Ing. Miroslav Zetek, Ph.D.**  
Regionální technologický institut

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2020**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **28. května 2021**

L.S.

---

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

---

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

V Plzni dne 15. října 2020

## Prohlášení

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

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

V Plzni dne: .....

.....

podpis autora

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval své konzultantce Ing. Ivaně Zetkové, Ph.D. za její čas a pomoc při tvorbě této bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Davidu Václavovi za rady k výpočtům práce, panu Ing. Michalu Křížkovi, PhD za korekci výpočtové části práce. Závěrem chci poděkovat celé své rodině a přátelům za velkou podporu, pomoc a trpělivost po celou dobu mého studia.

## ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	<b>Příjmení</b> Kučera	<b>Jméno</b> Petr	
<b>STUDIJNÍ PROGRAM</b>	B0715A270013 Strojní inženýrství		
<b>VEDOUcí PRÁCE</b>	<b>Příjmení (včetně titulů)</b> Ing. Zetková, PhD	<b>Jméno</b> Ivana	
<b>PRACOVISŤE</b>	ZČU – FST – KTO		
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<b>BAKALÁŘSKÁ</b>	<b>Nehodící se škrtněte</b>
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Výhody snížené hmotnosti frézovací hlavy		

<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KTO	<b>ROK ODEVZD.</b>	2021
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

### POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	47	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	35	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	0
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

<b>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</b>  <b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b>	Práce je zaměřena na frézy vyrobené aditivní technologií. Je zde popsán princip této technologie a také výhody a nevýhody takto vyrobených fréz oproti těm konvenčním, a to i na konkrétních výpočtech zatížení jednotlivých typů fréz. Bylo zjištěno, že odlehčená fréza ušetří zhruba 73 % výkonu motoru, což znamená podstatné snížení nákladů na energii. Výsledky práce mohou být použity v technologických firmách, které hledají levnější a efektivnější rezné nástroje.
<b>KLÍČOVÁ SLOVA</b>  <b>ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</b>	Aditivní technologie, 3D tisk, fréza, kraken, zatížení vřetena

## SUMMARY OF BACHELOR SHEET

<b>AUTHOR</b>	<b>Surname</b> Kučera	<b>Name</b> Petr	
<b>STUDY PROGRAMME</b>	B0715A270013 Mechanical Engineering		
<b>SUPERVISOR</b>	<b>Surname (Inclusive of Degrees)</b> Ing. Zetková, PhD	<b>Name</b> Ivana	
<b>INSTITUTION</b>	ZČU – FST – KTO		
<b>TYPE OF WORK</b>	<del><b>DIPLOMA</b></del>	<b>BACHELOR</b>	<b>Delete when not applicable</b>
<b>TITLE OF THE WORK</b>	Advantages of reduced milling head weight		

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	KTO	<b>SUBMITTED IN</b>	2021
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

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

<b>TOTALLY</b>	47	<b>TEXT PART</b>	35	<b>GRAPHICAL PART</b>	0
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

<b>BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	The work is focused on cutters made with additive technology. It describes the principle of this technology and also the advantages and disadvantages of such cutters compared to conventional ones, even on specific load calculations of individual types of cutters. It has been found that a lightweight cutter saves about 73% of engine power, which means a significant reduction in energy costs. The results of the work can be used in technology companies that are looking for cheaper and more efficient cutting tools.
<b>KEY WORDS</b>	Additive technology, 3D printing, cutter, kraken, spindle load

## Obsah

1	Úvod	10
2	Rozbor současného stavu	12
2.1	Spékání tavícím paprskem	12
2.1.1	Výrobní postup	12
2.2	Možnosti využití materiálů pro konstrukci řezných nástrojů	15
2.3	Přesnost a jakost dosahovaná při 3D tisku metodou DMLS	16
2.4	Výhody a nevýhody ve srovnání s konvenčními nástroji	16
2.5	Nejčastěji zkoumané aspekty vřetena	18
2.5.1	Start a brždění vřetene	18
2.5.2	Vyvažování	18
2.6	Frézy	19
2.6.1	Konvenční výroba	19
2.6.2	Nekonvenční výroba	20
3	Analýza současného řešení	25
3.1	Zatížení vřetene při brždění	25
3.1.1	Metodika výpočtu zatížení	25
3.1.2	Společné parametry pro výpočet obou fréz	25
3.1.2	Vlastní výpočet	26
3.1.2.1	Moment setrvačnosti fréz $M_B$	26
3.1.3.2	Potřebný výkon a energie motoru pro brždění vřetene	28
3.2	Zatížení vřetene při rozjezdu	29
3.2.1	Metodika výpočtu	29
3.2.2	Společné parametry pro výpočet obou fréz	29
3.2.3	Vlastní výpočet	29
3.2.3.1	Potřebný výkon a energie motoru pro start vřetene	30
3.2.3	Doplnění výsledků experimentu RTI	30
3.2.3.1.	Maximální zatížení vřetene – Kraken	30



4	Zhodnocení	33
	4.1 Výsledky a diskuse brždění	33
	4.2 Startovací energie jednotlivých typů fréz	35
5	Závěr	36
6	Zdroje	37
7	Přílohy	i
	7.1 Fyzikální vlastnosti pro konvenční frézu	i
	7.2 Fyzikální vlastnosti pro Krakena	v
	7.3 Fyzikální vlastnosti pro Sandwick CoroMill® 245	vii

## Seznam obrázků

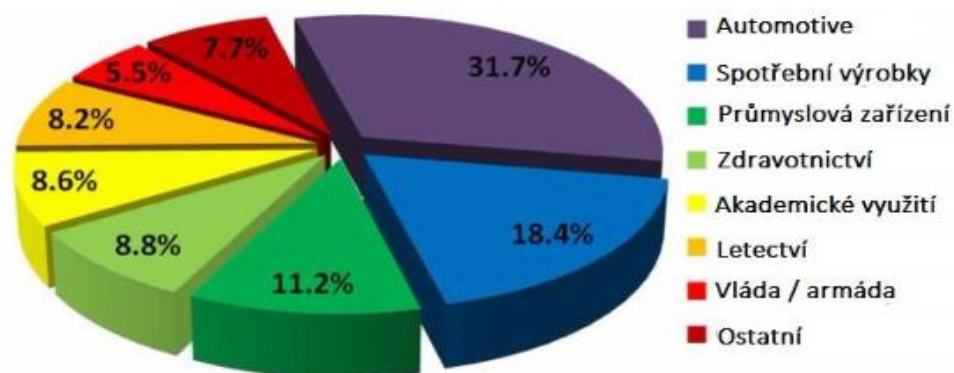
Obrázek 1:	Růst globálního výrobního trhu s aditivní technologií. [25]	11
Obrázek 2:	Proces nahrazení zakřivených ploch	13
Obrázek 3:	Schéma selektivního laserového spékání [3]	14
Obrázek 5:	Ukázka modelu tělesa frézy v SW Catia V5	20
Obrázek 6:	Frézovací hlava „Kraken“ [8]	21
Obrázek 7:	Speciálně odlehčená fréza porézními strukturami [9]	22
Obrázek 8:	Fréza vyrobená aditivní technologií firmou Komet [12]	23
Obrázek 9:	Fréza vyrobená aditivní technologií firmy LMT [22]	23
Obrázek 10:	Odlehčená fréza CoroMill 390 [35]	24
Obrázek 11:	CAD model Krakena s VBD destičkami (vlevo) a s příдавky na obrábění (vpravo)	27
Obrázek 12:	CAD model konvenční frézy z plného materiálu	27
Obrázek 13:	CAD model konvenční frézy z plného materiálu Sandwick CoroMill® 245	28

## Seznam tabulek

Tabulka 1:	Souhrn tolerancí 3D tisku	16
Tabulka 2:	Parametry pro frézování	26
Tabulka 3:	Výsledky prvního experimentu.	31
Tabulka 4:	Výsledky druhého experimentu.	31
Tabulka 5:	výsledek pro $f_z=0,2\text{mm}$ .	32
Tabulka 6:	výsledek pro $f_z=0,3\text{mm}$ .	32
Tabulka 7:	Souhrn vypočtených veličin	33

## 1 Úvod

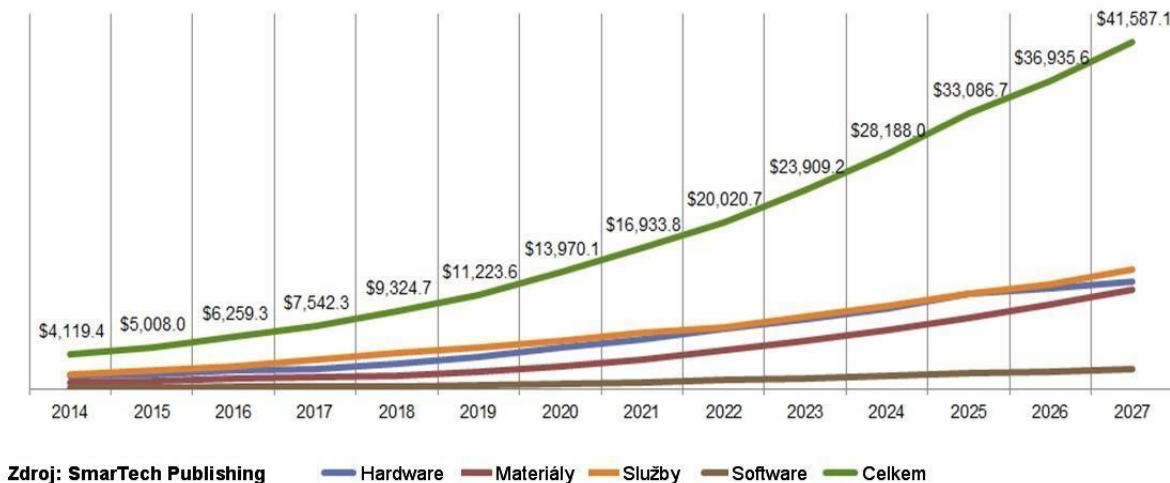
Není tomu tak dávno, kdy bylo možné vyrábět kovové a jiné díly pouze obráběním, tvářením nebo sléváním. V dnešní době už jsou k dispozici technologie Rapid Prototyping, kde je jednou z předních výhod rychlá a nákladově přijatelná výroba prototypů přímo z elektronických dat. Hlavní rozdíl oproti klasickým konvenčním metodám, jako je obrábění, kde se materiál ubírá z nějakého polotovaru, je, že tato metoda materiál neodebírá, ale naopak ho postupně vrství, tedy materiál přidává. Časem byla mezinárodní komisí přijata nová terminologie pro aditivní výrobu dílů, jenž se nyní označuje jako Additive Manufacturing (AM) [36].



Graf 1: Rozsah použití AM v různých oborech [23]

Protože se ve výše zmíněné technologii AM skrývá velký potenciál, zabývá se mnoho výrobců a institutů vývojem a vylepšováním této výrobní technologie. Na trhu se objevují výrobní systémy, které mají pracovní proces založený na metodě Selective Laser Sintering (SLS), jež výběrovým spékáním prášku aditivně staví díly. Další možností aditivní výroby z kovového prášku je Selective Laser Melting (SLM), kde při procesu výroby prášek nespéká, ale taví [1]. Existují však i jiné metody, které pro výrobu dílů nepoužívají kovové prášky. Příkladem je technologie Ultrasonic Consolidation Process, kde se vytváří díl z kovových listů, které jsou k sobě „natahovány“ za pomoci ultrazvukových vibrací pod tlakem a kovy jsou spojeny v pevném stavu narušením povrchových oxidových filmů mezi listy, tj. mechanismus svařování pomocí ultrazvuku [2].

### Celkový objem trhu s aditivní výrobou, rozděleno podle odvětví, zahrnutý všechny technologie v profesionální sféře 2014-2027(e)



Obrázek 1: Růst globálního výrobního trhu s aditivní technologií [25].

V budoucnosti se počítá s tím, že se ve větší míře rozšíří AM a částečně nahradí klasické metody výroby, proto se jejich problematice věnuje i tato bakalářská práce.

Práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část. Cílem teoretické části je provést rozbor současného stavu, popsat možnosti využití AM pro výrobu rezných nástrojů, především fréz, a porovnat frézy vyrobené pomocí aditivní technologie s těmi vyrobenými konvenční metodou, především popsat výhody a nevýhody oproti těmto konvenčním frézám. Cílem praktické části je ověřit tyto výhody fréz vyrobených pomocí AM na konkrétních příkladech.

## 2 Rozbor současného stavu

### 2.1 Spékání tavícím paprskem

V současné době je na trhu několik firem zabývajících se právě výrobou dílů pomocí spékání laserovým paprskem. Mezi nejznámější firmy patří například Arcam, EOS, 3D Systems a Laser Engineered Net Shaping (LENS), které využívají technologie, jako je například Electron Beam Melting (EBM), Direct Metal Laser Sintering (DMLS) a Direct Metal Selective Laser Melting (SLM). Předchozí zmíněné technologie jsou typickým představitelem Additive Manufacturing a umožňují rychlou a automatickou výrobu 3D dílů z kovového prášku.

#### 2.1.1 Výrobní postup

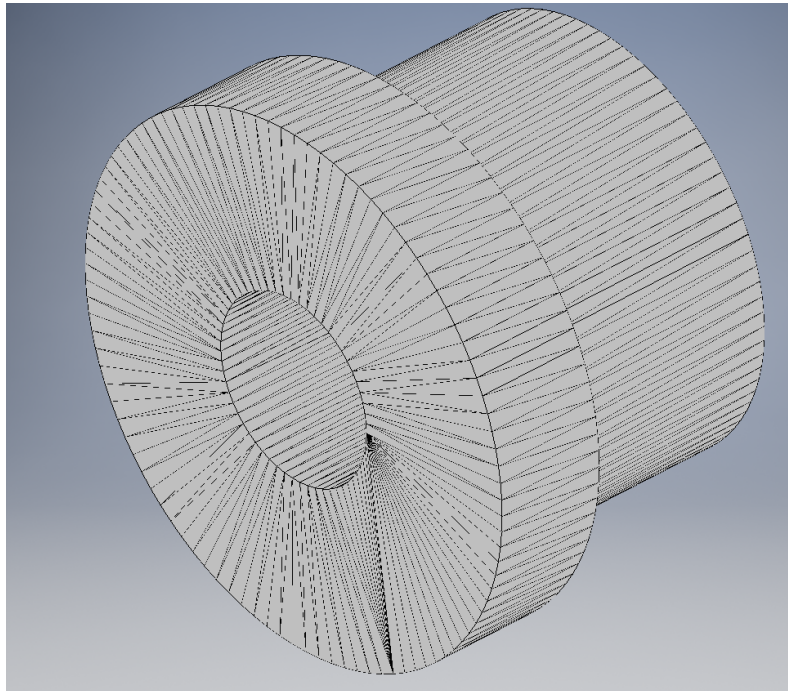
Při výrobě součásti se výrobní postup může u jednotlivých metod výroby lišit, ale platí tyto kroky:

##### 1) CAD

Všechny části AM musí začít od softwarového modelu. Zde je možno použít profesionální CAD softwary, ve kterých se model navrhne. Příkladem profesionálního CADu je například software NX od firmy Siemens. Velkou výhodou je, že technologie 3D tisku nepotřebuje speciální drahý software, ale vystačí si s většinou běžně používaných 3D modelářů, jako jsou například open-source program Blender či OpenSCAD, které jsou zdarma jak pro komerční, tak nekomerční využití.

##### 2) Převod na STL

Téměř každé zařízení AM akceptuje vstupní data ve formátu STL (Stereolithography) a téměř každý CAD (Computer Aided Design) systém umí takový formát vygenerovat. Tento formát souboru popisuje vnější uzavřené plochy původního CAD modelu a zakřivené plochy jsou nahrazeny trojúhelníky (TIN – Triangular Irregular Network). Trojúhelníky jsou v souboru popsány pomocí normálového vektoru, který směřuje z tělesa ven pomocí tří vrcholů.



Obrázek 2: Proces nahrazení zakřivených ploch

### 3) Manipulace s STL souborem a přenos na zařízení

STL soubor popisující model musí být zpracován v softwaru (např. Magics), ve kterém se připravují data pro tisk. Na zařízení je potom možné ovlivňovat některé základní atributy souboru tak, že se nastavuje velikost, pozice a směr výstavby. Směr výstavby je velice důležitý krok výroby, neboť při volbě vhodné orientace musí být uvažovány výsledné mechanické vlastnosti, které jsou dány směrem jednotlivých vrstev. Dále se z tohoto kroku odvíjí objem a umístění podpor, které je potřeba vytvořit, například u převislých konců, vodorovných děr atd.

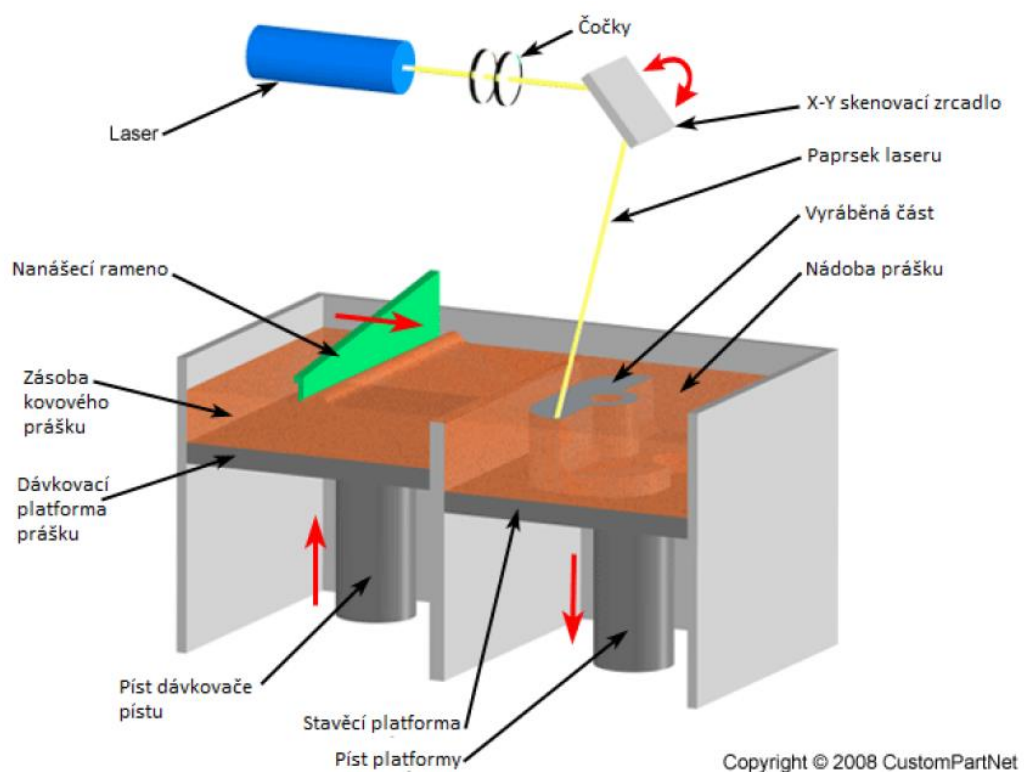
### 4) Nastavení zařízení

Zařízení AM musí být správně nastaveno před procesem výstavby (postupného stavění dílu z jednotlivých vrstev aditivní výrobou). Toto nastavení procesních parametrů se provádí v dalším softwaru (v našem případě EOSPRINT) – například materiálové omezení, výkon spékajícího paprsku, tloušťka vrstvy, časování atd.

### 5) Výroba

Na začátku výroby dochází k nanášení několika vrstev podpůrného materiálu, který má významnou funkci při tisku z důvodu odvodu tepla, jednoduššího oddělení součásti od pracovní desky a prevence poškození. Po vytvoření podpůrných struktur následuje samotná výroba

součástí. Ta spočívá v nanesení tenké vrstvy kovového prášku (obvykle mezi 20  $\mu\text{m}$  a 100  $\mu\text{m}$ ) na stavěcí platformu. Poté se prášek laserem speče do tvaru průřezu výrobku, který byl vygenerován z příčných řezů CAD modelu vždy pro konkrétní vrstvu. Zbýlý kovový prášek zůstává nespečen. Dalším krokem je posunutí platformy o přírůstek tloušťky vrstvy dolů a je nanášena nová tenká vrstva prášku. Vrstva je znovu vystavena paprsku a spečena v místech průřezu výrobku. Tento postup se opakuje tak, že každá následná spečená vrstva se přitavuje během procesu k předchozí vrstvě. Takto aditivně postavené kovové těleso po spečení obklopuje nespečený kovový prášek. Ten se dále recykluje a použije na další tisk [30].



Obrázek 3: Schéma selektivního laserového spékání [3].

## 6) Vyjmutí a očištění z platformy

Jakmile zařízení dokončí výstavbu, součást se odebere z pracovní komory. Systém uživatele pustí až tehdy, pokud je vypnutý laser a všechny části zařízení v komoře jsou v klidu a nekonají žádný pohyb. Dále je součást potřeba očistit od nespečeného materiálu.

## 7) Postprocessing

Po vyjmutí ze zařízení mohou díly vyžadovat množství dodatečných úprav, než budou připraveny k použití. Primárním krokem je odříznutí dílu z platformy například na pásové pile.

Poté následuje ruční odlamování podpor (pokud je součást má). U tvarově komplikovaných součástí se kvůli dokončování může doba výroby významně prodloužit. Mezi dokončovací úpravy patří operace (zejména pomocí konvenčního obrábění), při kterých dochází k úpravě konečné podoby povrchu součásti. Vytisknutý výrobek bývá zpravidla pro další použití hrubý, a proto je nutné provést na konci procesu například broušení či obrábění na požadovaný tvar a velikost, popřípadě jakost. Další možností je natavování, při kterém dochází ke snížení drsnosti povrchu. Tento krok se dá aplikovat pouze u materiálů, které teplem měknou [4].

## *2.2 Možnosti využití materiálů pro konstrukci řezných nástrojů*

S rostoucím zájmem o aditivní technologie byly vyhledávány nové materiály, kterými by bylo možné vyrobít plnohodnotné kovové díly do různých aplikací. V současné době je na trhu několik forem materiálů, které jsou vhodné pro aditivní technologii a vlastnostmi mohou konkurovat běžně používaným kovovým materiálům v konvenčních výrobních procesech. Ovšem řada dílů vyrobených aditivní technologií slouží spíše jako náhradní díly stávajících výrobků vytvořených klasickými výrobními postupy. Metoda DMLS je vhodná zejména tam, kde není třeba vyrábět velké množství stejnorodých dílů a s jejím využitím lze pružně reagovat na požadavky trhu nebo vytvářet optimalizované produkty dle přání zákazníka [5].

Nástroje pro obrábění kovů jsou typicky vyrobeny ze slinutého karbidu wolframu nebo jiného vhodného materiálu, jako je PCD, PcBN, rychlořezná ocel a jiné cermety. Zpevněné komponenty z karbidu wolframu se vyrábějí lisováním nebo vytlačováním směsi WC, Co a případně dalších materiálů. Výsledný produkt je pak sintrován tak, aby byl kompaktní a tavil prášek dohromady. Cementované karbidy jsou kovové matricové kompozity, které obsahují karbidy jednoho nebo více přechodných kovů jako tvrdé částice dispergované a cementované s pojivem například kobaltu, niklu nebo železa (nebo slitin těchto kovů). Tímto způsobem tvoří tvrdé částice dispergovanou fázi a pojivo tvoří kontinuální fázi. Slitiny karbidů nabízejí atraktivní kombinace pevnosti, houževnatosti a odolnosti proti otěru či erozi (tj. opotřebení) pro použití jako řezné nástroje, včetně například soustružených vložek a frézovacích vložek.

Existují různé typy a kombinace pevných částic využívaných pro řezné nástroje pro obrábění kovů na těžkoobrobitelných materiálech. Nejčastěji jsou používány titan a titanové slitiny, nikl a niklové slitiny, superslitiny, nerezové oceli a tvárné železo.

Technologie lisování a slinování nebo vytlačování a slinování omezuje konstrukci konečné součásti pouze na ty geometrie, které lze lisovat nebo vytlačovat. To může vést k různým nevýhodám; jednou z nich je často použití většího množství materiálu, než je potřeba k vytvoření komponenty. Vzhledem k vysoké ceně zpevněného karbidu wolframu je potřeba snížit jeho použití bez ohrožení kvality řezného nástroje nebo výkonu [7].

### 2.3 Přesnost a jakost dosahovaná při 3D tisku metodou DMLS

Tak jako s každou metodou 3D tisku, jsou i s metodou DMLS spojeny různé přesnosti a jakosti. Technologie DMLS se často kombinuje s tradičními výrobními postupy a jedná se o tzv. „hybridní koncepci“. Proces 3D tisku vytváří vysoce odolné, ale přitom jemné komponenty. Kvalita povrchu závisí na hrubosti práškového materiálu. Díly vyrobené technologií DMLS jsou totožné jako díly vyrobené z klasických kovových materiálů na klasických výrobních strojích, tyto díly se dají dále brousit, leštit, svařovat, tepelně zušlechťovat atd. Souhrn základních přesností a jakostí je vypsán v tabulce 1.

Vlastnost	Hodnota
Tloušťka vrstvy (vertikální rozlišení)	0,02–0,04 mm
Minimální tloušťka stěny modelu	0,4–0,6 mm
Přesnost výtisku	$\pm 0,1$ mm
Stupeň přesnosti IT	11
Povrch po výrobě ve stroji	Ra 4,5 až 6,5; ojedinele Ra 12,5

Tabulka 1: Souhrn tolerancí 3D tisku [16].

Je důležité brát v potaz to, že přečnávající plochy pod úhlem větším než  $45^\circ$  ve vertikálním směru vyžadují nosné konstrukce, které mohou omezit svobodu návrhu. Po odstranění podpory mohou mít plochy hrubší nebo nerovný povrch. Napětí, podpory, lineární smrštění a další geometrické aspekty mohou způsobit odchylky v tolerancích a rovinnosti [16].

### 2.4 Výhody a nevýhody ve srovnání s konvenčními nástroji

Proces EOS DMLS má všechny obvyklé výhody Rapid Prototyping. V první řadě se jedná o úsporu času, kdy je oproti konvenčním technologiím snížena doba cyklu. Výrobu součástek lze provést během jediného pracovního dne, ve srovnání s několika dny potřebnými pro běžné obrábění.

Další výhodou je úspora peněz. Ta je dána především vyšší účinností výroby – a tím i menší spotřebou materiálu. Především u součástek s členitějším tvarem zde nevzniká tolik odpadu, protože zatímco při konvenční výrobě se z polotovaru odstraňují části a jsou většinou



bez užitku vyhozeny, tak při metodě DMLS je materiál využit převážně jen tam, kde je potřeba, a případný neexponovaný prášek lze zrecyklovat a využít na další tisk.

S DMLS je také spojena velká míra flexibility při tvorbě součástek o různých tvarech. Oproti běžným nástrojům je výrazně usnadněna tvorba složitějších geometrických tvarů, například s ostrými vnitřními rohy. Podle výzkumu společnosti CRDM je metoda DMLS zvláště účinná pro vytváření nástrojových VBD pro malé části (menší než  $25 \times 25 \times 25$  mm) se složitými geometriemi, které by za normálních okolností vyžadovaly rozsáhlé frézování a elektroerozivní obrábění.

Lepší propojení s CAD daty s sebou přináší nejen pohodlnější obsluhu ze strany uživatele, ale také snadnější možnost zpracování částí s vysokým stupněm přesnosti. Vyrobené součástky tím lépe splní přesné požadavky kladené na nástroje pro výrobu. Navíc mají díky řízení teploty při výrobě zpravidla předpoklad k vyšší odolnosti.

Ve srovnání s konvenčními nástroji umožňuje tato technologie lépe vytvářet porézní výrobky. Pórovitost může být výhodná pro některé aplikace, např. nástroje pro vyfukování, kde póry umožňují uvolnění plynů. CRDM často navrhuje míru pórovitosti do svých nástrojů, aby se snížily doby cyklu vstřikování a vstřikovací tlaky. Pórovitost může být také užitečná pro výrobu nástrojů bez vyhození, kde se používá stlačený vzduch k "vyfukování" části z nástroje. Tím se snižuje doba výroby nástrojů a rovněž doba výrobního cyklu [17]. Pórovitost, odlehčení apod. přispívá ke snížení hmotnosti nástroje, což je důležitý faktor. Nástroje s nižší hmotností se vyznačují menší energetickou náročností pro výměnu nástroje, start vřetena, brždění vřetena a obrábění jako celkové. Na energetické náročnosti se hlavně projevují setrvačné síly, které jsou u lehkých nástrojů, konkrétně u Krakena, o cca 70% menší než u konvenčních. S lehkým nástrojem je i snadná manipulace obsluhy NC stroje.

Hlavní nevýhodou výroby pomocí DMLS je limitovaná velikost součástek. Prostor pro jejich tvorbu zpravidla nepřesahuje  $250 \times 250 \times 300$  mm, takže větší výrobky je zatím nutné vyrábět konvenčními způsoby.

Ačkoliv je DMLS výroba obvykle finančně výhodnější, tak u některých součástek může být lepší variantou konvenční výroba. Týká se to především součástek s málo členitým povrchem, ze kterých není při obrábění odstraňováno tolik materiálu. Na celkové ekonomické bilanci se též může projevit nutnost dalšího zpracování, jako je například broušení a leštění.

V neposlední řadě je jako nevýhoda uváděno to, že některé části součástek vyrobených DMLS metodou jsou náchylnější k defektům. Přestože je tato metoda obvykle spojena s vyšší odolností, tak některé části jsou při výrobě vystavené většímu teplotnímu pnutí, což může pevnost naopak snížit [28].

Toto srovnání konvenčních a nekonvenčních nástrojů je více rozvedeno a ukázáno na konkrétních příkladech ve výpočtové části, konkrétně se zaměřuje na rozdíl v hmotnosti nástroje a jeho vliv na energetickou náročnosti motoru pro start a brždění vřetene.

## **2.5 Nejčastěji zkoumané aspekty vřetena**

### *2.5.1 Start a brždění vřetene*

Start a brždění vřetene jsou nejvíce energeticky náročné operace, proto by nástroj měl mít co nejmenší hmotnost. Během cyklu dochází několikrát k zastavení a následnému startu vřetena. Je důležité si uvědomit, že motor musí utáhnout hmotnost frézy, vřetena, eventuelně i ozubeného kola (je-li přítomné) a dalších součástek.

Právě odlehčením nástroje snížíme redukovaný moment setrvačnosti všech rotujících částí a tím pádem i potřebný výkon pro start a zabrždění vřetena. Běžné výkony elektromotorů bývají kolem 0,7 – 1,5 kW, nanejvýš kolem 3 kW, proto bychom se při výpočtu měli vejít do této hodnoty.

Odlehčený nástroj by nám měl ušetřit cca 70 % energie pro činnost elektromotoru. Tato hypotéza bude ověřena v praktické části bakalářské práce.

### *2.5.2 Vyvažování*

Pro zjištění místa a hodnoty jakéhokoliv nevyvážení a jeho korekci používají výrobci rotorů vyvažovací stroje. Tyto stroje jsou tak citlivé, že snadno a přesně určí jakoukoliv odchylku osy těžiště od osy rotace s přesností 0,001 mm [31].

Některé vyvažovací stroje určují pouze statické nevyvážení. Používány jsou k vyvažování dílů ve tvaru kotouče. Jiný typ těchto strojů určuje nevyvážení ve dvou axiálních rovinách, např. k vyvažování rotorů, jejichž délka je proporcionálně větší než průměr. Tyto stroje jsou dostupné ve verzi pro vyvažování rotoru ve vodorovných nebo svislých osách [31].

Nevyváženost, reprezentovaná nerovnoměrným rozložením hmoty točivého stroje okolo jeho osy otáčení, způsobuje vznik vibrací stroje na frekvenci shodné s jeho otáčkovou (základní) frekvencí, případně na frekvenci dvojnásobné. Příčinou vzniku nevyváženosti

točivého stroje mohou být např. připečeniny či usazeniny na točivé části stroje, koroze, mechanické opotřebení, tepelné deformace, materiálové chyby, konstrukční, výrobní nebo montážní závady [32].

Vibrace způsobené nevyvážeností mají škodlivý vliv na kvalitu obrobeneho povrchu, na životnost ložisek i nástrojů. Pokud efektivní hodnota rychlosti těchto vibrací překročí meze definované normou (VDI 2056, ISO 2372), může dojít dokonce i k poškození nebo ke zničení tohoto zřízení. Dle poznatků z praxe nevyváženost zapříčiňuje přibližně 50 % poruch točivých strojů. To je důvod, proč je kladen důraz na její včasné odhalení a eliminování [33].

Možností, jak předejít vibracím je několik. Jednou z nich je vyvažování. Pro většinu standardních operací dostačuje klasické vyvažování, kdy jsou vyváženy jednotlivé části zvlášť. Ale pro obrábění, kdy je třeba dosáhnout vysoké přesnosti, nebo kdy se dosahuje velmi vysokých otáček, tento postup nevyhovuje. Dále lze použít například zvýšení tuhosti sestavy S-N-O. V poslední době jsou často využívány diagramy stability, jejichž pomocí je možno nastavit optimální rezné parametry. Diagram stability se sestaví na základě měření přenosových funkcí obrobku (popřípadě nástroje), jedná se o relativně rychlé měření, které ovšem poskytne cenné informace o optimálním nastavení stroje. Díky optimálnímu nastavení rezných parametrů nedojde ke vzniku vibrací i v otáčkových pásmech, ve kterých bychom vibrace očekávali (vyšší oblast otáček). Ke stabilizaci obrábění může vést jak snížení, tak i zvýšení otáček vřetene. Diagramy stability jsou použitelné pouze pro otáčky cca nad 1000 ot./min (v závislosti na geometrii nástroje/obrobku), pod touto hranicí se projevuje tzv. procesní tlumení. Tím, že je rezný proces stabilní, je dosaženo lepší kvality obrobeneho povrchu a delší životnosti nástroje [34].

## 2.6 Frézy

Fréza je vícebřitý nástroj na frézování a třískové obrábění kovů i jiných materiálů.

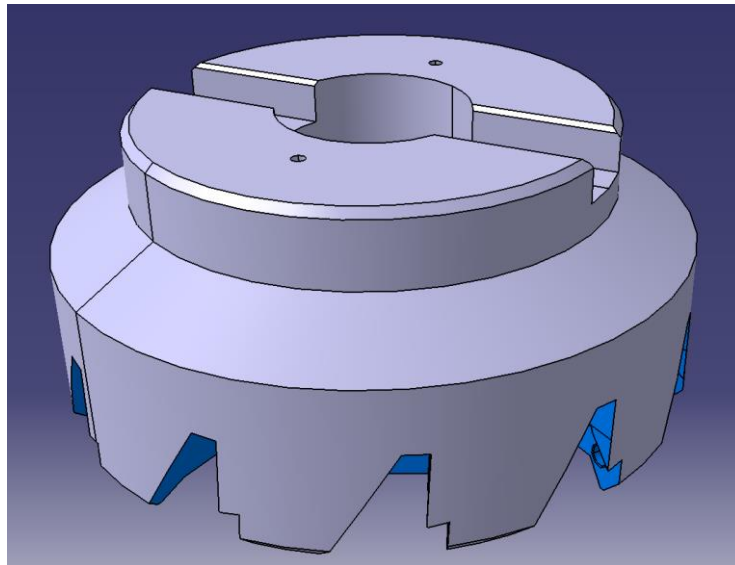
### 2.6.1 Konvenční výroba

Výroba se může u různých fréz mírně lišit, zde bude popsána na konkrétním typu nástroje (s analogickým je pracováno v praktické části). Výroba samotné frézy je rozdělena na několik fází. Prvním cyklem ve výrobě frézy je dělení materiálu (profilu) pro výrobu těla. Dalším krokem ve výrobě frézy je soustružení těla. To probíhá na počítačové řízeném soustruhu.

Polotovar uřezaný na pásové pile je upnut do sklíčidla. Je spuštěn a nastaven program s dráhami nástrojů, velikostí třísky, výměnou nástrojů, optimálními otáčkami a reznou rychlostí.

Jako první je soustruženo čelo těla, poté obvod s profilem, a nakonec je vyvrtán a vystružen otvor. Vysoustružené tělo frézy je pomocí trnu upevněno na otočném stole CNC frézky.

Poté je tělo přeměřeno dotykovou sondou, aby nedošlo při najíždění nástrojů k obrobku ke kolizím. Zubové mezery o daných rozměrech jsou frézovány válcovou frézou a lůžka pro břitové destičky frézou kotoučovou [21]. Po této operaci dochází k odjehlení a následné povrchové úpravě.



Obrázek 5: Ukázka modelu tělesa frézy v SW Catia V5

### 2.6.2. Nekonvenční výroba

Samotná fréza má ovšem vysokou hmotnost, kterou díky aditivní technologii lze eliminovat. Dalším velkým plusem je svoboda návrhu chladicích kanálků. Jak již bylo popsáno výše, tiskneme ve vrstvách, tím pádem frézu lze vnitřně odlehčit a přidat chladicí kanálky. Příkladem viditelného odlehčení je frézovací hlava „Kraken“ vyvinutá v Regionálním technologickém institutu (RTI) při Fakultě strojní ZČU v Plzni, kdy se dokázala zredukovat hmotnost o více než 65 % oproti klasické fréze. Zároveň má fréza i zkosené výztuhy za účelem zachytávání i radiálních sil.

Výroba začíná od CAD modelu, který je vyobrazen na obrázku 13. Polotovár obsahuje přídatky na obrábění a místa pro lůžka VBD destiček. Model se vytiskne a pošle na další operace. Začne se odlamováním podpor vzniklých při tisku, poté se polotovár obrousí a vyhladí se případné nerovnosti a vady. Následuje kontrola rozměrů VBD destiček a následné vyfrézování lůžek. Vzhledem k tvarově složité geometrii se lůžka frézují na pětiosém CNC

stroji pomocí CAM systému. V programu se „vydlabou“ lůžka pro destičky a pošle se NC kód do výroby.



Obrázek 6: Frézovací hlava „Kraken“ [8].

Dalším způsobem odlehčení nástrojů je využití porézních struktur. Obvykle jsou struktury implementovány do vnitřní části odlehčované součásti, přičemž vnější obal zůstává zachován. Tyto speciální konstrukční prvky lze využít např. pro utlumení vibrací nebo pro objemové chlazení. Existuje celá řada typů porézních struktur. Při jejich návrhu a použití je třeba dbát na jejich správnou orientaci v závislosti na funkci a zatěžení vyplňované součásti a na to, zda je struktura danou technologií vyrobitelná. Laboratoř experimentálního obrábění RTI se implementací porézních struktur do funkčních součástí intenzivně zabývá [9].



Obrázek 7: Speciálně odlehčená fréza porézními strukturami [9].

Při navrhování odlehčené frézy je důležité vzít v potaz namáhání při obrábění a pomocí metody konečných prvků (MKP) zjistit nejvíce namáhané části a vyladit případné nedostatky.

Nejnámějším výzkumným ústavem zabývajícím se tiskem frézy je již zmiňovaný RTI v oddělení laboratoře experimentálního obrábění. Další firmou na trhu je KOMET Group. Jejich fréza disponuje více řeznými hranami a geometrie ostří optimalizované HPC výrazně zvyšuje produktivitu nástroje a dosáhne tak až 50 % vyššího posuvu. Optimalizovaný průběh chladicích kanálů zajišťuje, že každá řezná hrana je přesně dodávána s chladičem samostatným kanálem. Firma věří, že 3D tiskem také překonává konvenční výrobní metody z hlediska dodací doby. Firma se zabývá vysoce přesným vrtáním, vystružováním, frézováním, řezáním závitů a sledováním procesu. Jako inovativní společnost vyvíjí, vyrábí a distribuuje vysoce kvalitní prémiové produkty a individuální zákaznické řešení pro všechny stupně obrábění. Díky jejímu technologickému know-how podrobně zkoumá výrobní procesy jejích zákazníků a pomáhá jim s řešeními na míru pro zvýšení efektivity. Úspěch společnosti je založen především na znalostech, dovednostech, odhodlání a inovační síle zaměstnanců.



Obrázek 8: Fréza vyrobená aditivní technologií firmou Komet [12].

Unikátní konstrukce frézy umožňuje zvýšit produktivitu až o 100 % oproti běžným nástrojům a výrazně snížit řezné síly a minimalizovat otřepty. Snížená hmotnost frézy je přínosem v tom smyslu, že se materiál používá pouze v případě potřeby pro optimální funkčnost. Fréza disponuje optimalizovaným kanálem chlazení pro lepší a efektivnější odvod třísek. Fréza může pracovat při vyšších otáčkách, a to bez známky zvýšené hlasitosti, řezné a

posuvové rychlosti oproti fréze vyrobené konvenčními metodami. Z těchto vlastností vyplývá, že fréza uspoří více než 50 % času frézování.



Obrázek 9: Fréza vyrobená aditivní technologií firmy LMT [22]

Vnitřní průchody chladicího média v tělese frézovacího nástroje, jako je toto, by při konvenční výrobě obvykle měly mít rovný tvar. AM ale přináší i možnost tvorby zakřivených kanálů, což umožňuje, aby tento frézovací nástroj od firmy LMT dodával chladivo přesně tam, kde je to potřeba. Podle LMT ukázalo zkušební řezání díky této konstrukční změně zlepšení životnosti nástroje o 50 % při frézování titanu [22].

Mezi dalšími výrobci 3D tištěných nástrojů je jednou z nejznámějších firem Sandvik Coromant. Tento švédský výrobce nástrojových systémů představil v roce 2019 novou frézu s kovovou 3D tištěnou hlavou. Znamená to posun směrem k zapojení společnosti do 3D tisku pro konečnou výrobu.



Obrázek 10: Odlehčená fréza CoroMill 390 [35]

Nová odlehčená fréza CoroMill 390 od společnosti Sandvik Cormorant je frézovací hlava na kov založená na konstrukci CoroMill 390 [35].

Díky topologické optimalizaci, kdy se materiál takticky odstraní, aby byl vytvořen optimální design frézy pro minimalizaci hmotnosti, je fréza kompaktnější a výrazně lehčí než konvenční verze, což pomáhá strojním dílnám zvýšit produktivitu jejich frézovacích operací s dlouhým převisem [35].

Nástroj vyrobený z práškové slitiny titanu ze slitiny Osprey od společnosti Sandvik byl vyvinut speciálně pro překonání problémů s vibracemi při frézování kovů s dlouhými převisy. Hluboké dutiny v konvenčním CNC frézovaném dílu mohou být ohroženy vibracemi, což vede k pomalejší výrobě, kratší životnosti nástroje a špatné povrchové úpravě. Nekonvenční výroba tento problém řeší a zlepšuje vlastnosti, které jsou klíčové pro komponenty používané v leteckém, ropném a plynárenském průmyslu. Při použití v kombinaci s frézovacími adaptéry společnosti Silent Tools tato společnost uvádí, že tento nástroj může zvýšit produktivitu o 50 % [35].

Lightweight CoroMill 390 může provádět čelní frézování s dlouhým dosahem, hluboké frézování a boční frézování, frézování dutin a frézování drážek. Nástroj je k dispozici ve variantách o průměru 40 mm a 50 mm [35].



## 3 Analýza současného řešení

### 3.1 Zatížení vřetene při brždění

#### 3.1.1 Metodika výpočtu zatížení

Z důvodu časté výměny obráběcích nástrojů jsou vřetena vybavena brzdou, díky které dochází k úspoře času při rychlém zastavení. Často používané jsou kotoučové brzdy pro jejich jednoduchost, klidný průběh brždění a minimální točivý moment v odbrzděném stavu. U moderních CNC strojů jsou k brždění používány frekvenční měniče, které proudově brzdí motor. Elektrické brzdy využívají přepnutí motoru na generátorový chod a při brždění vzniká elektrický proud, který může být při usměrnění dodáván zpět do sítě nebo akumulován pro pozdější využití [24].

Pro výpočet potřebného brzdného momentu je nutné nejprve určit potřebný redukováný moment. Pro bezpečné zastavení je nutné, aby se vřeteno přestalo točit do 3 vteřin od aktivace brzdy. Tato doba vychází z minimální vzdálenosti řezného nástroje od okraje ohrazení [29].

Závislost brzdného momentu je dána násobkem zrychlení (v tomto případě zpomalení) a redukováným hmotným momentem všech rotujících částí [29]. Pro náš případ budeme uvažovat jen moment setrvačnosti frézy.

$$M_B = J_{red} * \alpha_B$$

Zpomalení vyjádříme podílem otáček k času brždění. Je také nutné převést otáčky na rychlost úhlovou. Čas brždění vřetene se pohybuje v rozmezí 0,5 ÷ 1,5 sekundy. Pro jednodušší výpočet bude předpokládáno, že stroj zastaví vřeteno za stejný čas při různých otáčkách, byť realita je odlišná a čas zastavení bude záviset na otáčkách.

$$\alpha_B = \frac{\omega}{t_z} = \frac{2\pi \frac{n}{60}}{t_z}$$

#### 3.1.2 Společné parametry pro výpočet obou fréz

Při srovnání konvenční frézy a Krakena je nutné, abychom získali co nejpřesnější výsledky, pracovat se společnými parametry pro výpočet obou fréz s VBD destičkami. Budeme se snažit, aby hodnoty byly stejné pro obě frézy. Ve výpočtové části bude porovnání frézy s VBD vyrobené konvenčně z plného materiálu s otvorem pro trn a odlehčené frézy vyrobené aditivní technologií. Konkrétně se zaměřuje na porovnání energií potřebné pro start a brždění vřetene.

Při výpočtu je počítáno s tím, že výkon lineárně roste, respektive klesá do času rozjezdu, respektive zastavení. Proto výsledná energie bude obsah pod křivkou  $P(t)$ .

Parametr	Typ frézy	Konvenční fréza	Konvenční fréza Sandwich CoroMill® 245	Kraken	Jednotky
Hmotnost $m$		4,6	3,06	1,052	kg
Průměr nástroje $d$		100	125	125	mm
Řezná rychlost $v_c$		127,86	159,83	159,83	m/min
Otáčky vřetene $n$		407	407	407	ot/min
Doba frézování		12	12	12	s
Úhlová rychlost $\omega$		42,6	42,6	42,6	rad/s
Úhlové zrychlení $\alpha$		42,6	42,6	42,6	rad/s <sup>2</sup>
Potřebný čas zastavení $t_z$		1	1	1	s

Tabulka 2: Parametry pro frézování

### 3.1.2 Vlastní výpočet

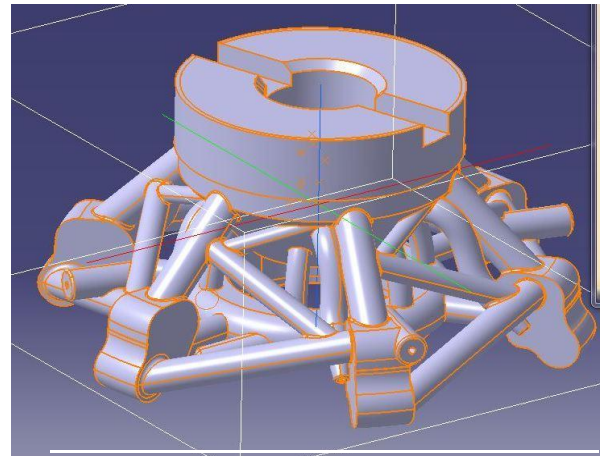
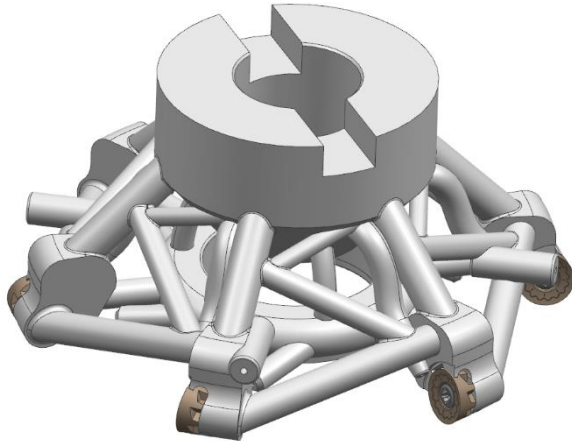
Ve výpočtu budeme zanedbávat vlastní tíhu vřetene.

#### 3.1.2.1 Moment setrvačnosti fréz $M_B$

Momenty setrvačnosti jsou měřítkem toho, jaký prostor součást zabírá v okolí svého těžiště, a tedy kolik úhlové hybnosti a kinetické energie by pro danou úhlovou rychlost mělo. Konvenční moment tenzoru setrvačnosti (záporný) je zapsán v podobě matice  $3 \times 3$ , která v kombinaci s vektorem úhlové rychlosti dává hybnost a kinetickou energii. Vzhledem k tvarově složité součásti byl moment setrvačnosti spočítán programem DS Catia v5 a Siemens NX pomocí negativního integrálu.

„Negativní“ terminologie vychází ze skutečnosti, že deviační momenty mimo diagonální termíny v konvenčním tenzoru setrvačnosti mají znaménko mínus. „Pozitivní“ forma pouze převrací znaménka deviačních momentů mimo diagonálních výrazů, což může být v některých případech vhodnější, ale není to obvyklé.

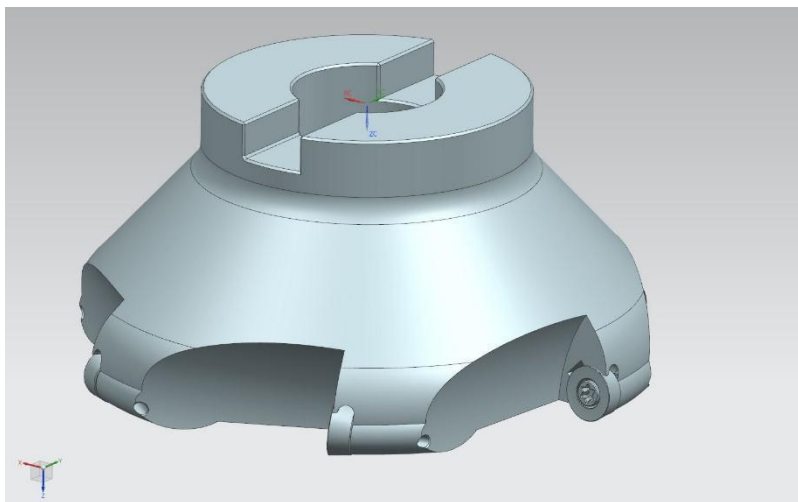
a) *Kraken*



Obrázek 11: CAD model Krakena s VBD destičkami (vlevo) a s přídávky na obrábění (vpravo).

$$M_B = J_k * \alpha_B = \int_{(V)} r^2 \rho dV * \frac{2\pi \frac{n}{60}}{t_z} = 0,0016 * \frac{2\pi \frac{407}{60}}{1} = 0,068 [Nm]$$

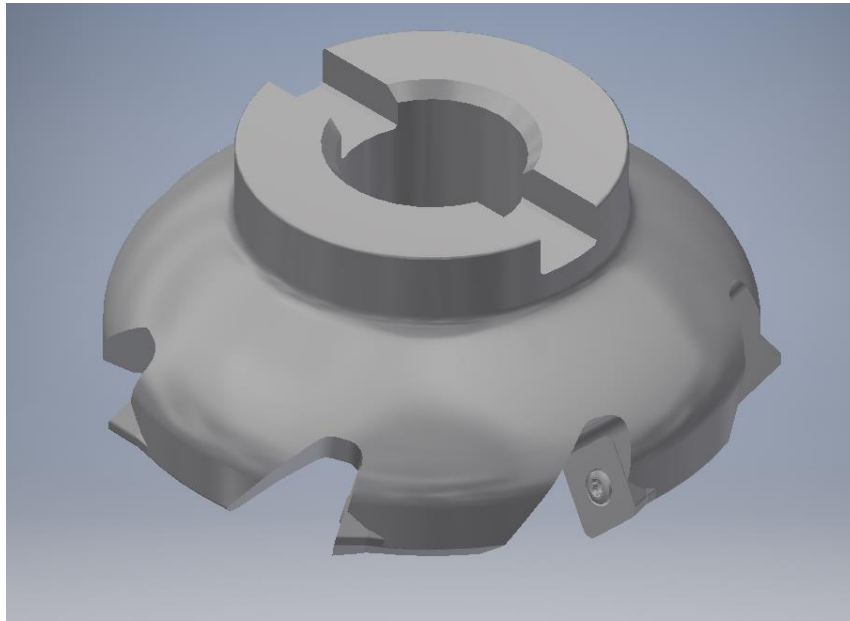
b) *konvenční fréza*



Obrázek 12: CAD model konvenční frézy z plného materiálu.

$$M_B = J_{Fr} * \alpha_B = \int_{(V)} r^2 \rho dV * \frac{2\pi \frac{n}{60}}{t_z} = 0,0058 * \frac{2\pi \frac{407}{60}}{1} = 0,247 [Nm]$$

c) konvenční fréza Sandwick CoroMill® 245



Obrázek 13: CAD model konvenční frézy z plného materiálu Sandwick CoroMill® 245.

$$M_B = J_{Fr} * \alpha_B = \int_{(V)} r^2 \rho dV * \frac{2\pi \frac{n}{60}}{t_z} = 0,0089 * \frac{2\pi \frac{407}{60}}{1} = 0,38 \text{ [Nm]}$$

### 3.1.3.2 Potřebný výkon a energie motoru pro brždění vřetene

a) Kraken

$$P = M_B * \omega = M_B * 2\pi \frac{n}{60} = 0,068 * 2\pi \frac{407}{60} = 2,9 \text{ [W]}$$

$$E = \frac{1}{2} * P * t_z = \frac{1}{2} * 2,9 * 1 = 1,45 \text{ [J]}$$

b) konvenční fréza

$$P = M_B * \omega = M_B * 2\pi \frac{n}{60} = 0,247 * 2\pi \frac{407}{60} = 10,53 \text{ [W]}$$

$$E = \frac{1}{2} * P * t_z = \frac{1}{2} * 10,53 * 1 = 5,265 \text{ [J]}$$

c) konvenční fréza Sandwick CoroMill® 245

$$P = M_B * \omega = M_B * 2\pi \frac{n}{60} = 0,38 * 2\pi \frac{407}{60} = 16,2 \text{ [W]}$$

$$E = \frac{1}{2} * P * t_z = \frac{1}{2} * 16,2 * 1 = 8,1 \text{ [J]}$$

### 3.2 Zatížení vřetene při rozjezdu

#### 3.2.1 Metodika výpočtu

Ve výpočtu zatížení vřetene při rozjezdu využijeme vzorců z předchozí kapitoly, tedy brždění. Pro výpočet bude opět předpokládáno, že stroj zastaví vřeteno za stejný čas při různých otáčkách. Ovšem bude potřeba oprava názvu následujících veličin:

-  $M_B$  převedeme na  $M_{start}$

-  $\alpha_B$  převedeme na  $\alpha_S$

-  $t_z$  převedeme na  $t_s$

#### 4.2.2 Společné parametry pro výpočet obou fréz

Abychom získali co nejpřesnější výsledky, budeme pracovat se společnými parametry pro výpočet obou fréz s VBD destičkami. Hodnoty by se měly, pokud možno shodovat pro obě frézy. Výpočtová část bude zahrnovat porovnání frézy s VBD vyrobené konvenčně z plného materiálu s otvorem pro trn a odlehčené frézy vyrobené aditivní technologií. Využijeme již hotovou tabulku s hodnotami pro výpočet, upravíme jen úhlové zrychlení a dobu rozběhu vřetene  $t_s$  na 0,26 s.

#### 3.2.3 Vlastní výpočet

Ve výpočtu opět budeme zanedbávat vlastní tíhu vřetene.

a) *Kraken*

$$M_S = J_k * \alpha_B = \int_{(V)} r^2 \rho dV * \frac{2\pi \frac{n}{60}}{t_s} = 0,0016 * \frac{2\pi \frac{407}{60}}{0,26} = 0,262 [Nm]$$

b) *konvenční fréza*

$$M_S = J_{Fr} * \alpha_B = \int_{(V)} r^2 \rho dV * \frac{2\pi \frac{n}{60}}{t_s} = 0,0058 * \frac{2\pi \frac{407}{60}}{0,26} = 0,951 [Nm]$$

c) *konvenční fréza Sandwick CoroMill® 245*

$$M_B = J_{Fr} * \alpha_B = \int_{(V)} r^2 \rho dV * \frac{2\pi \frac{n}{60}}{t_z} = 0,0089 * \frac{2\pi \frac{407}{60}}{0,26} = 1,45 [Nm]$$

### 3.2.3. Potřebný výkon a energie motoru pro start vřetene

a) *Kraken*

$$P = M_S * \omega = M_B * 2\pi \frac{n}{60} = 0,262 * 2\pi \frac{407}{60} = 11,167 [W]$$

$$E = \frac{1}{2} * P * t_s = \frac{1}{2} * 11,167 * 0,26 = 1,45 [J]$$

b) *konvenční fréza*

$$P = M_S * \omega = M_B * 2\pi \frac{n}{60} = 0,951 * 2\pi \frac{407}{60} = 40,533 [W]$$

$$E = \frac{1}{2} * P * t_s = \frac{1}{2} * 40,533 * 0,26 = 5,27 [J]$$

c) *konvenční fréza Sandwick CoroMill® 245*

$$P = M_S * \omega = M_B * 2\pi \frac{n}{60} = 1,45 * 2\pi \frac{407}{60} = 61,8 [W]$$

$$E = \frac{1}{2} * P * t_s = \frac{1}{2} * 61,8 * 0,26 = 8 [J]$$

### 3.2.3 Doplnění výsledků experimentu RTI

#### 3.2.3.1. Maximální zatížení vřetene – *Kraken*

V první řadě je důležité si uvědomit, že experiment RTI se zabýval maximálním zatížením vřetene při obrábění, nikoliv při brždění. Tento text slouží výhradně k doplnění poznatků, jak se mění zátěž vřetene při obrábění. Za druhé je podstatné, že se odlehčená fréza o průměru 120 mm porovnávala s plnou frézou o průměru 100 mm. Výsledek porovnání nelze tedy jednoznačně interpretovat a lze brát v úvahu zatížení vřetena pouze u odlehčené frézy.

Mezi hlavní cíle experimentu RTI patřilo hlavně sledování velikosti zatížení vřetene při změně  $a_e$  (šířka přejezdu), sledování skutečné  $a_p$  a monitorování pískání při obrábění. Tyto faktory jsou pro průmyslovou praxi důležité, neboť nám určují ekonomičnost, komfort výroby a seřízení NC stroje.

V prvním testu, který se zabýval zatížením vřetene a skutečnou hloubkou řezu, byly řezné podmínky nastavené takto:  $v_c=60$  m/min;  $f_z=0,1$  mm a obrobek byl chlazen kapalinou.

Nastavená $a_p$	$a_e$ (šířka záběru)	Max. zátěž	Skutečná $a_p$
2 mm	10 mm	50 %	1,993 mm
1,95 mm	30 mm	62 %	1,908 mm
1,9 mm	45 mm	100 %	1,840 mm

Tabulka 3: Výsledky prvního experimentu.

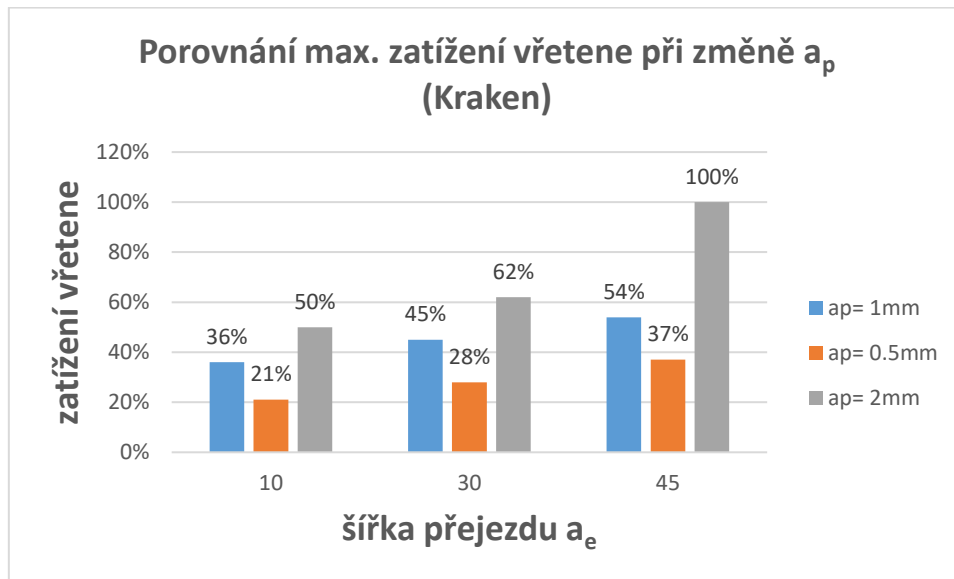
Z výsledku vyplývá, že je potřeba nastavit potřebnou korekci pro hloubku řezu. Rovněž se u  $a_p = 1,9$  mm objevovalo výrazné a nepříjemné pískání. Vřeteno se zde točilo na maximální 100% příkon. Ovšem vřeteno krátkodobě přeneslo i 140 % svého výkonu. Zkouška řezu bez chlazení byla provedena na kratší straně polotovaru – při prvním přejezdu ( $a_p = 10$  mm) – 55% zátěž vřetene + pískání.

Druhý test se zabýval monitorováním pískání a zátěže vřetene při obrábění při změně  $a_e$ . Řezné podmínky byly nastaveny takto:  $v_c=60$  m/min;  $f_z= 0,1$  mm; chlazení kapalinou.

Hloubka řezu $a_p$	Šířka záběru $a_e$	Max. zátěž	Vlastnost
1 mm	10 mm	36 %	bez hluku
0,95 mm	30 mm	45 %	stabilní lehké pískání
0,9 mm	45 mm	54 %	silné pravidelné pískání
0,5 mm	10 mm	21 %	téměř bez hluku
0,45 mm	30 mm	28 %	stabilní lehké pískání
0,4 mm	45 mm	37 %	silné stabilní pískání

Tabulka 4: Výsledky druhého experimentu.

Výsledky prvního a druhého testu ukazuje přehledně graf porovnání maximálního zatížení vřetene při změně  $a_p$ . Z grafu vyplývá, že při kterékoliv ze zahrnutých šířek přejezdu roste zatížení vřetene s  $a_p$  a zároveň při daném  $a_p$  roste zatížení s rostoucí šířkou přejezdu.



Graf 1: Porovnání zatížení vřetene při změně  $a_p$

Třetí test se věnoval monitorování pískání a zátěže vřetene při obrábění při změně  $a_e$ . Řezné podmínky zůstaly téměř stejné, jediná změna, která nastala, byla změna hodnoty posuvu na zub  $f_z=0,2$  a  $0,3$  mm.

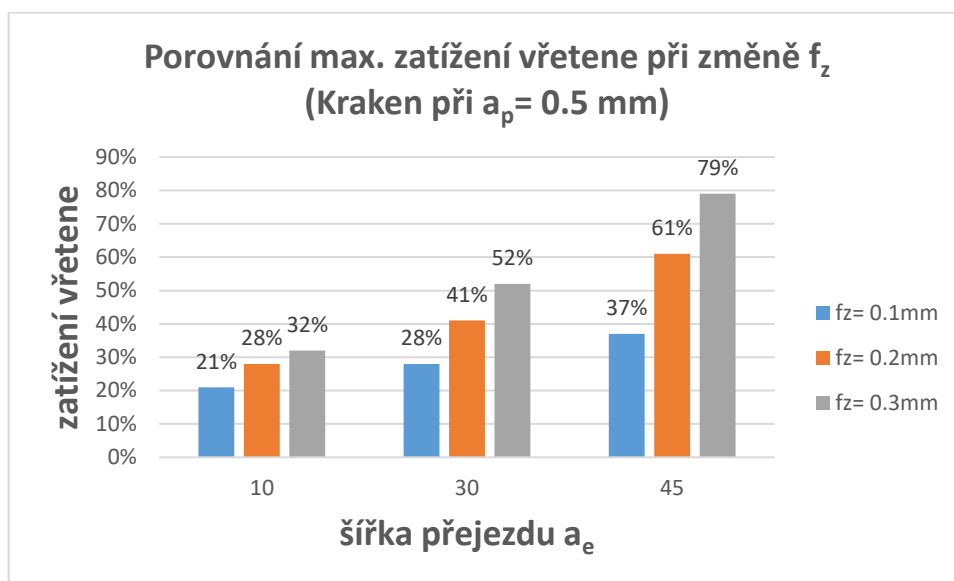
Hloubka řezu $a_p$	Šířka záběru $a_e$	Max. zátěž	Vlastnost
1 mm	10 mm	28 %	lehké pískání
0,95 mm	30 mm	41 %	stabilní lehké pískání
0,9 mm	45 mm	61 %	silné pravidelné pískání

Tabulka 5: výsledek pro  $f_z=0,2\text{mm}$ .

Hloubka řezu $a_p$	Šířka záběru $a_e$	Max. zátěž	Vlastnost
1 mm	10 mm	32 %	lehké pískání
0,95 mm	30 mm	52 %	stabilní lehké pískání
0,9 mm	45 mm	79 %	silné pravidelné pískání

Tabulka 6: výsledek pro  $f_z=0,3\text{mm}$ .





Graf 2: Porovnání zatížení vřetene při změně  $f_z$

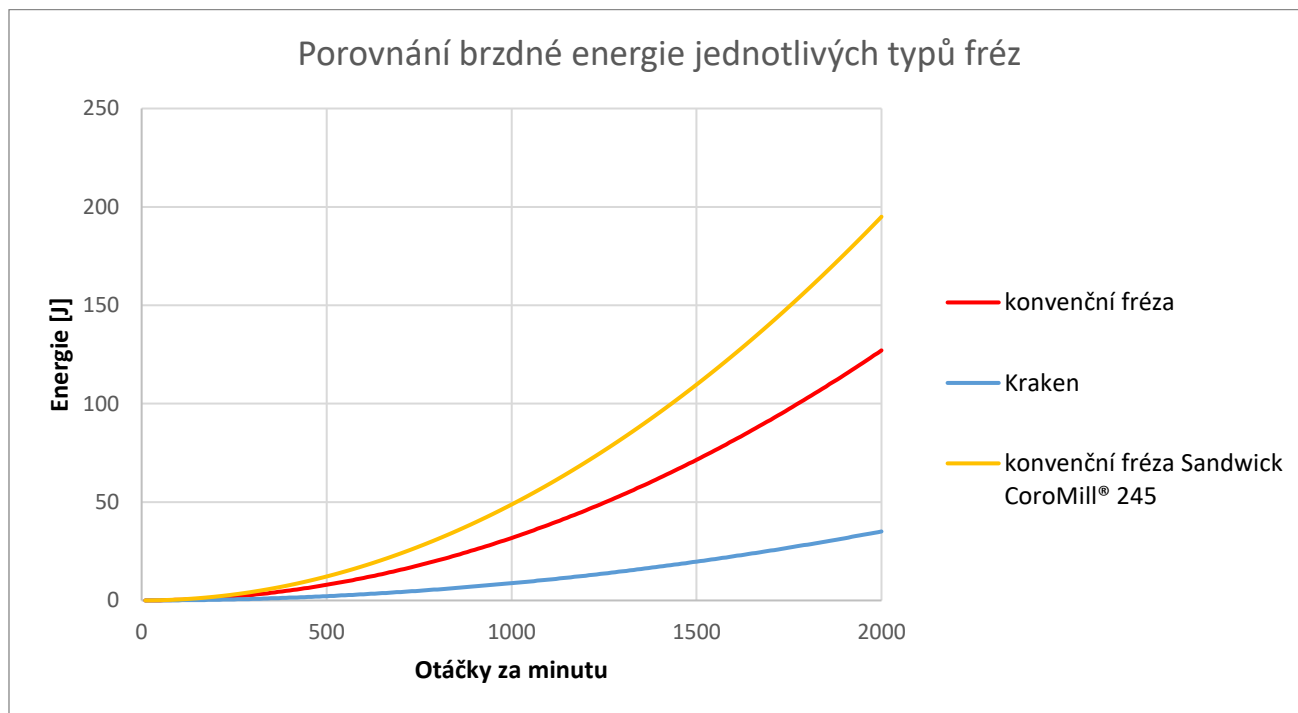
Výsledky třetího a čtvrtého testu ukazuje přehledně graf porovnání maximálního zatížení vřetene při změně  $f_z$ . Z grafu vyplývá, že při kterékoliv ze zahrnutých šířek přejezdu roste zatížení vřetene s  $f_z$ , a zároveň při daném  $f_z$  roste zatížení s rostoucí šířkou přejezdu.

## 4 Zhodnocení

### 4.1 Výsledky a diskuse brždění

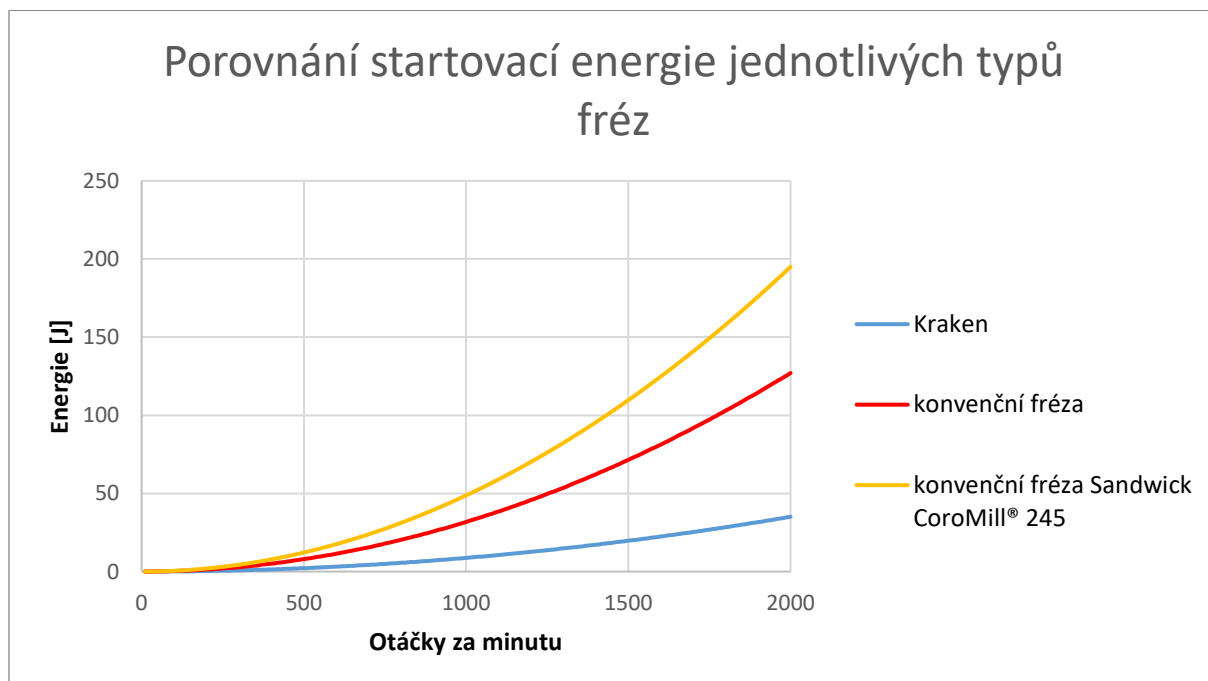
	Kraken	Konvenční fréza	Konvenční fréza Sandwick CoroMill® 245	Procentuální rozdíl [ $\Delta$ %]	Jednotky
Moment setrvačnosti $I$	0,0016	0,0058	0,0089	72,41	$kg \cdot m^2$
Brzdňý moment $M_B$	0,068	0,247	0,38	72,47	$Nm$
Výkon pro zastavení $P$	2,9	10,53	16,2	72,46	$W$
Energie pro zastavení $E$	1,45	5,265	8,1	72,46	$J$

Tabulka 7: Souhrn vypočtených veličin.



Graf 3: Závislost brzdné energie na otáčkách jednotlivých typů fréz.

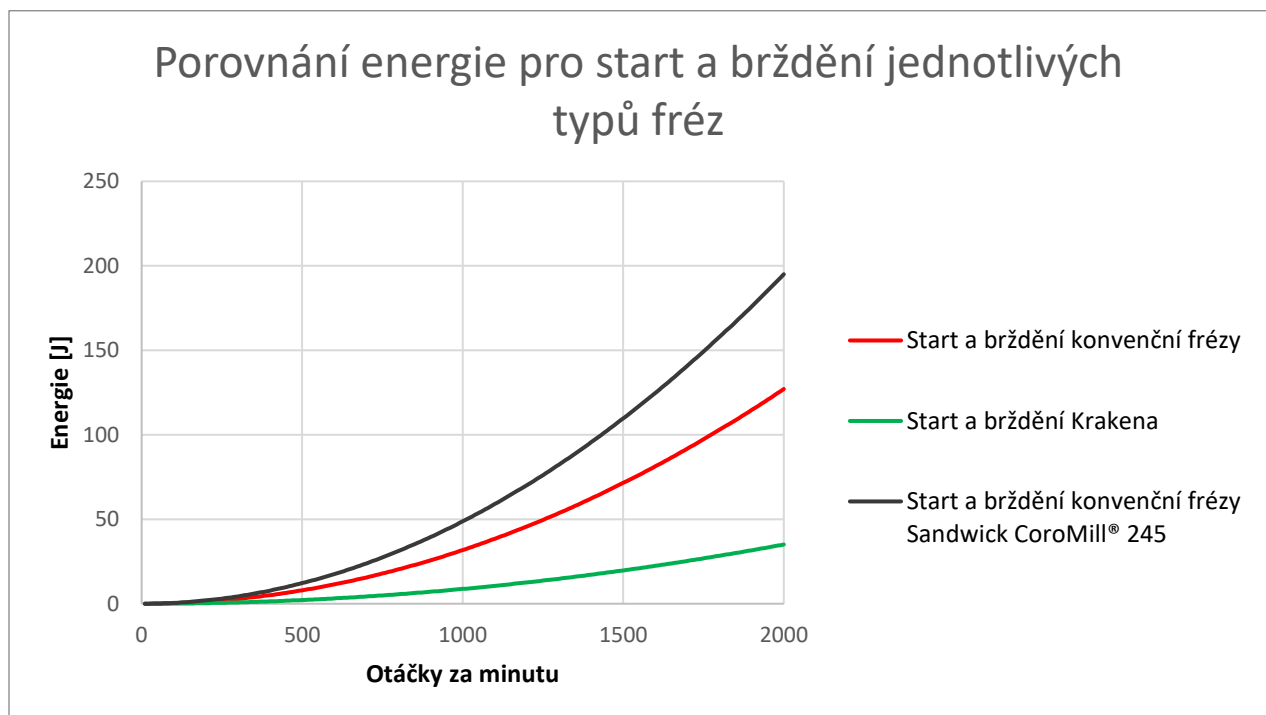
Z grafu je vidět, že v nízkých otáčkách jsou potřebné brzdné energie skoro totožné, ale ve vyšších otáčkách od cca 70/min už jsou ty rozdíly znatelné a např. při 350 otáčkách/min už je brzdná energie pro Krakena jen zhruba čtvrtinová oproti konvenční fréze. Z toho vyplývá, že odlehčená fréza má smysl při vyšších otáčkách a nezatěžuje tolik vřeteno při brždění.



Graf 4: Závislost startovací energie na otáčkách jednotlivých typů fréz.

Z grafu je vidět, že v nízkých otáčkách jsou potřebné startovací energie skoro totožné, ale ve vyšších otáčkách od cca 70/min už jsou ty rozdíly znatelné a např. při 350 otáčkách/min už je startovací energie pro Krakena jen zhruba čtvrtinová oproti konvenční fréze. Z toho vyplývá, že odlehčená fréza má smysl při vyšších otáčkách a nezatěžuje tolik vřeteno při startování. Tím pádem se Kraken opět ukazuje jako výhodnější možnost, a to tím více, čím vyšší otáčky jsou použity.

#### 4.2 Startovací energie jednotlivých typů fréz



Graf 5: Porovnání energie pro start a brždění jednotlivých typů fréz.

Pro větší přehlednost rozdílů výkonu při brždění a startu nám poslouží výše zobrazený graf. Z grafu je opět vidět, že grafy startu a brždění jsou prakticky totožné (křivky pro brždění se u daného nástroje navzájem „překrývají“ s křivkami pro start). Z toho vyplývá, že odlehčená fréza má smysl při vyšších otáčkách a nezatěžuje tolik vřeteno při startování a brždění.

## 5 Závěr

Tato bakalářská práce byla zaměřena na řezné nástroje vyrobené aditivní technologií.

Práce obsahovala tři základní cíle. Prvním z nich byl rozbor současného stavu. Tento cíl byl úspěšně splněn a zároveň byl i doplněn o popis jednotlivých nástrojů vyrobených 3D tiskem. Dozvěděli jsme se, že lze ve větším měřítku využívat technologii 3D tisku k úspoře hmotnosti a ceny nástroje. Dále jsme zjistili, že díky 3D tisku máme svobodu návrhu nástroje, tj. využívat porézní struktury, netypický tvar, který by šel těžko vyrobít konvenční výrobou apod. Dále z výsledků vyhledávání vyplývá, že hlavní nevýhoda je limitovaná velikost součástek. Na celkové ekonomické bilanci se též může projevit nutnost dalšího zpracování, jako je například broušení a leštění. Při spékání jsou součástky náchylné na teplotní napětí a dále některé části součástek vyrobených DMLS metodou jsou náchylnější k defektům.

Druhým cílem byla analýza současného řešení. Ve výpočtové části bakalářské práce bylo zjištěno a ověřeno, že odlehčená fréza má své výhody při brždění vřetene. Její relativně nízká hmotnost nám zajišťuje, že ji lze použít na relativně lehkou hřídel vřetena. Kupříkladu pokud je v manuálu uvedeno, že lze použít frézu o maximálním průměru 100 mm, aby nedošlo k poškození vřetene, lze zkusit variantu Krakena, kde se dá díky nižšímu zatížení použít i větší průměr než u konvenční frézy.

Třetím cílem bylo zhodnocení, ve kterém bylo zjištěno, že nízký moment setrvačnosti má i vliv na potřebnou energii motoru pro brždění, protože odlehčená fréza nám ušetří **zhruba 73 %** výkonu motoru, tím pádem i uspoří náklady na energii. Bylo zjištěno, že startovací a brzdné energie jsou stejné. Pro přesnější reálný výpočet lze na tuto práci navázat, tak, že by se bral v úvahu proměnný čas brždění v závislosti na otáčkách.

Tato práce má značný praktický přínos, který spočívá především ve zkoumání výroby řezných nástrojů pomocí 3D tisku, což je dnes velmi perspektivní obor. Výsledky práce by mohly sloužit například firmám zabývajícím se obráběním, které hledají alternativní, levnější a zároveň stejně kvalitní řezné nástroje. Zároveň praktická část práce může sloužit jako ukázka užití vysokoškolské mechaniky v praxi. Dá se tedy říci, že práce nejenže shrnula poznatky o řezných nástrojích vyrobené pomocí aditivní technologie, ale možná i ukázala veřejnosti vlastnosti výrobků, které nás obklopují každý den.

## 6 Zdroje

1. Selective Laser melting. *Wikipedia* [online]. [cit. 2019-11-14]. Dostupné z: [http://en.wikipedia.org/wiki/Selective\\_laser\\_melting](http://en.wikipedia.org/wiki/Selective_laser_melting)
2. Ultrasonic consolidation. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2019-11-14]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Ultrasonic\\_consolidation](https://en.wikipedia.org/wiki/Ultrasonic_consolidation)
3. Direct Metal Sintering. Custom Part Net [online]. [cit. 2018-11-15]. Dostupné z: <http://www.custompartnet.com/wu/direct-metal-laser-sintering>
4. *Omezující parametry 3D tisku*. Plzeň, 2015. Diplomová práce. Západočeská univerzita. Vedoucí práce Ing. Miroslav Zetek, Ph.D.
5. Jak funguje 3D tisk metodou Direct Metal Laser Sintering. In: *Konstruktér* [online]. [cit. 2019-11-18]. Dostupné z: <https://www.konstrukter.cz/jak-funguje-3d-tisk-metodou-direct-metal-laser-sintering/>
6. *Řezné materiály současnosti* [online]. [cit. 2018-12-12]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/rezne-materialy-soucasnosti.html>
7. Cutting Tool Made by Additive Manufacturing [online]. [cit. 2018-12-13]. Dostupné z: <http://www.freepatentsonline.com/y2016/0332236.html>
8. *Frézovací hlava „Kraken“* [online]. In: . [cit. 2018-12-13]. Dostupné z: [https://www.mmspektrum.com/content/image/!!!!gallery2018/MM\\_04\\_2018/rti\\_plzen\\_obr\\_01a.jpg](https://www.mmspektrum.com/content/image/!!!!gallery2018/MM_04_2018/rti_plzen_obr_01a.jpg)
9. *Speciálně odlehčená fréza porézními strukturami* [online]. In: . [cit. 2018-12-13]. Dostupné z: [https://www.mmspektrum.com/content/image/!!!!gallery2018/MM\\_04\\_2018/rti\\_plzen\\_obr\\_02b.jpg](https://www.mmspektrum.com/content/image/!!!!gallery2018/MM_04_2018/rti_plzen_obr_02b.jpg)
10. *Vrtáky vyrobené 3D tiskem* [online]. In: . [cit. 2018-12-13]. Dostupné z: [http://2biy4djn37s2xoe622u8h9g1-wpengine.netdna-ssl.com/wp-content/uploads/2015/12/B6\\_REVISSED\\_SIZE.v2.jpg](http://2biy4djn37s2xoe622u8h9g1-wpengine.netdna-ssl.com/wp-content/uploads/2015/12/B6_REVISSED_SIZE.v2.jpg)
11. *Mapal Relies on Additive Manufacturing for QTD-Series Insert Drills* [online]. [cit. 2018-12-23]. Dostupné z: <http://additivemanufacturing.com/2015/07/21/mapal-relies-on-additive-manufacturing-for-qtd-series-insert-drills/>
12. *Miling cutter made from additive technology by Komet* [online]. In: . [cit. 2018-12-14]. Dostupné z: <https://www.renishaw.com/media/img/gen/025ec12b97de4848bf10147bfb3a065d.jpg>

13. *Design of Internally Cooled Tools for Turning* [online]. 2013, (35) [cit. 2018-12-28].  
Dostupné z:  
[https://www.researchgate.net/publication/259533472\\_Design\\_of\\_Internally\\_Cooled\\_Tools\\_for\\_Turning](https://www.researchgate.net/publication/259533472_Design_of_Internally_Cooled_Tools_for_Turning)
14. Vyměnitelná břitová destička. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2018-12-29]. Dostupné z:  
[https://cs.wikipedia.org/wiki/Vym%C4%9Bniteln%C3%A1\\_b%C5%99itov%C3%A1\\_desti%C4%8Dka](https://cs.wikipedia.org/wiki/Vym%C4%9Bniteln%C3%A1_b%C5%99itov%C3%A1_desti%C4%8Dka)
15. *Design and analysis of an internally cooled smart cutting tool for dry cutting*. [online]. [cit. 2018-12-29]. Dostupné z:  
[https://www.researchgate.net/publication/270622282\\_Design\\_and\\_analysis\\_of\\_an\\_internally\\_cooled\\_smart\\_cutting\\_tool\\_for\\_dry\\_cutting](https://www.researchgate.net/publication/270622282_Design_and_analysis_of_an_internally_cooled_smart_cutting_tool_for_dry_cutting)
16. *Accuracy for 3D Printed Metals* [online]. [cit. 2019-01-05]. Dostupné z:  
<https://support.xometry.com/hc/en-us/articles/221360787-Accuracy-for-3D-Printed-Metals>
17. G. Bennett. *PRACTICAL ISSUES IN THE APPLICATION OF DIRECT METALLASER SINTERING* [online]. 2006, , 12 [cit. 2019-01-06]. Dostupné z:  
<http://sffsymposium.engr.utexas.edu/Manuscripts/2006/2006-63-Jacobson.pdf>
18. *Návrh designu prototypového nástroje* [online]. 2017, , 1 [cit. 2019-11-15]. Dostupné z: <http://www.kmm.zcu.cz/export/sites/kmm/vyzkum-vyvoj/Overenatechnologie1.pdf>
19. *IS IT POSSIBLE TO PROCESS SINTERED CARBIDES BY SELECTIVE LASER MELTING TECHNOLOGY?* [online]. In: . 2019, s. 6 [cit. 2019-11-24]. Dostupné z:  
<https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/34379/1/Bric%c3%adn.pdf>
20. *Zrod (a znovuzrození) břitové destičky* [online]. In: . 2018 [cit. 2019-11-29]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/zrod-a-znovuzrozeni-britove-desticky.html>
21. *Výroba nástroje na obrábění kompozitu*. Zlín, 2011. Bakalářská. Univerzita Tomáše Baťi ve Zlíně.
22. *AM Is Advancing into Tools for Machining: Examples from EMO* [online]. In: . [cit. 2020-01-15]. Dostupné z: <https://www.additivemanufacturing.media/blog/post/am-is-advancing-into-tools-for-machining-examples-from-emo>
23. *Graf použití aditivních technologií v různých oborech* [online]. \_: DocPlayer.cz, 2016 [cit. 2020-03-09]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/18792004-Aditivni-technologie-zprava-o-stavu-3d-tisku-pro-ceskou-technologickou-platformu-strojitenstvi-o-s-josef-hodek.html>

24. *Diagnostika vřeten obráběcích strojů* [online]. Ostrava, 2014 [cit. 2020-05-24]. Dostupné z: [https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/104882/OSM0004\\_FS\\_N2301\\_3909T001\\_72\\_2014.pdf?sequence=1](https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/104882/OSM0004_FS_N2301_3909T001_72_2014.pdf?sequence=1). Diplomová. VŠB –Technická univerzita Ostrava.
25. *SmarTechPublishing reported in December 2018 that the global additive manufacturing market 2018 is worth \$9.3 billion and sets 2018 growth at 18%* [online]. In: . [cit. 2020-04-21]. Dostupné z: <http://www.nstf.org.za/wp-content/uploads/2019/09/G-Booyesen-Customised-medical-applications-of-3D-printing.pdf>
26. *VÝROBA VRTÁKŮ TVÁŘENÍM A JEJICH VYUŽITÍ VPRAXI* [online]. [cit. 2020-07-01]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=65252](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=65252). Bakalářská. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ.
27. *Využití metody spékání kovových prášků laserem pro konstrukci řezných nástrojů*. Plzeň, 2014. Bakalářská. ZČU. Vedoucí práce Ing. Ivana ČESÁKOVÁ.
28. *Part-scale model for fast prediction of thermal distortion in DMLS additive manufacturing; Part 2: a quasi-static thermomechanical model* [online]. [cit. 2020-05-05]. Dostupné z: <http://utw10945.utweb.utexas.edu/sites/default/files/2016/026-Peng.pdf>
29. *Návrh aretačního zařízení frézovacího vřetene vodorovné vyvrtávačky skoaxiálním hlavním pohonem*. Plzeň, 2017. Diplomová. ZČU.
30. *Problematika výroby strojních kovových součástí 3D tiskem*. Plzeň, 2017. Disertační. ZČU.
31. *V ČEM SPOČÍVÁ VYVAŽOVÁNÍ. Vibro stroje - komplexní řešení v oblasti vyvažování* [online]. [cit. 2020-09-24]. Dostupné z: <https://www.vibrostroje.cz/cs/o-vyvažovani>
32. *Vyvažování tuhých rotorů* [online]. [cit. 2020-09-20]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/04049/index.html>
33. *Aktivní vyvažování jednotek vřeten obráběcích strojů* [online]. Brno, 2010 [cit. 2020-09-25]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=42105](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=42105). Bakalářská. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
34. *REGENERATIVNÍ KMITÁNÍ PŘI SOUSTRUŽENÍ* [online]. Brno, 2013 [cit. 2020-09-25]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/30293109.pdf>. Bakalářská. Fakulta strojního inženýrství.
35. *Sandvik Coromant introduces new 3D printed metal cutting tool to improve productivity* [online]. 2019 [cit. 2021-4-18]. Dostupné z: <https://3dprintingindustry.com/news/sandvik-coromant-introduces-new-3d-printed-metal-cutting-tool-to-improve-productivity-154451/>
36. HANZL, Pavel. *Využití metody spékání kovových prášků laserem pro konstrukci řezných nástrojů*. Plzeň, 2014. Bakalářská. ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI. Vedoucí práce Ing. Ivana Česánková.

## 7 Přílohy

### 7.1 Fyzikální vlastnosti pro konvenční frézu

Work Part Sestava\_Odlehcene\_Frezy\_plna\_stp.prt : 1--27--2020 10:38

Arrangement : MASTER

Information Units kg - mm

13 components contributed to the weight properties, as follows:

Component SROUB\_ID63\_STP, part sroub\_id63\_stp.prt

Component SESTAVA\_ODLEHCENE\_FREZY\_PLNA\_SOLIDS\_ID47\_STP, part  
Sestava\_Odlehcene\_Frezy\_plna\_SOLIDS\_id47\_stp.prt

Component SROUB\_ID63\_STP, part sroub\_id63\_stp.prt

Component SROUB\_ID63\_STP, part sroub\_id63\_stp.prt

Component SROUB\_ID63\_STP, part sroub\_id63\_stp.prt

Component VBD\_ID103\_STP, part VBD\_id103\_stp.prt

Component VBD\_ID103\_STP, part VBD\_id103\_stp.prt

Component VBD\_ID103\_STP, part VBD\_id103\_stp.prt

Component VBD\_ID103\_STP, part VBD\_id103\_stp.prt

Component SROUB\_ID63\_STP, part sroub\_id63\_stp.prt

Component SROUB\_ID63\_STP, part sroub\_id63\_stp.prt

Component VBD\_ID103\_STP, part VBD\_id103\_stp.prt

Component VBD\_ID103\_STP, part VBD\_id103\_stp.prt

Weight data was calculated

Accuracy used = 0.990000000



$$\text{Density} = 0.000007831$$

$$\text{Area} = 45437.125207796$$

$$\text{Volume} = 366542.302920510$$

$$\text{Mass} = 2.870260819$$

#### Center of Mass

$$X_{\text{cbar}} = 0.029820199$$

$$Y_{\text{cbar}} = -0.014062253$$

$$Z_{\text{cbar}} = 32.703342981$$

#### First Moments

$$M_{xc} = 0.085591749$$

$$M_{yc} = -0.040362333$$

$$M_{zc} = 93.867124006$$

#### Moments of Inertia (Work)

$$I_{xxw} = 5823.305513072$$

$$I_{yyw} = 5846.656003311$$

$$I_{zzw} = 4274.552549112$$

#### Moments of Inertia (Centroidal)

$$I_{xx} = 2753.536194489$$

$$I_{yy} = 2776.884699951$$

$$I_{zz} = 4274.549429164$$

Moments of Inertia (Spherical)

$$= 4902.485161802$$

Products of Inertia (Work)

$$P_{yz} = -1.507004621$$

$$P_{xz} = 3.226912931$$

$$P_{xy} = -0.430435757$$

Products of Inertia (Centroidal)

$$P_{yz} = -0.187021413$$

$$P_{xz} = 0.427776603$$

$$P_{xy} = -0.429232144$$

Principal Moments of Inertia

$$I_{xxp} = 4274.549572798$$

$$I_{yyp} = 2776.892566740$$

$$I_{zzp} = 2753.528184066$$

Radii of Gyration (Work)

$$R_{gxw} = 45.042667935$$

$$R_{gyw} = 45.132884405$$

$$R_{gzw} = 38.590877056$$

Radii of Gyration (Centroidal)

$$R_{gx} = 30.973102764$$

$$R_{gy} = 31.104143186$$

$$R_{gz} = 38.590862973$$

Radii of Gyration (Spherical)

$$= 41.328292508$$

Principal Axes

$$X_p(X) = -0.000281209$$

$$X_p(Y) = 0.000124795$$

$$X_p(Z) = 0.999999953$$

$$Y_p(X) = 0.018376605$$

$$Y_p(Y) = 0.999831129$$

$$Y_p(Z) = -0.000119606$$

$$Z_p(X) = -0.999831096$$

$$Z_p(Y) = 0.018376570$$

$$Z_p(Z) = -0.000283455$$

## 7.2 Fyzikální vlastnosti pro Krakena

Work Part Kraken\_20\_8\_2019\_Final\_TGS.prt : 1--27--2020 10:26

Component Group Used : AllComponents (Component count : 13)

Arrangement : Arrangement 1

Work part properties:

Weight data was calculated

Accuracy used = 0.990000000

Density = 0.000007831 kg/mm<sup>3</sup>

Area = 56167.815972357 mm<sup>2</sup>

Volume = 127075.824994030 mm<sup>3</sup>

Mass = 0.995085038 kg

Center of Mass

Xcbar = 0.000076290 mm

Ycbar = -28.277690713 mm

Zcbar = 0.000239457 mm

First Moments

Mxc = 0.000075915 kg·mm

Myc = -28.138706945 kg·mm

Mzc = 0.000238281 kg·mm

Moments of Inertia (Work)

Ixxw = 1625.950776882 kg·mm<sup>2</sup>

Iyyw = 1101.001911105 kg·mm<sup>2</sup>

Izzw = 1611.236349924 kg·mm<sup>2</sup>

Moments of Inertia (Centroidal)

Ixx = 830.253124768 kg·mm<sup>2</sup>

Iyy = 1101.001911042 kg·mm<sup>2</sup>

$$I_{zz} = 815.538697860 \text{ kg}\cdot\text{mm}^2$$

#### Moments of Inertia (Spherical)

$$= 1373.396866835 \text{ kg}\cdot\text{mm}^2$$

#### Products of Inertia (Work)

$$P_{yzw} = -0.006395679 \text{ kg}\cdot\text{mm}^2$$

$$P_{xzw} = -0.493183073 \text{ kg}\cdot\text{mm}^2$$

$$P_{xyw} = -0.001336238 \text{ kg}\cdot\text{mm}^2$$

#### Products of Inertia (Centroidal)

$$P_{yz} = 0.000342343 \text{ kg}\cdot\text{mm}^2$$

$$P_{xz} = -0.493183091 \text{ kg}\cdot\text{mm}^2$$

$$P_{xy} = 0.000810469 \text{ kg}\cdot\text{mm}^2$$

#### Principal Moments of Inertia

$$I_{xxp} = 1101.001911045 \text{ kg}\cdot\text{mm}^2$$

$$I_{yyp} = 830.269636243 \text{ kg}\cdot\text{mm}^2$$

$$I_{zzp} = 815.522186382 \text{ kg}\cdot\text{mm}^2$$

#### Radii of Gyration (Work)

$$R_{gxw} = 40.422539933 \text{ mm}$$

$$R_{gyw} = 33.263193195 \text{ mm}$$

$$R_{gzw} = 40.239217557 \text{ mm}$$

#### Radii of Gyration (Centroidal)

$$R_{gx} = 28.885185520 \text{ mm}$$

$$R_{gy} = 33.263193194 \text{ mm}$$

$$R_{gz} = 28.628077783 \text{ mm}$$

#### Radii of Gyration (Spherical)

$$= 37.150779275 \text{ mm}$$

Principal Axes

Xp(X)	=	-0.000002996
Xp(Y)	=	1.000000000
Xp(Z)	=	-0.000001204
Yp(X)	=	0.999440035
Yp(Y)	=	0.000003034
Yp(Z)	=	0.033460660
Zp(X)	=	0.033460660
Zp(Y)	=	-0.000001104
Zp(Z)	=	-0.999440035

Warnings Generated by the Weight Calculation:

Surface Area	52811.8821	mm <sup>2</sup>	
Volume	124993.6937	mm <sup>3</sup>	
Center of Gravity	Point( -6.6898e-05, -28.7251, 0.0003)	mm	
Mass	0.9999	kg	
Weight	9.8062	N	
Moment of Inertia	{ 1634.0660, 1067.2119, 1619.0359}	kg·mm <sup>2</sup>	
Radii of Gyration	{ 40.4246, 32.6690, 40.2383}	mm	
Principal Axes (Xp)	Vector( 2.1793e-06, 1.0000, -1.7027e-05)		
Principal Axes (Yp)	Vector( 0.9994, -1.5892e-06, 0.0346)		
Principal Axes (Zp)	Vector( 0.0346, -1.7093e-05, -0.9994)		
Principal Moments	{ 1067.2119, 808.9964, 793.9303}	kg·mm <sup>2</sup>	

### 7.3 Fyzikální vlastnosti pro Sandwick CoroMill® 245

Fyzikální vlastnosti pro R245-125Q40-18H\_202544550\_mod\_0\_0~tm02\_00

Obecné vlastnosti:

Materiál: {}

Hustota: 7.850 g/cm<sup>3</sup>

Hmotnost: 3.211 kg (Relativní chyba = 0,007449%)

Plocha: 57704.910 mm<sup>2</sup> (Relativní chyba = 0,003760%)

Objem: 408981.305 mm<sup>3</sup> (Relativní chyba = 0,007449%)

Těžiště:

X: 0.000 mm (Relativní chyba = 0,007449%)

Y: -0.000 mm (Relativní chyba = 0,007449%)

Z: -33.963 mm (Relativní chyba = 0,007449%)

Hmotové momenty setrvačnosti s ohledem na těžiště (Vypočteno pomocí negativního integrálu)

$I_{xx}$  4018.087 kg mm<sup>2</sup> (Relativní chyba = 0,007449%)

$I_{yx}$   $I_{yy}$  -0.001 kg mm<sup>2</sup> (Relativní chyba = 0,007449%) 4065.498 kg mm<sup>2</sup>  
(Relativní chyba = 0,007449%)

$I_{zx}$   $I_{zy}$   $I_{zz}$  0.022 kg mm<sup>2</sup> (Relativní chyba = 0,007449%) -0.004 kg mm<sup>2</sup> (Relativní  
chyba = 0,007449%) 6752.178 kg mm<sup>2</sup> (Relativní chyba = 0,007449%)

Momenty hmotnosti nečinnosti s ohledem na globální (Vypočteno pomocí negativního integrálu)

$I_{xx}$  7721.365 kg mm<sup>2</sup> (Relativní chyba = 0,007449%)

$I_{yx}$   $I_{yy}$  -0.001 kg mm<sup>2</sup> (Relativní chyba = 0,007449%) 7768.776 kg mm<sup>2</sup>  
(Relativní chyba = 0,007449%)

$I_{zx}$   $I_{zy}$   $I_{zz}$  0.048 kg mm<sup>2</sup> (Relativní chyba = 0,007449%) -0.006 kg mm<sup>2</sup> (Relativní  
chyba = 0,007449%) 6752.178 kg mm<sup>2</sup> (Relativní chyba = 0,007449%)

Hlavní momenty setrvačnosti s ohledem na těžiště

$I_1$ : 4018.087 kg mm<sup>2</sup> (Relativní chyba = 0,007449%)

$I_2$ : 4065.498 kg mm<sup>2</sup> (Relativní chyba = 0,007449%)

$I_3$ : 6752.178 kg mm<sup>2</sup> (Relativní chyba = 0,007449%)

Rotace z globálního na hlavní

$R_x$ : -0.00 deg (Relativní chyba = 0,007449%)

$R_y$ : -0.00 deg (Relativní chyba = 0,007449%)

$R_z$ : -0.00 deg (Relativní chyba = 0,007449%)