

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství

Studijní zaměření: Strojírenská technologie – technologie obrábění

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Využití uhlíkových kompozitů v oblasti rezných
nástrojů a nástrojových upínačů

Autor: **Bc. Miloslav Štýs**

Vedoucí práce: **Ing. Pavel Kožmín, Ph.D.**

Akademický rok 2015/2016

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Miloslav ŠTÝS**
Osobní číslo: **S14N0083P**
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Strojírenská technologie - technologie obrábění**
Název tématu: **Využití uhlíkových kompozitů v oblasti řezných nástrojů a nástrojových upínačů**
Zadávající katedra: **Katedra technologie obrábění**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Úvod, definice a cíle DP
2. Potenciál využívání uhlíkových kompozitních materiálů
3. Návrh řešení řezného nástroje s VBD s využitím kompozitů a návrh celokovového provedení
4. Testování řezného nástroje s využitím kompozitů a návrh souhrnného provedení v řezném procesu
5. Experiment
6. Souhrnné hodnocení testovaných variant
7. Závěr

Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Rozsah kvalifikační práce: **50 - 70 stran**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**
Seznam odborné literatury:

- **AGARWAL, Bhagwan D. a BROUTMAN, Lawrence J. Vláknové kompozity: Celost. vysokošk. příručka pro vys. školy techn. 1. vyd. Praha: SNTL, 1987. 294 s.**
- **MÁDL, Jan. Optimalizace řezných podmínek v teorii obrábění: doplňkové skriptum. 4. vyd. Praha: ČVUT, 1990. 58 s. ISBN 80-01-00323-X.**
- **MÁDL, Jan a SCHUBERT, Vilém. Základy experimentálních metod a optimalizace v teorii obrábění: Určeno pro posl. fak. strojní. [2.], přeprac. vyd. Praha: ČVUT, 1974. 145 s.**
- **SWOBODA, Helmut. Moderní statistika. Praha: Svoboda, 1977. 351 s.**
- **PEACE, Glen Stuart. Taguchi methods: a hands-on approach. Reading: Addison-Wesley, 1993. xxvi, 522 s. ISBN 0-201-56311-8.**

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Pavel Kožmín, Ph.D.**
HOFMEISTER s.r.o.
Konzultant diplomové práce: **Ing. Miroslav Zetek, Ph.D.**
Katedra technologie obrábění

Datum zadání diplomové práce: **18. října 2015**
Termín odevzdání diplomové práce: **20. května 2016**



Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan



Doc. Ing. Jan Rehoř, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 20. října 2015

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

Autorská práva

Podle Zákona o právu autorském. č.35/1965 Sb. (175/1996 Sb. ČR) § 17a Zákona o vysokých školách č. 111/1998 Sb. je využití a společenské uplatnění výsledků bakalářské práce, včetně uváděných vědeckých a výrobně-technických poznatků, nebo jakékoliv nakládání s nimi možné pouze na základě autorské smlouvy za souhlasu autora a Fakulty strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Poděkování

Děkuji svému vedoucímu diplomové práce, panu Ing. Pavlu Kožmínovi, Ph.D., za odborné vedení, profesionální přístup během konzultací, které byly velkým přínosem ohledně řešené problematiky. Dále bych chtěl zmínit, že jsem panu doktorovi velice zavázán za začlenění mé osoby do schůzek, týkajících se vývoje nástrojů a upínačů, jejichž výsledkem je rozšíření mého povědomí o možnostech kompozitních materiálů. Za možnost podílet se na vývoji nástrojových variant děkuji firmě Hofmeister s.r.o.

Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Kamilu Sedlákovvi, Ph.D. za uvedení do problematiky měření laserovým vibrometrem, panu Ing. Michalovi Křížkovi, Ph.D. za cenné rady při získávání modálních vlastností jednotlivých sestav. Děkuji také panu Ing. Vyšatovi, Ph.D. za zapůjčené nahrávací zařízení a v neposlední řadě panu Ing. Zetkovi, Ph.D. za asistenci při zajišťování měřicí aparatury.

Děkuji také své rodině za podporu při studiu na fakultě strojní.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Štýs	Jméno Miloslav	
STUDIJNÍ OBOR	N2301 „Strojírenská technologie – technologie obrábění“		
VEDOUCÍ PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Kožmín, Ph.D.	Jméno Pavel	
PRACOVISŤE	Hofmeister s.r.o.		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Využití uhlíkových kompozitů v oblasti řezných nástrojů a nástrojových upínačů		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KTO	ROK ODEVZD.	2016
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	99	TEXTOVÁ ČÁST	70	GRAFICKÁ ČÁST	29
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

<p>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</p> <p>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</p>	<p>Tato práce je zaměřena na prokázání přínosu uhlíkových kompozitních materiálů v konstrukci frézovacího nástroje a v konstrukci rotačního hydraulického HSK upínače. Cílem této práce bylo stanovit metodiku, která subjektivně posoudí přínos uhlíkových vláken v těchto aplikacích. Hodnocení se týká především dynamických vlastností sestav. Ověřit funkcionální kompozitního nástroje s VBD a zanalyzovat jeho chování v řezném procesu. Při hodnocení je řešena problematika vibrací, rezonance a vlastních frekvencí nástrojů. Speciální nástrojové sestavy byly porovnány se standardní.</p>
<p>KLÍČOVÁ SLOVA</p> <p>ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</p>	<p>CFRP, uhlíkové kompozitní materiály, modální analýza, vibrace, HFC, frézování</p>

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Štýs	Name Miloslav		
FIELD OF STUDY	„Manufacturing Processes – Technology of Metal Cutting “			
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Kožmín, Ph.D.	Name Pavel		
INSTITUTION	ZČU - FST – KTO			
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable	
TITLE OF THE WORK	Use of carbon composites in cutting tools and tool holders			

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Machining Technology	SUBMITTED IN	2016
----------------	------------------------	-------------------	----------------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	99	TEXT PART	70	GRAPHICAL PART	29
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	The master thesis deals with the benefits of composite material in construction of milling tool and hydraulics tool holder HSK A63. This thesis focuses on the creating of methodology, which could be able to determine real benefits of composite material in cutting process very objective. The assessment of cutting tool contains the view on dynamic properties of testing cutting tools, relationship between vibrations and natural frequencies, values of tool shank vibration in experimental testing.
KEY WORDS	CFRP, carbon fiber composites material, modal analysis, vibration, HFC, milling

Obsah

Přehled použitých veličin:	9
1 Úvod.....	11
1.1 Cíle práce.....	12
2 Potenciál využívání uhlíkových kompozitních materiálů	14
2.1 Vlastnosti uhlíkových vláknových kompozitů	15
2.1.1 Objemové množství vláken.....	16
2.2 Uhlíková vlákna.....	16
2.2.1 Výroba vláken	16
2.3 Matrice.....	17
2.3.1 Polymerní matrice z epoxidové pryskyřice	17
2.4 Výrobní technologie kompozitních materiálů- CompoTech.....	17
2.4.1 Přiblížení výroby kompozitních součástí	17
2.4.2 CFRP pro HSK upínač a frézovací nástroj.....	18
2.5 Analýza současného stavu v konstrukci nástrojových upínačů a řezných nástrojů ..	18
2.5.1 Požadavky na nástrojové upínače	18
2.5.2 Druhy rotačních upínačů	19
2.5.3 Požadavky na nástroje.....	20
2.5.4 Speciální nástroje potlačující vibrace.....	21
3 Návrh nástroje a HSK upínače s využitím kompozitních materiálů	22
3.1 Kompozitní upínač	22
3.1.1 Základní parametry upínače	22
3.2 Kompozitní fréza	23
3.2.1 Síly působící na nástroj	24
3.2.2 Kompozitní část.....	24
3.2.3 Stopka nástroje	25
3.2.4 Ocelová hlava	25
3.2.5 Vyměnitelné břitové destičky.....	25
3.2.6 Nástrojové úhly frézy	26
4 Testování standardní nástrojové sestavy a testování nástrojových sestav s využitím kompozitního materiálu.....	28
4.1 Obráběcí stroj pro testování nástrojových sestav	29
4.2 Příprava polotovaru	29
4.2.1 Tepelné zpracování	29
4.2.2 Měření tvrdosti obrobku.....	29

4.3	Upnutí obrobku.....	30
4.4	Návrh řezných podmínek.....	30
4.5	Pre-experiment č. 1.....	31
4.5.1	Test funkcionality.....	31
4.5.2	Strategie frézování.....	31
4.5.3	Průběh pre-experimentu č. 1	32
4.5.4	Akustická emise	33
4.6	Pre-experiment č. 2.....	34
4.6.1	Průběh pre-experimentu č.2	34
4.7	Shrnutí pre-experimentů	35
4.8	Modální analýza	37
4.8.1	Průběh testování	39
4.8.2	Rozbor signálu.....	40
4.8.3	Hodnocené parametry	42
4.9	Měření vibrací nástroje.....	42
4.9.1	Laserový vibrometr	42
4.9.2	Kalibrace přístroje	43
4.9.3	Strategie frézování.....	43
4.9.4	Průběh testování	45
4.9.5	Získaný signál	47
4.9.6	Rozbor záznamů.....	48
4.9.7	Hodnocené parametry	49
5	Experimentální část.....	51
5.1	Výstupy z modální analýzy – tlumící charakteristiky	51
5.1.1	Varianta A vs. varianta B	51
5.1.2	Varianta A vs. varianta C	52
5.1.3	Varianta A vs. varianta D.....	55
5.2	Výstupy z modální analýzy - frekvenční charakteristiky	57
5.2.1	Varianta B	59
5.2.2	Varianta C	59
5.2.3	Varianta D	60
5.3	Výstupy z modální analýzy – limitní šířka třísky.....	61
5.4	Výstupy z měření vibrací nástroje	64
5.4.1	Efektivní rychlost kmitání nástrojových sestav	64
5.4.2	Zobrazení reálných kmitů.....	68

6	Souhrnné hodnocení testovaných variant.....	70
6.1	Možné směry hodnocení.....	70
6.2	Ekonomické hodnocení	70
6.2.1	Stanovení normy času	70
7	Závěr.....	74
	Seznam použité literatury	75
	Použitý software.....	78
	Seznam obrázků	79
	Seznam tabulek	80
	Seznam grafů.....	81
	Seznam příloh.....	82
	Seznam příloh – volně vložených	82

Přehled použitých veličin:

a_p	axiální hloubka třísky [mm]
a_e	radiální hloubka řezu [mm]
b	šířka odřezávané vrstvy [mm]
b'	koeficient viskózního útlumu [$N \cdot s \cdot m^{-1}$]
b_{lim}	limitní šířka třísky [mm]
D	průměr stopky nástroje [mm]
E	modul pružnosti v tahu [MPa]
E_k	kinetická energie [J]
f	frekvence [Hz]
f_{vz}	vzorkovací frekvence [Hz]
f_z	posuv na zub [mm]
F_{cN1}	radiální složka řezné síly [N]
F_c	hlavní složka řezné síly [N]
F_1	výslednice sil [N]
$F(t)$	vstupní buzení [N]
$F(\omega)$	Fourierův obraz buzení
G	modul pružnosti ve smyku [MPa]
$G_o^{neg}(f)$	minimum reálného kořene záporné části frekvenční odezvové funkce
h	tloušťka odřezávané vrstvy [mm]
$H(\omega)$	frekvenční odezvová funkce
J	kvadratický moment k ose průřezu [m ⁴]
k	koeficient tuhosti systému [$N \cdot m^{-1}$]
$k_{c1.1}$	specifická řezná síla [$N \cdot mm^{-2}$]
k_c	měrný řezný odpor [$N \cdot mm^{-2}$]
K	korekční faktor [-]
n	otáčky nástroje [$1 \cdot min^{-1}$]
N	celý počet vln [-]
m	hmotnost [kg]
m_c	faktor tloušťky třísky [-]
P_{ef}	efektivní výkon [W]
Q	úběr materiálu [$cm^3 \cdot min^{-1}$]
R_m	mez pevnosti v tahu [$N \cdot mm^{-2}$]
v_{ef}	efektivní rychlost kmitání [$m \cdot s^{-1}$]
v_c	řezná rychlost [$m \cdot min^{-1}$]
v_f	posuvová rychlost [$mm \cdot min^{-1}$]
w	průhyb [m]
$X(\omega)$	Fourierův obraz odezvy
z	počet zubů nástroje
z'	počet zubů v záběru

Řecké znaky:

β	korekční součinitel [-]
δ	průhyb nástroje [m]
γ	relativní tlumení systému [-]
$\Delta\varphi$	přírůstek úhlu opsaného obrobkem [rad]
$\Delta\varphi'$	přírůstek úhlu opsaného nástrojem [rad]
δ	konstanta útlumu [-]
ε	posun fáze [rad]
η	účinnost stroje [-]
κ	koeficient naladění [-]
φ	fázový posun [°]
Σ	ukazatel násobného zvýšení tuhosti [-]
φ_{max}	úhel záběru nástroje [rad]
ω	úhlová rychlost [rad·s ⁻¹]
ω'	úhlová rychlost nástroje [rad·s ⁻¹]
Ω_0	vlastní frekvence netlumené soustavy [Hz]

Zkratky:

A/D	analogově digitální převodník
AE	akustická emise
CAD	computer aided design
CAM	computer aided manufacturing
CFRP	carbon fiber reinforced polymer (uhlíková vlákna v polymerní matrici)
DFT	Diskrétní Fourierova transformace
FFT	rychlá Fourierova transformace
FRF	frekvenční odezвовá funkce
HPC	high power cutting
IEPE	integrated electronic piezoelectric accelerometer
PAN	polyakrylonitrilová vlákna
VBD	vyměnitelná břitová destička

1 Úvod

Zvyšování produktivity procesů v obrábění je klíčem ke snížení celkových nákladů. Proces obrábění je dynamický jev, který je vždy doprovázen chvěním určitého charakteru, vyvolaný kolísáním řezné síly (důsledek proměnných záběrových podmínek: vstupní fáze, stacionární fáze, výstupní fáze), proměnlivou tuhostí a změnou třecí komponenty. Vynucené či samobuzené kmitání má negativní dopad na výkonové využití obráběcího stroje/nástroje, tvarovou přesnost obrobené součásti (vliv i při hrubovacích operacích – koeficient zpřesnění), jakost obrobených ploch, trvanlivost bříty, zatížení a životnost stroje a v neposlední řadě na pracovní prostředí.

Samotný děj kmitání určitého členu ze soustavy S-N-O nelze nikdy zcela potlačit, nicméně lze tomuto nežádanému jevu předejít a eliminovat jej například vhodným nastavením strukturálních vlastností stroje, nástroje a částečně i obrobku (kvalita tepelného zpracování, která zajistí vysoký stupeň homogenity obrobku). Pomocí přenastavení a úprav procesu obrábění se v pozitivním výsledku dosáhne akceptovatelné míry vibrací s ohledem na produktivitu, respektive ekonomickou stránku věci. Při nalezení optimálních parametrů pro obrábění lze považovat proces za efektivní. Tento stav je chápán jako proces, při kterém jsou podmínky všech zapojených členů na samotné hranici maximálních užitečných vlastností, tedy podmínky stroje a nástroje; mj. je možné tento stav označit jako mez stability obrábění. Tohoto stavu není v technické praxi běžně dosahováno a obráběcí stroje a nástroje nejsou často plně využity. Celá problematika tzv. naladění např. procesu frézování je z hlediska odůvodnění nastávajících jevů velice složitá a není jednoduché predikovat chování celé soustavy v určitém okamžiku. Do procesu vstupuje řezná síla jako základní projev řezného procesu, řezné a záběrové podmínky nástroje, geometrie nástroje, míra opotřebení, řezný odpor a mnoho dalších faktorů. V současné době není k dispozici matematický model popisující dynamický proces obrábění, který by změnu nejen těchto faktorů korektně jak předpovídal, tak i zaváděl příslušné úpravy řezného procesu (adaptivní řízení řeší jen část uvažovaného procesu). Ty by sloužily k odstranění nežádoucí ztráty stability a vzniku kritických kmitů nástroje v určité oblasti. Dle této predikce na základě zahrnutých parametrů např. zrychlení stroje, špičky řezných sil, čas běhu atd. by byly upraveny dráhy nástroje a řezné podmínky tak, aby se zajistila stabilita, uvažovala poddajnost obrobku, atd. Tento nástroj se poté může vhodně integrovat do CAD/CAM systému a vytvořit tak ucelené propojení pro návrh a řízení řezných podmínek s vysokou efektivitou. Současně používané metody jsou časově velice náročné, nehledě na dosahovanou přesnost výsledku cca $\pm 30\%$. Tento rozptyl je stále příliš velký, a proto je standardním přístupem za účelem eliminace chvění zvyšovat tuhost limitujícího členu soustavy.

Běžné přístupy pro zvýšení statické a dynamické tuhosti strojů a nástrojů postupují ve smyslu zvyšování hmoty. Výsledkem může být tuhý stroj či nástroj, nicméně se zásadně horší dynamikou, nehledě na nutnost nasazení výkonnějších pohonných jednotek (motory vřeten, pohony jednotlivých os), což nepříznivě promlouvá do nákladů na energii spotřebovanou pro opracování konkrétních dílců, nebo do samotné vzrůstající ceny stroje či nástroje vlivem použití většího objemu materiálu. Nastává tedy otázka, kam zacílit inovace snižující vibrace při obrábění a zvyšující tím produktivitu.

Moderním směrem pro snížení nákladů obrábění a zvýšení efektivity řezného procesu je začleňování netradičních materiálů do oblasti konstrukce strojů a jejich příslušenství. Touto výzvou jsou právě uhlíkové kompozity. Nejčastěji jsou aplikovány pro konstrukce strojů, nástrojů a upínací techniky. Právě tyto materiály mohou posunout celou oblast směrem k vyšší produktivitě. Často jsou z těchto materiálů tvořeny příčnický strojů, hlavy portálových center, vřetena atd. Výsledkem je zásadní zvýšení dynamické tuhosti a tlumících vlastností stroje, menší spotřeba energie chodu stroje, apod. Posouvání limitů strojů se děje v součinnosti

s vývojem obráběcích strategií, jakou je například trochoidní frézování v podobě funkce *iMachining* SW SolidCAM. Do interakce S-N-O samozřejmě vstupují i limity nástroje, které je nutné taktéž posouvat, aby právě ony nebyly nejslabším článkem řetězce. Tento fakt si uvědomuje firma Hofmeister s.r.o., která v důsledku neustálého zlepšování „nejslabších článků“ rezného procesu aplikovala uhlíková vlákna na nástrojový upínač a frézovací nástroj. Momentálně je nutné přínos těchto speciálů prokázat a získat charakter jejich chování při frézování. Koncepce vychází z požadavku trhu pro zvýšení produktivity obrábění s vysokým vyložení nástroje, kde jsou právě vibrace limitujícím faktorem. Ideálním strojem pro osazení tohoto speciálního nářadí je frézovací centrum s lineárními pohony nabízející vysokou dynamiku procesu.

1.1 Cíle práce

Vývoji speciálního nástroje a speciálního rotačního nástrojového upínače předcházelo použití kompozitního materiálu na prototyp stacionárního držáku určeného pro soustružnická centra. U této nerotační varianty byl přínos jednoznačně prokázán na základě hodnocení kvality jakosti obrobených ploch v porovnání s běžně používanými ocelovými držáky. V minulosti tento výzkum provedla firma Hofmeister s.r.o. Právě pozitivní hodnocení stacionárního nástrojového upínače s využitím kompozitů bylo impulzem pro zcela nový koncept rotačního hydraulického nástrojového upínače s využitím kompozitů a koncept speciálního rezného nástroje v podobě frézy, který obsahuje také části z uhlíkových kompozitů. Tyto zcela nové aplikace budou vystaveny daleko vyššímu dynamickému zatížení, které vychází z principu jejich použití pro frézovací obráběcí centra. Právě vysoká dynamika by mohla přispět k prokázání přínosu uhlíkových vláken v daleko větším rozsahu, nežli tomu bylo u stacionární varianty.

Cílem práce bylo objektivně prokázat potenciál uhlíkových kompozitních materiálů u frézovacího nástroje a rotačního hydraulického HSK upínače a říci, zda je tento směr vývoje správný, či nikoliv. Z důvodu posouzení bylo nutné navrhnout metodiku, která bude věrohodným nástrojem pro hodnocení přínosu kompozitního materiálu. Úkolem této práce bylo zhodnotit vibrace jednotlivých variací dvou typů rotačních hydraulických HSK upínačů a dvou typů fréz s VBD. Geometrie rezných nástrojů je určena pro vysoko-posuvové frézování, tedy technologii HFC („High Feed Cutting“). Do hodnocení byl začleněn standardní hydraulický upínač od fy Schunk a standardní ocelový frézovací nástroj s VBD. Cílem bylo sestavit komplexní pohled na chování všech možných kombinací nástroj-upínač (celkem čtyři varianty) a určit tak nejvhodnější variantu pro výkonné hrubování.

Pro hodnocení bylo klíčové zpracovat frekvenční odezvové funkci FRF („Frequency Response Function“) a časovou funkci („Time Domain Function „), které představovaly výstupy z prvního experimentu - modální analýzy. Na základě získaných dat bylo úkolem zobrazit frekvenční charakteristiky a určit vlastní frekvence jednotlivých nástrojových sestav, určit tlumící vlastnosti jednotlivých sestav a vypočítat limitní šířku třísky.

Dalším z podstatných cílů byla analýza nástrojů v rezném procesu, při kterém bylo nutné popsat jejich chování z hlediska kmitání. Pro hodnocení byl použit faktor rychlosti kmitání nasnímaných vibrací v oblasti stopky nástroje. Rychlost vibrací byla snímána pomocí laserového vibrometru PVD-100 od fy Polytec.

Nástrojová sestava	Materiál HSK rotační hydraulického upínače	Materiál těla nástroje
Varianta A	Ocel	Ocel
Varianta B	CFRP	Ocel
Varianta C	Ocel	CFRP
Varianta D	CFRP	CFRP

Tabulka č. 1: Testované varianty nástrojových sestav

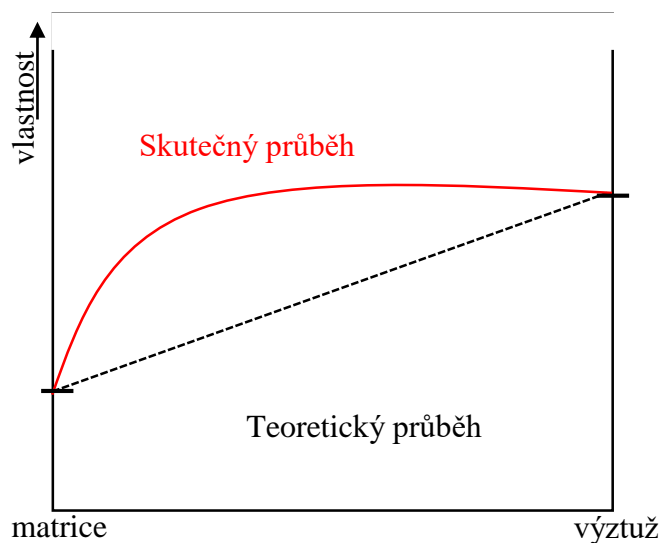


Obrázek č. 1: Testované nástrojové sestavy (A, B, C, D)

2 Potenciál využívání uhlíkových kompozitních materiálů

Význam slova „kompozitní“ lze definovat jako složený ze dvou nebo více lišících se substancí. Jako kompozitní materiál lze považovat seskupení dvou a více složek mající rozdílné fyzikální a mechanické vlastnosti, které jsou značně odlišné od vlastností výsledného kompozitního materiálu. Jednou složkou je matrice (pojivo), druhou složkou vyztužující vlákna. Sloučením těchto složek vzniká heterogenní směs se specifickými vlastnostmi, které nelze získat z jakéhokoliv materiálu jedné fáze [1].

Samotný potenciál je ukryt ve výhodných fyzikálně mechanických vlastnostech, které vznikají pomocí složení spojitě fáze (matrice) a nespojitě fáze (výztuže). Každá složka kompozitního materiálu si zachovává své přednosti a dociluje se tím výrazně lepších fyzikálně mechanických vlastností. Lze tedy vytvořit takto inteligentní materiál, který ve své heterogenní struktuře nabízí na jedné straně vysokou pevnost a tuhost v určitém směru a na straně druhé poddajnost a plasticitu. Právě touto skutečností se kompozitní materiály liší od kovových materiálů a plastů. Do výsledných vlastností této heterogenní struktury zasahuje tzv. synergismus, který popisuje vztah mezi vlastnostmi jednotlivých fází kompozitního materiálu a vlastnostmi celku. Celek v podobě finálního kompozitního dílce dosahuje lepších fyzikálně mechanických hodnot nežli pouze poměrný součet vlastností jednotlivých složek systému. Tato schopnost je stěžejní výhodou, která upřednostňuje tyto materiály před kovovými slitinami a plasty. Vláknové kompozitní materiály na bázi polymeru lze klasifikovat dle použité matrice (termoplasty, termosety), dle geometrického tvaru vláken (vláknové, částicové, skeletové), případně dle aplikací.



Obrázek č. 2: Synergické chování kompozitního materiálu

Způsoby použití kompozitních materiálů jsou limitovány směrem působícího zatížení, jelikož kompozit jako celek vykazuje anizotropní vlastnosti. Nejvyšší pevnost lze získat ve směru vyztužujících vláken. Pokud je zatížení jiného charakteru, je zapotřebí umístit vlákna i v dalším směru a přiblížit tak pevnostní vlastnosti izotropnímu stavu. S počtem narůstajících směrů, ve kterých jsou vlákna ukládána, roste časová náročnost výroby a pochopitelně i výsledná cena produktu. Momentálním předmětem vývoje je mimo jiné vytvořit kompozitní materiál s izotropními vlastnostmi. Nutno zdůraznit, že v odborné literatuře se objevují tzv. „pitchbased isotropic carbon fibers“, která vykazují izotropní strukturu, nicméně nejsou vhodná pro vysoce namáhané strojná části [2].

Předností uhlíkových kompozitních materiálů je skutečnost, že lze v našem případě navržený nástroj a nástrojový upínač dimenzovat na základě předpokládaného pole deformací, a tedy v místech s vysokým namáháním zajistit dostatek vhodných vyztužujících elementů oproti méně namáhaným partiím. Pro navržené součásti z oceli je platná podmínka pevnosti dle jedné materiálové konstanty (např. maximální dovolené napětí v tahu) nebo pouze jedna hypotéza (uváženo pro obecné podmínky napjatosti), kdežto u kompozitních materiálů je nutné zohlednit hlavní osy namáhání a pro ně určit různé hodnoty pevnostních limitů. Při provedení korektního pevnostního návrhu předmětu je nutné zodpovědně přistoupit i k samotné výrobě. Poté lze očekávat požadované přednosti, pro jejichž dosažení byl zvolen právě kompozitní materiál [3].

Aplikace vláknových kompozitních materiálů jistým způsobem motivuje možnost zvýšení statické a dynamické tuhosti, modálních vlastností (vlastní tvary kmitů, vlastní frekvence a tlumení) a snížení hmotnosti.

2.1 Vlastnosti uhlíkových vláknových kompozitů

Použitý kompozitní materiál je složen ze spojitého konstituentu, čili matrice, a z vyztužujících složek. Při poměru délky k průměru vlákna větším než sto platí, že se jedná o dlouhá vlákna. Kompozitní materiál se neskládá pouze z oblastí konstituentů, tedy matrice a vláken, ale také z přechodových pásem, která vykazují odlišné vlastnosti. Pro zlepšení pojivových vlastností lze využít speciální činidla. Výztuž má obvykle vyšší mechanické vlastnosti oproti matrici. Při vnějším zatížení kompozitu jako celku vznikají smykové síly na rozhraní vlákno/matrice, a to vlivem větší deformace polymerní matrice oproti uhlíkovým vláknům, které vykazují až o dva řády vyšší pevnost. Chování kompozitu při vnějším zatěžování závisí i na podílu složek, uspořádání výztuže a kvalitě mezi-složkového rozhraní [4].

Tato práce pojednává o využití tzv. CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) kompozitním materiálu, který je tvořen kombinací uhlíkových vláken o vysokém modulu pružnosti a vláken o vysoké pevnosti.

Přínosy kompozitního materiálu lze očekávat v těchto směrech [5]:

- úspora hmotnosti součásti (cca 4x lehčí ve srovnání s ocelí)
- vysoká tuhost (cca 1,5x vyšší ve srovnání s ocelí)
- zvýšení vlastní frekvence součásti (cca 2x)
- vysoký útlum (až 12x vyšší než ocel)
- zvýšení dynamické tuhosti (cca 7x ve srovnání s ocelí)
- vysoká pevnost
- potenciální zvýšení produktivity (závisí na aplikaci)
- směrově orientované vlastnosti
- chemická odolnost
- odolnost proti korozi

Ze zmíněných faktorů lze odvodit další předpokládané vlastnosti, které mají vliv na řezný proces. Snížená hmotnost má pozitivní vliv na setrvačné účinky, které jsou několikanásobně vyšší u frézování s vysokými posuvy. Právě setrvačnost hraje hlavní roli při ostrých přechodech drah nástroje, které jsou typické pro frézování hlubokých kapes v oblasti výroby forem. Snížená hmotnost vyplývající z fyzikálních vlastností použitého kompozitního materiálu také vstupuje do energetické náročnosti provozu obráběcích strojů, které budou osazeny těmito nestandardními variantami. Snazší roztočení vřetena může vést k jisté úspoře elektrické energie. Se zvýšenou tuhostí nástroje se zvyšuje stabilita v řezném procesu. Co se týká

tlumících vlastností, jedná se o ukazatel, který lze chápat jako míru absorpce energie v podobě kmitů, s pozitivním dopadem na stabilitu obrábění a trvanlivost bříty.

2.1.1 Objemové množství vláken

Tento ukazatel má zásadní vliv na výsledné vlastnosti kompozitu. Při vzrůstajícím objemu vláken se dosahuje vyšší pevnosti a tuhosti, nicméně je nutné, aby objem vláken nepřesáhl určitou mez, při které by nebylo zajištěno dostatečně široké pásmo rozhraní matrice/vlákně. Obecně se u CFRP kompozitních materiálů objem vláken pohybuje okolo 60%.

2.2 Uhlíková vlákna

Jedná se o vázané atomy uhlíku v dlouhých vláknech. Průměr uhlíkového vlákna se pohybuje v rozmezí od 5-8 μm . Orientace krystalových útvarů spojených uhlíků lze přirovnat paralelnímu svazku kopírující osu vlákna. Rozlišujeme dva typy uhlíkových vláken, a to vysoko-pevnostní (HS- high strength) a vysoko-modulová (HM- high modulus).

Typ vlákna		Uhlíkové - HS	Uhlíkové - HM	Skleněná
Modul pružnosti v podélném směru	GPa	230	640 -760	74
Modul pružnosti v příčném směru	GPa	15	6	74
Modul pružnosti ve smyku	GPa	50	20	30
Pevnost v tahu	MPa	5 000	3 800	2100
Hustota	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	1 600	1 900	2500

Tabulka č.1 – Mechanické vlastnosti vláken [6]

Absolutní počet poruch závisí na objemu materiálu, čili i na průměru vlákna. Teoreticky lze uvažovat, že v menším objemu je menší počet poruch, a tudíž dochází k vyšším hodnotám meze pevnosti. Jako nejpevnější jsou považovány tzv. „whiskery“ tj. monokrystalická vlákna, která mají průměr $\sim 1\mu\text{m}$ při délce 3-4 mm. Při výrobě kompozitů se vlákna splétají do svazků a u některých dochází k prasknutí již při začátku zatížení. Z tohoto důvodu se uvažuje, že pevnost jednoho vlákna je větší než průměrná pevnost připadající na vlákno ve svazku. Vývojem uhlíkových vláken, která mají průměry vláken v nano jednotkách, lze docílit lepších fyzikálně mechanických vlastností v důsledku snížení počtu poruch ve vláknech [7].

2.2.1 Výroba vláken

Surovina pro výrobu uhlíkových vláken nese název prekurzor. Přibližně 90% uhlíkových vláken je vyrobeno z polyakrylonitrilových vláken (PAN). Zbylá produkce vláken se vyrábí ze složek objevujících se při zpracování ropy, ze sloučenin poskytující molekuly uhlíku. Z prekurzorů se vyrábějí uhlíková vlákna řízenou pyrolýzou [8].

Proces řízené pyrolýzy začíná prodloužením vlákna při teplotě 200 °C a orientací molekul ve směru osy vlákna za působení elektrického napětí. Následuje stabilizace v oxidační atmosféře po dobu 10 hodin a teplotě 220 až 300 °C. Dalším zvyšováním teploty v inertní atmosféře roste modul pružnosti a pevnost vlákna, za teploty 900 až 1500 °C dochází ke karbonizaci a produktem jsou vlákna o vysoké pevnosti v tahu (HS vlákna). Při postupném zvyšování teploty do rozmezí 2000 až 2800 °C vzniká grafitická mikrostruktura, tedy vlákna o vysokém modulu

pružnosti v tahu (HM vlákna). Vlákna mají nízkou hmotnost, vysokou pevnost, vysokou tuhost a v neposlední řadě záporný koeficient tepelné roztažnosti. Technologie výroby vláken je poměrně komplikovaná a v současnosti je na trhu pouze několik málo firem, které ji kvalitně zvládají [9].

2.3 Matrice

Tato složka má spojující funkci vyztužujících vláken, tvoří základní tvar tělesa a lze ji považovat za kontinuální část kompozitního materiálu. Ideální stav nastane, pokud matrice přeneše veškeré vnější zatížení (v hodnotách meze pevnosti vláken) na vyztužující složky, aniž by došlo k její plastické deformaci.

2.3.1 Polymerní matrice z epoxidové pryskyřice

Zajišťuje adhezivní pevnost, teplotní odolnost, únavovou pevnost, chemickou odolnost, odolnost proti vlhkosti. Epoxidová pryskyřice vykazuje nejvyváženější mechanické vlastnosti a je používána především z těchto důvodů: dobrá adheze k vláknům, nízké smrštění během vytvrzování, dobrá chemická odolnost, různé charakteristiky pevnosti a tuhosti, odolnost vůči tečení a únavová odolnost [10].

2.4 Výrobní technologie kompozitních materiálů- CompoTech

Firma CompoTech nabízí produkty na „high tech“ úrovni v oblasti kompozitních materiálů. Díky rozsáhlým zkušenostem ve vývoji těchto materiálů a špičkovým technologiím ve výrobě je schopna vyrábět struktury, jež dosahují nebývalých mechanických vlastností především s ohledem na vysokou pevnost, tuhost a tlumící vlastnosti. Společnost vyvinula svou vlastní technologii navíjení vláken.

Společnost CompoTech se specializuje na výrobu kompozitních dílců vyráběných technologií navíjení vláken. Vývojové oddělení této společnosti vyvinulo zcela unikátní systém navíjení vláken pod skutečně nulovým úhlem vůči ose rotace ovíjeného předmětu a dochází tak ke zvýšení tuhosti přibližně o 15% a zvýšení pevnosti o 40%. Tento důkaz poukazuje na nevyužití vlastností vláken, pokud je proces navíjení realizován při navíjecím úhlu 5° nebo 7°. Tato výrobní technologie nabízí maximální ohybovou tuhost a pevnost, vynikající dynamické vlastnosti a stabilitu [11].

Mezi inovativní produkty této společnosti patří tyto technologie [5]:

- 3Dc Three Dimensional Cellular Composite
- cDD Composite Dynamic Damping
- iCC Integrated Composite Connections

2.4.1 Přiblížení výroby kompozitních součástí

Celý proces tvorby kompozitních prvků začíná u cívek s navinutými pramenci uhlíkových vláken umístěných v zásobníku navíjecího stroje. Pramence mohou obsahovat různý počet uhlíkových vláken. Šíře pramenců obsahuje 12 000 nebo 24 000 jednotlivých vláken. Pro běžné aplikace se využívají prameny s 3000 vlákny. Tyto prameny jsou strojně odvíjeny skrze nádobu s tekutou epoxidovou pryskyřicí, která ulpívá na vedených vláčkách. Důležitá je rychlost odvíjení pramenců, čímž se ovlivňuje množství nanášené epoxidové pryskyřice. Dále prameny vláken směřují do číslicově řízených posuvných částí navíjecího stroje, které nesou úlohu umístění vláken pod požadovaným úhlem vůči ose rotace ovíjeného předmětu. Předmět, který je tvořen, je umístěn ve statickém stojanu, a při procesu řízeně rotuje. První vrstvy uhlíkových vláken jsou navíjena na profil, nejčastěji ocelovou trubku. Při přilnutí vlákna na povrch součásti se určitý objem epoxidové pryskyřice vytlačí na volný povrch, což ovlivňuje

přechodovou vzdálenost mezi jednotlivými vrstvami vláken, a je nutné tento faktor vhodně nastavit pomocí stupně „utažení“ svazků vláken při navíjení. Po navinutí poslední vrstvy je předmět pokryt ochrannou fólií a následuje vytvrzení při cca 100°C. Z vytvrzené kompozitní součásti je v případě nutnosti vytlačen pomocný ocelový profil, který měl funkci nosiče první vrstvy navíjení.

V kapitole 2.1 je zmíněný vliv přechodové fáze mezi rozhraním vlákno/matrice. Z tohoto důvodu je možné provést technologicky vyspělejší navíjení uhlíkových vláken při použití epoxidové pryskyřice s nanočásticemi uhlíkových vláken a příměsí křemičitých plnidel, které zvýší smykovou pevnost. Tento způsob je vhodný pro namáhané kompozitní součásti.

2.4.2 CFRP pro HSK upínač a frézovací nástroj

Pro výrobu speciálního frézovacího nástroje a hydraulického HSK upínače bylo použito vláken o vysoké pevnosti s kombinací vláken s vysokým modulem pružnosti. V konečném provedení hydraulického upínače a frézovacího nástroje jsou zastoupena 90% podílem, zbývajících 10% tvoří vlákna s vysokou pevností. Uhlíkovo-grafitový kompozitní materiál zajišťuje velmi uspokojivé tlumící vlastnosti, díky předpokládanému zvýšení vlastní frekvence a dynamické tuhosti u obou provedení. Vlákná typu HM zajišťují i vysokou torzní tuhost, která je rozhodující u frézovacího nástroje. Objem vláken se v obou zmíněných aplikacích pohybuje v rozmezí 53-58%. Průměr použitých uhlíkových vláken se pohybuje v rozmezí 6-8 μ m. Jednotlivé vrstvy jsou vůči středové ose rotace nástroje i upínače rozmístěny pod úhly +45°; 0°; -45° za cílem vytvořit více homogenní chování těchto kompozitních částí. Tento postup je zvolen na základě výskytu obou zatěžovacích módů (ohyb a krut), s cílem navrhnout prostorově orientovanou kompozitní část s vhodnou skladbou vláken pro tento typ zatížení.

2.5 Analýza současného stavu v konstrukci nástrojových upínačů a řezných nástrojů

Současné požadavky trhu jednoznačně kladou důraz na vysoké úběry obráběného materiálu při hrubovacích operacích. Pro splnění tohoto požadavku je nutné pracovat s vysokými hodnotami řezných i posuvových rychlostí. S vysokou řeznou rychlostí jsou spojeny vysoké otáčky nástroje (zejména u nástrojů menších průměrů), důsledkem vysoké posuvové rychlosti vznikají značné ohybové momenty, které působí na celou nástrojovou sestavu. U nástrojů s velkým vyložení přesažující 3xD je v závislosti na nepříznivém chování nástroje nutné snížit řezné parametry. Pro zachování výkonného obrábění je nutné hledat nástrojové sestavy, které tímto extrémním nárokům vyhoví.

2.5.1 Požadavky na nástrojové upínače

Použitý upínač musí disponovat těmito vlastnostmi:

- vysoká pevnost v ohybu
- dokonalá dynamická vyváženost
- zajištění vysoké upínací síly schopné přenést nemalé kroutící momenty (závisí i na použití obráběcí technologie- vhodné pro HPC obrábění)
- schopnost tlumit vibrace
- možnost přívodu média pro chlazení přímo do místa řezu
- umožnit krátké časy upnutí a uvolnění nástroje
- nabídnout vysokou životnost při nízkých pořizovacích nákladech

2.5.2 Druhy rotačních upínačů

Tato oblast dává prostor pro mnoho inovativních myšlenek, což potvrzuje výčet nabízených technických řešení pro optimální upnutí rezného nástroje. Při výběru upínače je nutné zohlednit jeho použití, pokud možno i s ohledem na způsob a velikost zatížení reznými silami. Výběr upínače ovlivňuje i dosaženou jakost obrobených ploch a trvanlivost nástroje. Na výběr je několik variant s odlišným zakončením upínačů. Každý typ má jiné přednosti a hodí se buďto pro velké kroutící momenty nebo pro vysoké otáčky. Charakteristiky upínací techniky jsou ovlivňovány styčnými plochami, které tvoří rozhraní upínač-stroj a mají nemalý vliv na celkový proces obrábění. Pro náročné aplikace s velkým vyložení nástroje je doporučováno používat upínače se dvěma styčnými plochami. V následujícím textu práce pojednává o způsobech upnutí nástroje do upínače a detailně se zaměřuje na speciální upínací techniku.



Obrázek č. 3: Druhy zakončení upínací techniky [12]

Mechanické upínače využívají upnutí nástroje na základě silově-deformačního procesu, při kterém se část upínače vlivem vnější síly elasticky deformuje a vyvozuje tak upínací sílu na stopku nástroje. Mezi mechanické upínače se řadí kleštinové ER, polygonální (TRIBOS od fy Schunk), univerzální (Coromant CAPTO, SINO), přesné mechanické, Weldon a Whistle Notch. Pro upínače využívající kleštiny je charakteristickou vlastností, nízká upínací síla, vysoké hodnoty radiálního házení nástroje, značná časová náročnost pro upnutí nástroje, nevyváženost, pro přívod chladicí kapaliny je nutné použít těsnící kroužky (součástí kleštin). Weldon a Whistle Notch patří taktéž k méně vhodným upínacím technikám při požadavcích na vysoký výkon nástroje, který je v tomto případě ovlivněn podobnými nevýhodami, jako u upnutí pomocí kleštiny. Ostatní systémy místy dosahují podobných vlastností jako hydraulické a tepelné upínače ovšem s nedostatečnými tlumícími schopnostmi [13].

Hydraulické upínače pracují na hydromechanickém principu, při kterém je pomocí tlakového šroubu vyvozen tlak v komorovém systému, který elasticky deformuje rozpínací objímku a vyvozuje upínací sílu na stopku nástroje. Mezi hlavní výhody hydraulických upínačů patří vysoká tuhost upnutí, tlumení vibrací, obvodové házení nástroje $\leq 0,003\text{mm}$ (platné pro vyložení $3xD$), samosvorný regulační šroub, odolnost vůči znečištění a pozitivní chování při dynamickém zatížení. Pro stopky dle DIN 6535 HB je nutné použít redukční pouzdra GZB-S. [14]

Tepelné upínače pracují s úměrnou změnou objemu materiálu dle změny teploty. Při indukčním ohřevu upínače ($250-350^{\circ}\text{C}$) se v důsledku teploty zvětší průměr otvoru pro vložení nástroje. Následuje ochlazení (přirozené, řízené), přičemž začne působit upínací síla vlivem smrštění upínacího otvoru. Mezi hlavní výhody tohoto způsobu patří jednoduchost konstrukce upínače, vznik téměř homogenní nástrojové sestavy, vysoká přesnost upnutí s pozitivním dopadem na vystředění, obvodové házení nástroje $\leq 0,003\text{mm}$ (platné pro vyložení $3xD$),

možnost použití za vysokých otáček (ideální pro HSC), vysoká upínací síla, přenos vysokého kroutícího momentu [14].

Speciální upínače tvoří zvláštní skupinu upínací techniky, která je zaměřena na řadu rozdílných aplikací. Existuje celá řada řešení eliminující nepříznivé vlivy v určité oblasti (závitování-eliminace rozdílného stoupání závitu (od fy Emuge-Franken), zvýšení životnosti ložisek vřetena- systém Hi-Jet Holder (od fy Big Daishowa Seiki), apod.). Tyto aplikace nesouvisí s řešenou problematikou, která je zaměřena především na konstrukci upínače nástroje, který bude splňovat požadavky zmíněné v kapitole 2.5.1. a proto zde nebudou detailně rozebírány. Doposud zmíněné typy upínačů se v současné době považují za standardní. V následujícím textu jsou zohledněny typy upínačů, které zajišťují specifický postoj k problematice upínání nástrojů, především s ohledem na potlačení vibrační a zvýšení tlumících vlastností.

V technické literatuře je představen speciální upínač řešící kmitání nástroje pomocí upínače, a to systém ColdSet od fy Command Tooling Systems, který využívá slitiny Ti-Ni s tvarovou pamětí (SMAs- Shape Memory Alloys). Principem je prudké ochlazení držáku (tekutým dusíkem nebo hluboko zchlazenými kapalinami) za cílem fázové transformace krystalické struktury slitiny v průběhu cca 30 sekund, při kterém dojde ke zvětšení otvoru pro upnutí nástroje. Po vložení nástroje a dosažení teploty 18-20°C se upínač opět smrští. Při porovnání s tepelnými upínači nabízejí tyto speciální upínače přenos vyšších kroutících momentů. Vynikající schopnost tlumení kmitů (platí pro nástroje menších rozměrů) až o 70% oproti ocelovým upínačům. [15]

Upínač navržený firmou Hofmeister s.r.o. je právoplatně zařazen do této kategorie, jelikož využívá nestandardních materiálů v podobě uhlíkových vláken v polymerní matici. Zařazení těchto prvků do konstrukce upínače může být chápán jako konstrukční optimalizace jeho vlastností. S očekávanými přínosy lze počítat ve směru: zvýšení ohybové pevnosti upnutého nástroje, zvýšený útlum vibrační, snížení hmotnosti upínače, prodloužení životnosti vřeten vlivem absorpce vibrační, snížení nákladů na energii při rozběhových činnostech nástroje. Pro provedení rešerše týkající se využití netradičních materiálů v oblasti nástrojových upínačů bylo zjištěno, že společnost Gühring s.r.o. vyvíjela upínače využívající kompozitní materiály, nicméně nebyly zveřejněny výsledky těchto speciálních produktů.

2.5.3 Požadavky na nástroje

Řezné nástroje přímo ovlivňují řezný proces, a proto je jejich návrhu věnována hlavní pozornost a úsilí. Při zaměření na zde řešenou problematiku vibrační je opět vynecháno několik technických záležitostí, které s tímto tématem přímo nesouvisí. Tvorba nového nástroje začíná u konstrukčního návrhu, která zásadním způsobem předurčuje výsledné vlastnosti nástroje. Hlavními hledisky je tuhé upnutí, nejkratší možná délka nástroje, minimální hmotnost frézy přispívající ke snížení kinetické energie potenciálních vibrační. Technologické zpracování je také důležité, nicméně při nevhodném konstrukčním návrhu není možné zásadním způsobem promluvit do chování nástroje. Nástroj je určen geometrickým tvarem, mikro-geometrií a fyzikálně mechanickými vlastnostmi použitých materiálů. Z pohledu geometrického tvaru nástroje je cílem vytvořit optimální nastavení mezi pracovní geometrií nástroje, obrobitelností materiálu a trvanlivostí břitu. Mezi existující konstrukční úpravy, které přispívají k vyšší stabilitě řezného nástroje, patří rozdílná rozteč zubů frézy. Tímto způsobem se narušuje periodičnost vynucených kmitů, které jsou do systému vnášeny v důsledku působící budící síly o určité frekvenci (vztaženo na proces frézování). Rozdílná rozteč zubů vyvodí posun jednotlivých fází kmitů, který zabrání následnému zvyšování vynuceného kmitání v závislosti na neustálém dodávání energie systému. Dalším možným řešením, které přispívá k potlačení

vibrací je použití malého úhlu nastavení hlavního ostří (κ_r). Tento úhel ovlivňuje směr působení radiální síly, která namáhá nástroj na ohyb. Při použití úhlu 10-17° (standardně používaný úhel pro technologii HFC) lze dosáhnout optimálního zachycení řezných sil ve směru osy nástroje, kde vykazuje nejvyšší tuhost. Tento krok výrazně zvyšuje stabilitu u velkého vyložení nástroje. Mezi jiný postup zvyšující tuhost tělesa nástroje patří použití tangenciálního upnutí VBD, při zachování většího průměru jádra nástroje a zvětšenou podpěrnou plochu VBD, které vede k vyšší tuhosti (používá se především pro čelní válcové frézy).

2.5.4 Speciální nástroje potlačující vibrace

Speciální aplikaci nabízí fy Sandvik Coromant, která aplikuje pasivně tlumené nástroje s obchodním názvem Silent Tools (obchodní značka výrobce, norské firmy Teeness ASA). [16]

Jedná se o anti-vibrační předladěné nástroje, které pracují na principu pasivního dynamického tlumiče kmitů, kterým je těžké kmitočtově vyladěné těleso ve tvaru válce. Tlumič je umístěn v dutině nástavce, kde jsou oba jeho konce uloženy v pryžových pouzdrech, a je obklopen speciální olejovitou kapalinou. Pokud při obrábění vznikají harmonické kmity, celý tlumící systém začne pracovat tak, že okamžitě absorbuje kinetickou energii tyče a tím zabrání rozkmitání nástroje. Tlumené adaptéry frézovacích nástrojů jsou vždy naladěny na konkrétní délku nástroje, při změně nástavce (prodloužení/zkrácení nástrojové sestavy) dojde k potlačení schopnosti tlumení. Omezení pro tyto speciální nástroje nastává při vyšším tepelném zatížení soustavy, přičemž hrozí změna charakteru tlumících vlastností. Dalším omezením je použití příliš vysokých otáček nástroje, které také snižují účinnost tlumícího systému [17].

Do kategorie **speciálních nástrojů** patří navržená vysoko-posuvová fréza od fy Hofmeister s.r.o., která využívá uhlíkový kompozitní materiál k dosažení anti-vibračních schopností. Síla tohoto nástroje tkví v nižší hmotnosti, vyšší tuhosti ve směru působení výslednice řezné síly, lepších tlumících schopnostech, nižším opotřebením břitových destiček. Na základě rozsáhlé rešerše po podobném návrhu nástroje bylo zjištěno, že se jedná o unikátní nástroj, první svého druhu.

3 Návrh nástroje a HSK upínače s využitím kompozitních materiálů

Návrh frézovacího nástroje a upínače vychází z požadavku zajištění stability řezného procesu při značném vyložení nástroje s cílem předčít schopnosti současných řešení nástrojových sestav (viz kapitola 2.5). Důraz je kladen především na zužitkování vysokého útlumu, vysoké tuhosti, nízké hmotnosti a dalších parametrů kompozitního materiálu popsanych v kapitole 2.1.

Nástroj i upínač jsou konstruovány pro frézování hlubokých vybrání, k čemuž často dochází při výrobě forem. Problematika frézování v této oblasti je mimo jiné zaměřena i na opracování těžko přístupných partií součásti při značném vyložení nástroje. Zvětšením vyložení nástroje se snižuje tuhost a dochází ke snadnějšímu vzniku vibrací. Při vzniku vibrací se nejčastěji postupuje ve směru snížení řezné rychlosti, posuvu na zub nebo hloubky řezu a tedy i snížení produktivity obrábění za cenu zvýšení stability řezného procesu.

3.1 Kompozitní upínač

Jedná se o upínač typu HSK A63, který pracuje na principu hydraulického upínače. Odlišnost oproti standardnímu provedení není ve způsobu upínání nástrojové stopky s tolerancí h6, ale v kompozitní obálce, která zvyšuje modul pružnosti v tahu pro upínací soustavy. Tento parametr ovlivňuje výsledný průhyb nástroje. Na základě rozdílného modulu pružnosti v tahu použitého kompozitního upínače je předpoklad pro daleko menší průhyb nástroje, oproti použití ocelového hydraulického upínače. Rovnice průhybové čáry určená z deformační energie (zahrnující smyk od posouvající síly) je zapsána ve tvaru:

$$w = F \left(\frac{l x^2}{2EJ} \cdot \frac{x^3}{6EJ} + \beta \frac{x}{GA} \right) \quad (3.1)$$

kde jednotlivé symboly reprezentují: l délka nosníku, x délková souřadnice měřená od místa působíště síly, w průhyb, E modul pružnosti materiálu v tahu, J kvadratický moment k ose průřezu, β korekční součinitel pro daný průřez, G modul pružnosti materiálu v příčném smyku, A plocha průřezu. Vlastnosti jsou následně určeny z přístupů využívající homogenizované skladby [18].

3.1.1 Základní parametry upínače

Na ocelový základ, který tvoří funkční části upínače, je aplikováno několik vrstev uhlíkových vláken v polymerní matici. Výrobní technologie kompozitní obálky je v souladu s metodami fy CompoTech (viz kapitola 2.4).

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

Tabulka č. 2: Parametry upínačů

3.2 Kompozitní fréza

Kompozitní nástroj je vhodný pro použití v situacích s vyložením přesahující 3xD. Nástroj je řazen do produktové řady vysoko-posuvových fréz. Při maximální zasunutí nástroje do HSK upínače A63 se vyložení dostává za hranici 5xD. Délka tělesa frézy nepřesahuje běžně používaný rozměr a z hlediska standardně nabízených nástrojů pro kapsování nelze považovat navržený nástroj za speciální.



Obrázek č. 4: Kompozitní fréza

Jedná se o čtyřzubou frézu s vyměnitelnými břitovými destičkami. Tělo nástroje tvoří kompozitní materiál, určité partie jsou ocelové. Jednotlivými ocelovými prvky jsou hlava nástroje a část válcové stopky, dále je nástroj osazen vyměnitelnými břitovými destičkami a šrouby pro jejich upnutí.

Parametr	CFRP fréza	Ocelový nástroj
Řezný průměr nástroje	20mm	20mm
Průměr stopky nástroje	20h6	20h6
Celková délka nástroje	160mm	160mm
Hmotnost nástroje s VBD	0,174kg	0,320kg

Tabulka č. 3: Parametry řezných nástrojů

Výpočet průhybu nástroje je možné uvažovat dle níže uvedeného vztahu [17]:

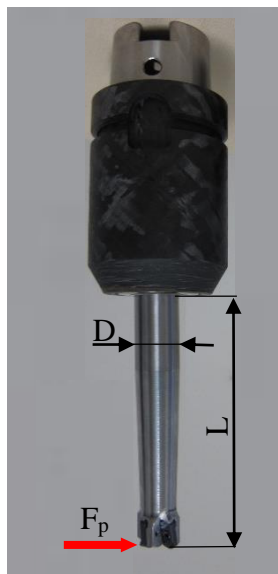
δ průhyb nástroje [m]

F_{cN1} radiální síla [N] (značení vychází z obrázku č. 6)

L délka vyložení nástroje z upínače [m]

D průměr stopky nástroje [m]

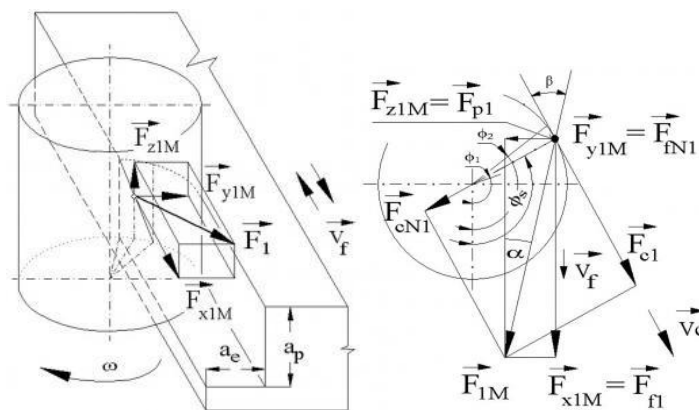
$$\delta = \frac{(64 \cdot F_{cN1} \cdot L^3)}{(3 \cdot E \cdot \pi \cdot D^4)} \quad (3.2)$$



Obrázek č. 5: Přiblížení výpočtu průhybu

3.2.1 Síly působící na nástroj

Složitost fyzikálního modelu zatížení frézovacího nástroje zahrnující třísosé dynamické namáhání vede k jeho zjednodušení. Poté je možné provést rozbor silového zatížení ve třech souřadných systémech.



Obrázek č. 6: Schématické zatížení frézy [19]

Pro konstrukci nástroje bylo klíčové stanovit maximální radiální sílu působící na nástroj. Tento výpočet provedla fy CompoTech, přičemž byla stanovena limitní radiální síla $F_{cN1} = 1500N$. Hodnota velikosti maximální zatěžující síly vycházela z výpočtového modelu MKP a zkušenosti navrhování obdenných aplikací. Tento výpočet vychází z technologických limitů uvažujících maximální ohybový moment u použitého uhlíkového kompozitu.

V experimentální části je pro orientační výpočet hlavní složky řezné síly použita metoda dle Kienzlova vztahu. Postup výpočtu je uveden v příloze č. 10.

3.2.2 Kompozitní část

Část stopky a kuželová část je vyrobena z kompozitního materiálu. Polotovarem je kompozitní trubka přecházející v kuželovou část. Technologie výroby spočívá v navíjení uhlíkových vláken na ocelovou tenkostěnnou trubku. Vnitřní otvor trubky o průměru 6mm slouží jako kanálek pro přívod chladicího média k zubům frézy. Proces výroby kompozitní části je shodný s technologií popsanou v kapitole 2.4.

3.2.3 Stopka nástroje

Při uvážení celo-kompozitní stopky vzniká nebezpečí na rozhraní stopka/upínač. Pokud je takto vyrobený nástroj zatížen, hrozí nebezpečí destrukce v místě s největším ohybovým momentem vlivem snížení únosnosti uhlíkových vláken v přechodové části upnuté stopky a volně vyložené dochází k prudké změně stavu zatížení kompozitní struktury. Z tohoto důvodu byla vytvořena ocelová výztuha, která zamezí ovlivnění pevnosti stopky nástroje.



Obrázek č. 7: Nástroj s kompozitní stopkou (řada 1.0)- předchůdce frézy vpravo (řada 2.0)
(úprava vysvětlena v kapitole 4.5)

3.2.4 Ocelová hlava

Další částí frézy je ocelová hlava, která je osazena čtyřmi vyměnitelnými břitovými destičkami. Ocelový segment s VBD je vsunut do kruhového vybrání kompozitní části. Mezi rozhraní obou materiálově odlišných částí je umístěno lepidlo a je tak vytvořen lepený spoj. Chladicí kanálek prochází přes obě tyto části.

3.2.5 Vyměnitelné břitové destičky

Nástroj je osazen VBD od firmy Tungaloy. Vyfrézované lůžko je připraveno pro destičky typu LNMU0303ZER, které jsou nabízeny v různých třídách karbidu a lze je použít pro obrábění uhlíkových ocelí, korozivzdorných ocelí, litiny, super slitin na bázi nikl-titan a tvrzených materiálů. Jedná se o karbidy třídy AH725, AH130 a AH3035. Na všech třech typech karbidů je aplikována technologie „PremiumTec“, která snižuje tření a zlepšuje tak odvod třísky z místa řezu. Tyto destičky jsou nabízeny s utvařeči typu MJ pro univerzální použití a typem ML pro použití, kde je požadováno snížení rezné síly. [20]

Označení VBD	karbidy		
LNMU0303ZER-MJ	AH725	AH130	AH3035
LNMU0303ZER-ML			
L	Obdélníková destička 90°		
N	Nulový úhel hřbetu		
M	Přesnost VBD (hodnoty tolerancí lze dohledat v katalogu nástrojů TUNGALOY)		
U	typ s otvorem, otvor s 40°~ 60 kuželovým lůžkem na obou stranách, utvařeč na jedné straně		
03	Délka břitu		
03	Tloušťka= 3,18mm		
Z	Úhel nastavení hlavního ostří je jiný než udává norma		
E	Úhel hřbetu=20°		
R	Provedení destičky- pravé		

Tabulka č. 4: Technická data VBD

V axiálním směru je úhel čela v blízkosti řezného břitu silně pozitivní a přechází v negativní nastavení v neřezné části.

Karbid AH725

Jedná se o univerzální karbid použitelný pro obrábění ocelí (označení P20-P35), koroziivzdorných ocelí (označení M20-M35), litin (třída K), slitin niklu a titanu (označení S20-S30) a tvrzených ocelí (H).

Karbid AH130

Vhodný pro obrábění ocelí (označení P25-P40) a koroziivzdorných ocelí (označení M25-M40), lze jej použít i na slitiny niklu a titanu (S).

Karbid AH3035

Karbid je vysoce houževnatý a vhodný pro přerušované řezy. Vhodný pro obrábění ocelí (P) a tvrzených ocelí (H).

3.2.6 Nástrojové úhly frézy

Úhel nastavení hlavního ostří je podmiňujícím parametrem pro použití vysokých posuvů. Hodnota nastavení úhlu hlavního ostří je u navržené frézy rovna sedmnácti stupňům, což vede ke snížení radiálních řezných sil a nárůstu zatížení v axiálním směru. V důsledku působení řezných sil ve směru osy vřetena obráběcího stroje dochází ke stabilizaci řezného procesu a omezení oblasti vzniku vibrací. Obecně lze říci, že při zvětšování úhlu nastavení hlavního ostří se zvětšují radiální řezné síly a nástroj je tak namáhán větším ohybovým momentem. Frézy s malým úhlem nastavení se používají pro vysoké hodnoty posuvu na zub f_z a to díky malé tloušťce vznikající třísky, při dodržení relativně malé axiální hloubky řezu a_p . Jsou vhodné pro hrubovací operace i dokončování. Tento typ frézy lze použít i pro ponorné frézování.

Snížení úhlu nastavení hlavního ostří vede ke snížení tloušťky řezu a tudíž ke zvýšení šířky řezu. Výsledkem je rozložení zatížení na větší části břitu. Díky výhodnějšímu směru odvodu třísky se tříska lépe dělí. Při najetí nástroje do řezu není poloměr zaoblení špičky vystaven tak

vysokému namáhání, neboť k prvnímu kontaktu dojde na řezné hraně, v místě o něco vzdálenějším než je poloměr zaoblení špičky. Dalším výhodným jevem je zvětšení úhlu rozevření špičky hrotu, který přispívá k větší pevnosti nástroje [21].

4 Testování standardní nástrojové sestavy a testování nástrojových sestav s využitím kompozitního materiálu

Účelem testování bylo objevit difference v chování standardní ocelové nástrojové sestavy (varianta A) a sestavami s kompozitním materiálem (varianta B, C, D). Zásadní otázkou bylo, jakým způsobem a na základě které metodiky bude možné potvrdit progresivní vlastnosti uhlíkových vláken, s ohledem na příznivé dynamické vlastnosti, v řezném procesu. Záměrem testování nástrojových sestav bylo vytvořit detailní pohled na frekvenční charakteristiky a objektivně posoudit přínos použitého kompozitního materiálu.

Testovací část se skládá ze dvou hlavních částí, pre- experimentu a hlavního experimentu. Pre-experiment se dělí na dvě etapy, přičemž vznik etapy č. 2 zapříčinily nepředpokládané výsledky v etapě č. 1.



Diagram č. 1: Postup při testování

4.1 Obráběcí stroj pro testování nástrojových sestav

Testování probíhalo v halových laboratořích KTO v prostorách univerzity. Obráběcím strojem pro testování bylo pětiosé CNC obráběcí centrum od fy DMG MORI DMU 40 eVo *linear*. Jak je patrné z názvu, tento stroj využívá lineární pohony a nabízí tak vysokou dynamiku v kombinaci se značnou tuhostí pohybujících se částí. Vyvinuté nestandardní nástrojové sestavy se ideálně hodí k této koncepci stroje.

4.2 Příprava polotovaru

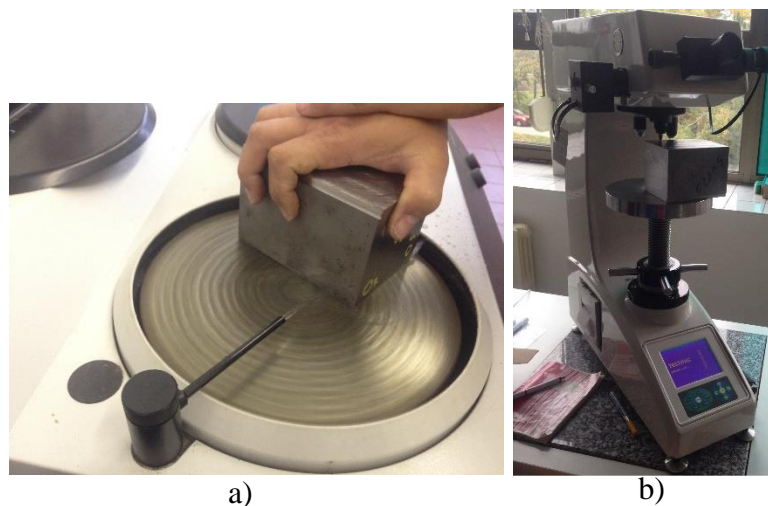
Jako polotovar byla zvolena čtyřhranná tyč o průřezu 90x90 v délce 120mm. Obráběným materiálem je středně legovaná ušlechtilá chrom-nikl-molybdenová ocel vhodná k zušlechťování. Označení této oceli dle ČSN EN 34CrNiMo6 (W.Nr: .

4.2.1 Tepelné zpracování

Pro experiment je žádoucí, aby byl materiál polotovaru homogenní. Na čtyřhranné tyči bylo provedeno kalení a následně popouštění s požadavkem zušlechtit na dolní mez pevnosti. Očekávaná tvrdost polotovaru je 45 ± 2 HRC a mez pevnosti v tahu $R_m = 1100$ MPa. Popouštěcí křivky a křivky prokalitelnosti jsou součástí přílohy č. 9.

4.2.2 Měření tvrdosti obrobku

Po tepelném zpracování proběhlo na čelní ploše kvádrů měření hodnoty tvrdosti materiálu mikroskopickou vnikající zkouškou dle Rockwella. Tato zkouška patří k nejméně přesným, její tolerance je ± 2 HRC. Vzhledem k naměřeným hodnotám a jejich odchylkám, které přesahují zmíněnou toleranci, bylo navrženo, aby se zkouška tvrdosti uskutečnila dle přesnější metody a to dle Vickerse. Pro to, aby byla zkouška proveditelná, bylo nutné frézovat čelní plochu polotovaru za účelem získání lepší jakosti plochy, která hraje nemalou roli při vyhodnocování tvrdosti dle Vickersovy metody. Jakost obrobku byla zlepšena pomocí leštění v abrazivním prostředí (obrázek č.8a). Zároveň byla opracována i dosedací plocha polotovaru pro zlepšení dosednutí na stolek zkušebního zařízení.



Obrázek č. 8: Laboratoř katedry materiálů a strojírenské metalurgie

a) leštění povrchu; b) měření HV30;

Pozn.: pro zjištěné nemalé rozdíly v tvrdosti HV, je předpoklad, že struktura materiálu není dostatečně homogenní. Pro ověření tohoto předpokladu se nabízí vytvořit metalografický výbrus.

Nestejnorodost materiálu může být způsobena několika příčinami. První příčinou je příliš velký polotovar pro zušlechťení na dolní pevnost. Materiál by bylo vhodnější nejprve nadělit a následně nechat tepelně zpracovat, nicméně tato varianta nebyla provedena z důvodu možnosti změny rozměrů polotovaru. Pro nejistý průběh experimentů byl nadělen jen nezbytný počet polotovarů pro začátek testování. Ostatní tepelně zpracovaný materiál zůstal nenařezaný pro možnost vzniku nepředpokládaných situací změny délky polotovaru.

Další možnou příčinou je nevhodné prohřátí materiálu, čemuž by napomáhal i jeho tvar. V rozích kvádrů dochází k vysokému prohřátí oproti jádru. Při prohřívání kruhového průřezu není tento problém tak markantní, jelikož se teplota polotovaru šíří rovnoměrněji než je tomu u kvádrů. Následně byla struktura zakalena. Popouštění proběhlo na dolní mez pevnosti.

4.3 Upnutí obrobku

Obrobek je nutné upnout vhodným způsobem, při kterém budou zachyceny hlavní účinky řezných sil. Pro experimentální metody testování řezných nástrojů bylo nutné, aby upínací zařízení nabízelo vysokou tuhost. Pokud by sestava obrobek-svěrák nebyla dostatečně tuhá, mohly by být výsledky testů nástrojů zkresleny. Pro upnutí byl použit mechanický svěrák HILMA SCS 120. Obrobek byl upnut v tvrdých čelistech. Šířka čelistí je 120mm a hloubka upnutí byla rovna 3mm.

Z pohledu omezujících podmínek pro upínací sílu svěráku nejsou kladeny zvláštní požadavky. Polotovar je plného průřezu a po obrobení na obrobku nebudou extrémně zeslabená místa, která by mohla způsobit deformaci součásti vlivem přílišných upínacích sil.

4.4 Návrh řezných podmínek

Základní strukturální model pro návržení řezných podmínek představovala Taguchiho matice, která byla určena počtem nezávisle proměnných a počtem úrovní každého faktoru. Návrh představuje symetrický model, jelikož bylo použito stejných počtů úrovní pro každou konkrétní nezávisle proměnnou.

m počet bodů měření při experimentu

k počet úrovní

p počet faktorů

$$m = k^p \quad (4.1)$$

Zvolené faktory (nezávisle proměnné):

- řezná rychlost (v_c [$m \cdot \min^{-1}$])
- posuv na zub (f_z [$mm \cdot z^{-1}$])
- axiální hloubka třísky (a_p [mm])
- radiální hloubka řezu (a_e [mm])

Faktory a_p a a_e byly pro výpočet bodů měření sloučeny, poté se změnil počet faktorů na $p=3$. Počet úrovní byl roven $k=4$. Po dosazení do rovnice (4.1) byl určen počet bodů měření $m=64$. Na základě tohoto výpočtu vzniklo 16 různých podmínek, které byly otestovány na veškerých nástrojových sestavách. Počet opakování byl stanoven dle předběžného odhadu spotřeby času experimentu. Celkově bylo provedeno 16 experimentů pro každou nástrojovou sestavu, při dvojnásobném opakování (celkový počet experimentů $16 \cdot 2 \cdot 4 = 128$ měření).

Řezná rychlost byla zvolena v rozmezí doporučených rychlostí v závislosti na použitém materiálu břitových destiček od firmy TUNGALOY (označení VBD: LNMU0303ZER-MJ, karbid AH725) a obráběném materiálu. Axiální hloubka třísky byla limitována vyložením nástroje (dodatek výrobce VBD). Pro vyložení testovaných nástrojů (110mm) byla maximální axiální hloubka třísky $a_p=0,7\text{mm}$. Posuv na zub, stejně tak jako radiální záběr třísky byly korigovány na základě omezení z hlediska hlavní složky řezné síly. Kombinace řezných podmínek viz příloha č. 8

počet úrovní	faktor 1 (v_c)	faktor 2 (f_z)	faktor 3 (a_p)	faktor 4 (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

Tabulka č. 5: Volené podmínky pre-experimentu (následnou kombinací na základě Taguchiho matice vzniklo 16 odlišných kombinací zde uvedených řezných podmínek)

4.5 Pre-experiment č. 1

Účelem této části testování bylo v první řadě ověřit funkcionalitu kompozitního nástroje. Hlavním důvodem pro tento postup bylo využití lepených spojů na nástroji, které nebyly doposud ověřeny. Jako přidruženým produktem se, z těchto počátečních testů a seznamování s chováním nástroje, stalo snímání akustické emise při frézování. Volba tohoto měření vycházela z možností univerzity a ověření vhodnosti této metody pro posouzení kmitání.

4.5.1 Test funkcionality

Ověření spočívalo v roztočení nástrojové sestavy upnutých ve stroji, na zvolený počet otáček, umístěných v pozici mimo materiál. Následně se proměřilo radiální házení nástroje, taktéž za rotace při $n=500\text{ ot/min}$. Tento postup umožnila funkce Laser Blum, sloužící pro měření nástrojů a jejich geometrických odchylek (ŘS Heidenhain - cyklus 584). Celistvost kompozitního nástroje byla ověřena pro otáčky v tabulce č. 5 s pozitivním hodnocením v celém rozsahu. Následně se postupovalo ve směru testování nástroje v řezném procesu (stále součástí pre-experimentu).

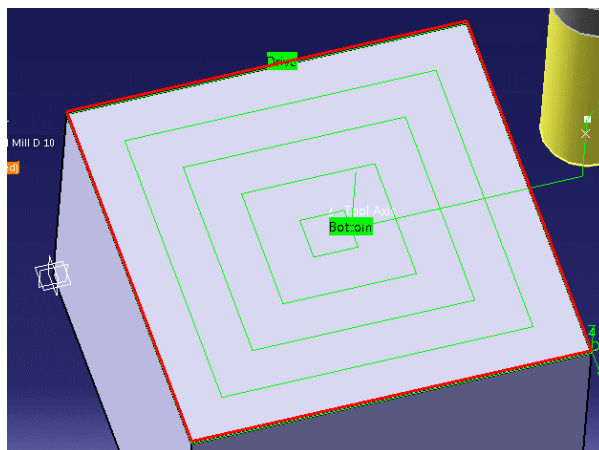
Otáčky nástroje [1/min]	Řezná rychlost [m/min]	Stav
2864	180	Vyhovuje
3183	200	Vyhovuje
3342	210	Vyhovuje
3580	225	Vyhovuje
3819	240	Vyhovuje

Tabulka č. 6: Test celistvosti nástroje - otáčky

4.5.2 Strategie frézování

Navržená strategie vycházela z nutnosti zvýraznění rozdílů testovaných variant, především v tuhosti nástroje a schopnosti odolávat odklonu vlivem řezných sil. Pro tento účel se zvolil postup čelního frézování po kontuře (dostředné). Právě ostré přechody NC drah, které tento

frézovací cyklus využívá, byly účelně zvoleny pro zvýraznění předpokládané vyšší tuhosti všech nestandardních variant.



Obrázek č. 9: Strategie frézování – pre-experiment

4.5.3 Průběh pre-experimentu č. 1

Během této zkušební fáze testování bylo nutné dodržet stejné počáteční podmínky pro každou testovanou sestavu. Při pre-experimentu bylo vlivem umístěných snímacích zařízení nebezpečné použít chladicí kapalinu, a z tohoto důvodu byl proces chlazen vzduchem. Připouštělo se i nepříznivé ovlivnění AE, nicméně nebezpečí přehřátí ocelové hlavičky a následné ovlivnění lepeného spoje bylo zásadnější, a proto se chlazení vzduchem aplikovalo. Každá nástrojová sestava byla osazena novými VBD před konkrétním testováním. Řezné hrany byly vyměněny vždy po dokončení všech šestnácti navržených podmínek. Při každém experimentu bylo sledováno procentuální zatížení vřetena. Po frézování jednotlivé hladiny byla provedena kontrola radiálního házení (vždy ve stejné vzdálenosti od čela břitu) za rotace z důvodu včasného podchycení případných deformací nástroje/upínače a včasného přerušení pre-experimentu. Toleranční pole pro odchylky měřené za rotace byly určeny na základě naměřených hodnot při měření na přístroji ZOLLER Genius 3.

- a) **Testování varianty A** (ocelový HSK upínač + ocelový nástroj)
 - Otestované experimenty: 1-16
 - Tolerance radiálního házení (měřeno za rotace): 30 μ m
 - Zjištěná odchylka od původního stavu (měřeno za rotace): ne
 - b) **Testování varianty B** (CFRP HSK upínač + ocelová nástroj)
 - Otestované experimenty: 1-16
 - Tolerance radiálního házení (měřeno za rotace): 25 μ m
 - Zjištěná odchylka od původního stavu (měřeno za rotace): ne
 - c) **Testování varianty D** (CFRP HSK upínač + CFRP fréza řady 1.0)
 - Otestované experimenty: 1-2
 - Tolerance radiálního házení (měřeno za rotace): 40 μ m
 - Zjištěná odchylka od původního stavu (měřeno za rotace): ne
- Při tomto testování došlo k destrukci frézovacího nástroje vlivem ohybového momentu.

číslo experimentu	v_c [m/min]	f_z [mm/z]	a_p [mm]	a_e [mm]	Q [cm ³ /min]	F_c [N]
1	95	0,5	0,5	5	7,560	511,71
2	95	0,7	0,7	15	44,452	925,14

Tabulka č. 7: Experiment č.2 – destrukce nástroje



Obrázek č. 10: Destrukce kompozitního nástroje (řada 1.0)

Přiblížení experimentu č.2:

Na základě sledovaného zatížení vřetena byla stanovena výslednice sil.

Úhel záběru nástroje:

$$\varphi_{max} = \arccos\left(\frac{\frac{D}{2} - a_e}{\frac{D}{2}}\right) = 160^\circ \quad (4.2)$$

Počet zubů v záběru:

$$z' = \frac{\varphi_{max}}{360} * z = 1,6 \rightarrow 2 \text{ zuby v záběru} \quad (4.3)$$

Působící výslednice sil dle přibližné spotřeby výkonu (značení síly vychází z obrázku č. 6):

$$P_{ef} = \frac{F_1 * v_c}{60 * 1000 * \eta} \quad (4.4)$$

$$F_1 = \frac{(P_{ef} * 60 * 1000 * \eta)}{v_c} \approx 1364,2 \text{ N}$$

4.5.4 Akustická emise

Úkolem této metody bylo vytvoření frekvenčního spektra z nasnímaných zvukových vzorků a následné analýzy těchto charakteristik. Očekávalo se, že použitá technika pro měření této fyzikální veličiny bude schopna přiblížit skutečné chování nástroje. Ze vzorků bylo bezpodmínečně nutné odstranit vlivy, které nesouvisí s řezným procesem a zkreslují celý signál akustiky. Možnosti frekvenčních charakteristik nabízí odhalení nestability řezného procesu. Nestabilita je v této problematice charakterizována uspořádanou energií. Projevem AE je poté vytvoření tónu o určité frekvenci. Při neuspořádaném rozptylu energie nedochází k rezonanci nástroje a AE nenabývá stabilního projevu v podobě tónu. Akustická emise byla zaznamenávána pomocí dvou zařízení umístěných v prostoru stroje. Jednalo se u ZOOM H4 rekordér a elektretový mikrofón, který byl zapojen do počítače. Parametry nahrávání byly stanoveny pro obě zařízení stejným způsobem (vzorkovací frekvence 96 000Hz, hloubka 32bitů). Zpracování signálu bylo provedeno v SW Audacity, který nabízí možnosti potlačení ruchů pozadí, zvýraznění zvukového signálu a další možnosti práce se zvukovým záznamem. Hlavní výhodou tohoto programu je integrovaná funkce pro vyhodnocení frekvenčního spektra, které bylo využito k závěrům vyplývajících z měření.

4.6 Pre-experiment č. 2

Celkový počet vyrobených kompozitních fréz (2ks) umožňoval testy opakovat. Na základě destrukce kompozitní frézy řady 1.0 byly upraveny podmínky pomocí určitých limitních hodnot s nutností snížení zatížení nástroje. Proto proběhlo zvýšení řezné rychlosti, snížení axiální hloubky třísky a snížení radiální hloubky třísky. Hodnota posuvu na zub byla určena z podmínky konstantní průměrné tloušťky třísky $h_m = konst = 0,1\text{mm}$. Tato podmínka vychází z požadavku nenavýšení řezného odporu při snížení tloušťky třísky pod tuto hodnotu. Pro určené přepočítané řezné podmínky byla frézovaná čelní plocha totožnou strategií, jako tomu bylo při pre-experimentu č. 1. Hodnoty řezných podmínek k nalezení v příloze č. 8. Podmínky byly aplikovány dle vzestupného zatížení nástroje.

4.6.1 Průběh pre-experimentu č.2

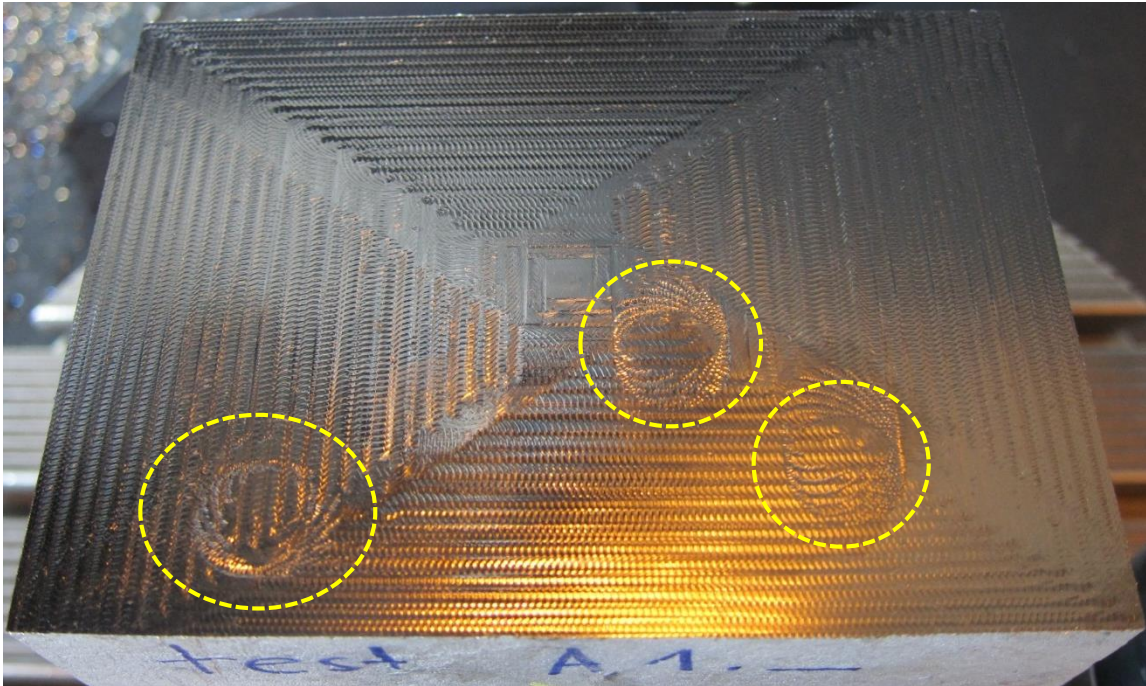
Testování varianty A a varianty B proběhlo úspěšně pro přepočítané podmínky. Hlavní pozornost byla směřována na kompozitní nástroj č. 2 (řada 1.0).

a) Testování varianty D (CFRP HSK upínač + CFRP fréza řady 1.0)

Otestované experimenty: 1-4
Tolerance radiálního házení (měřeno za rotace): $20\mu\text{m}$
Zjištěná odchylka od původního stavu (měřeno za rotace): ne
Při tomto testování došlo k destrukci frézovacího nástroje vlivem ohybového momentu.

číslo experimentu	v_c [m/min]	f_z [mm/z]	a_p [mm]	a_e [mm]	Q [cm ³ /min]	F_c [N]
1	120	0,20	0,3	5	2,292	150,54
6	150	0,24	0,3	3,5	2,397	172,39
10	185	0,21	0,35	4,5	3,911	182,80
14	220	0,20	0,4	5	5,602	200,71

Po odebrání jednotlivé vrstvy proběhlo ověření radiálního házení nástroje - tolerance házení nástroje do $20\mu\text{m}$. Tato podmínka platila po prvních třech úběrech - experiment č. 1; 6; 10. U experimentu č. 14 nástroj překročil dovolenou toleranci radiálního házení. Jinak řečeno došlo k určité deformaci nástroje, neboť se radiální házení zvýšilo o hodnotu $20\mu\text{m}$. Tato změna byla vyhodnocena jako kritická a pre-experiment byl zastaven. Tomuto rozhodnutí napovídal i povrch obrobku po experimentu č. 14, který vykazoval stopy po přílišném vychýlení nástroje vlivem zatěžujících sil, vždy v místě ostrých přechodů.



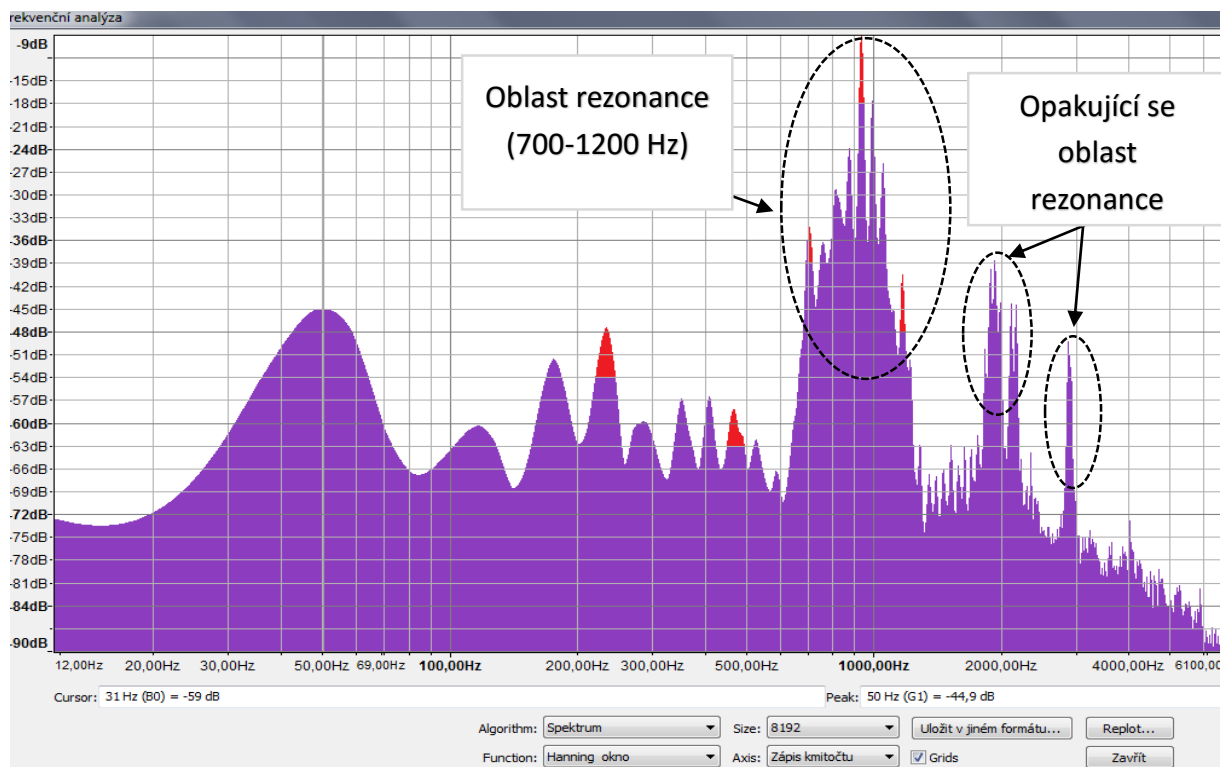
Obrázek č. 11: Vtisky nástroje způsobené snížením tuhosti při změně zatěžujících sil

4.7 Shrnutí pre-experimentů

Upnutí nástroje v upínači bylo provedeno korektně (upínací šroub dosedl na doraz v HSK upínači), na základě toho lze ovlivnění výsledků z důvodu nedostatečného upnutí vyloučit. Problematická oblast pro kompozitní nástroj byla stanovena v místech, kde dochází k prudké změně směru posuvové rychlosti, resp. prudké změně působících sil. Tyto přechody a neschopnost přenést zvýšené dynamické účinky zapříčinily destrukci nástroje č. 1. Kompozitní nástroj vykazoval specifickou akustickou emisi při rezné rychlosti 185 a 220 m/min („písknutí“ při změně směru). Při postupu dle diagramu č. 1 na straně 26 je nutné přepracovat konstrukční návrh frézovacího nástroje.

Postup při zpracování AE:

- určit budící frekvenci v závislosti na otáčkách nástroje
- pracovat s násobky budící frekvence a posoudit oblasti možného vzniku rezonančních pásem (hřebenovitý tvar spektra)



Obrázek č. 12: Frekvenční analýza exp. č. 14 (varianta A)

Nasnímaná akustická emise byla vyhodnocena pomocí SW Audacity. Z frekvenčního spektra jednotlivých záznamů vyplývá stabilnější chování varianty B oproti variantě A, nicméně je tato metoda zásadně zatížena rušivými vlivy, které umocňuje zakrytovaný prostor stroje (nedochází k svévolnému šíření emise, ale ploché stěny způsobují určitou odrazivost této energie). Dalším vlivem zkreslení je použité chlazení vzduchem, výsledkem zkreslení je modulace signálu (nelze vyhodnotit). Pro objektivní stanovení schopností nástrojových sestav je nutné aplikovat jinou metodu hodnocení. Detailnější rozbor AE součástí přílohy č. 7.

4.8 Modální analýza

Patří mezi nejrozšířenější metodu pro určování vlastních frekvencí a tvarů kmitů zkoumaných soustav. Na základě výstupů z této analýzy vzniká popis, charakterizující hledané dynamické vlastnosti. Dynamické vlastnosti je možné chápat jako ovlivňující faktory zapříčiňující kmitání. Metoda je založena na frekvenční odezvové funkci (dále jen FRF, Frequency Response Function). Tato funkce vyjadřuje dynamickou poddajnost systému a nesouvisí s velikostí vstupního a výstupního signálu. FRF je definována následujícím vztahem

$$H(\omega) = \frac{X(\omega)}{F(\omega)} \quad (4.5)$$

přičemž $X(\omega)$ a $F(\omega)$ reprezentují Fourierovy obrazy odezvy a buzení. [22]

Určení charakteru těchto vlastností umožňuje zpracování výstupů z modální analýzy.

Modální analýza stanovuje:

- Vlastní frekvence soustavy
- Útlum soustavy
- Vlastní tvary kmitů

Pro zkoumané nástrojové sestavy je předpokládána linearita systému (jeden z předpokladů pro proveditelnost tohoto experimentu). Linearita určuje tři základní vlastnosti [23]:

- Superpozici (určuje nezávislost pořadí při skládání budících účinků)
- Homogenitu (určuje nezávislost na velikosti použitých amplitud budícího signálu)
- Reciprocitu (předpokládá existenci symetrie, dosažení stejných výsledků měření při záměně místa buzení a místa zjišťované odezvy)

Pro systém s jedním stupněm volnosti platí rovnice odvozena z Newtonova pohybového zákona:

$$m \cdot \ddot{x}(t) + b \cdot \dot{x}(t) + k \cdot x(t) = F(t) \quad (4.6)$$

Touto rovnicí se vysvětluje transformace energie vzniklá budící silou na pravé straně rovnice. Levá strana rovnice je určena koeficientem hmotnosti, tlumením a tuhostí systému. Řešením je pohybová rovnice soustavy – nehomogenní diferenciální rovnice 2. řádu s konstantními koeficienty.

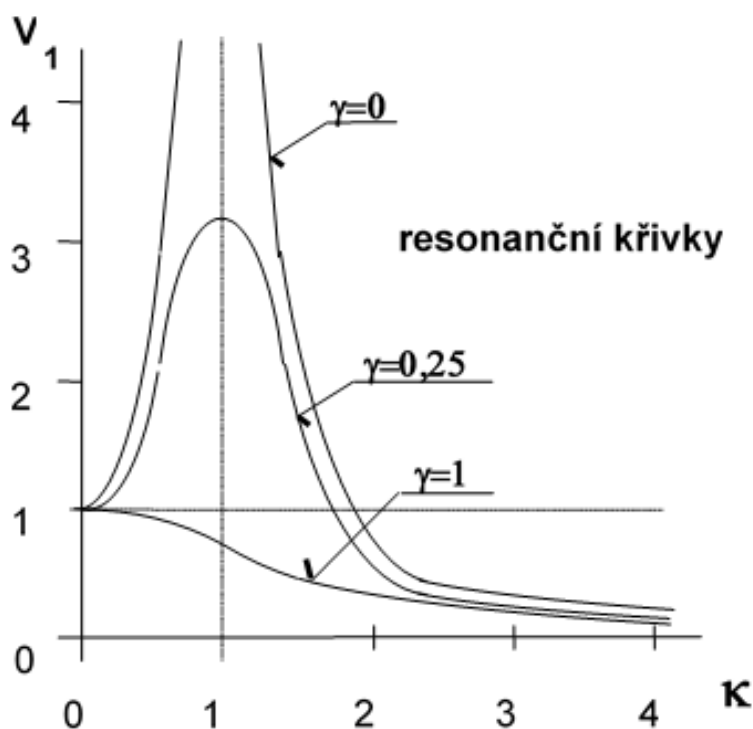
Na základě rovnice (4.6) je možné získat vztahy vyjadřující konstantu útlumu (δ), jako poměr mezi koeficientem viskózního útlumu (b) a dvojnásobkem hmotnosti (m). Dalším vztahem určuje vlastní kruhovou frekvenci (Ω_0), jako odmocninu z poměru tuhosti (k) a hmotnosti (m). Pro názornost jsou tyto vztahy uvedeny [24]:

$$\delta = \frac{b}{2 \cdot m} \quad (4.7)$$

$$\Omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (4.8)$$

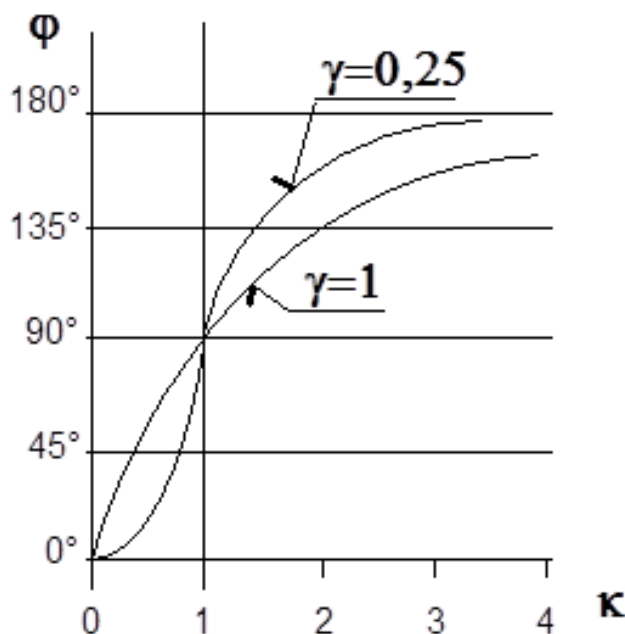
Relativní tlumení systému (γ) lze vytvořit poměrem konstanty útlumu (δ) a vlastní kruhovou frekvencí (Ω_0).

V technické praxi a diagnostice se modální analýza používá pro zjištění kritických míst a podmínek chodu strojních systémů pracujících v dynamicky zatíženém prostředí. Se stejnou myšlenkou je tato metoda aplikována na získání závislostí testovaných nástrojových sestav a určení nepříznivých provozních stavů nástrojů, které mají negativní dopad na produktivitu obrábění. Především se jedná o určení oblastí vlastních frekvencí, které jsou zásadní pro volbu frekvenci buzení, resp. volbu řezné rychlosti frézovacího nástroje. Na základě těchto zjištěných oblastí dojde k určení výhodných podmínek nastavení. Jak je vidět z grafu č. 1, bude-li úhlová frekvence budící síly rovna vlastní úhlové frekvenci ($\omega = \Omega_0$), dojde k rezonanci systému při následném zvětšování amplitudy kmitání. Pro tento stav platí, že koeficient naladění κ je roven jedné, ($\kappa=1$). Dále je z grafu č. 1 patrné, že při nulovém relativním tlumení, ($\gamma=0$) dochází k nekonečné rezonanci.



Graf č. 1: Resonanční křivky [25]

Pro celé pochopení dynamického chování nástrojů se při modální analýze pracuje s fázovým úhlem posunutí, neboli fázovým úhlem zjišťované výchylky. Posun vzniká mezi odezvou a budící silou systému. Jak je vidět z grafu č. 2, při posunu fázi o 180° a koeficientu naladění rovnému jedné ($\kappa=1$), dochází k nulovému tlumení systému.



Graf č. 2: Fázový posun [25]

Reálné průběhy takového stavu nikdy nenastanou, nicméně se jim mohou částečně blížit. Ideálně utlumenou soustavu vyjadřuje relativní tlumení rovné jedné ($\gamma=1$).

4.8.1 Průběh testování

Využíval se odezvoový model analýzy, který pracuje s budící a výstupní složkou signálu. Úkolem bylo získat frekvenční odezvoovou funkci (FRF) pro veškeré testované sestavy. Návrh měření vyplýval z důležitosti nezahrnovat do matematického popisu vliv poddajnosti jiných systémů, z toho důvodu byly měřené nástrojové sestavy volně zavěšeny na gumové pružné lano. Dále bylo dbáno na stejné vyložení jednotlivých nástrojů z upínače. Toto hledisko je důležité ke změně dynamických vlastností nástroje při jiné délce vyložení, toto tvrzení vyplývá z [26]. K dispozici byla měřicí aparatura fy Brüel & Kjær jež se skládala z rázového kladívka, jednoosého akcelerometru, měřící karty (převod signálu A/D), počítače se softwarem pro analýzu PulseLabShop (transformace DFT, FFT, antialiasingový filtr) a spojujících prvků. Buzení sestavy zajišťoval úder rázového budícího kladívka do definované části HSK upínače (cca 20mm od čela upínače). Proveditelnost budícího úderu do kompozitního materiálu byla značně ztížena nebezpečím dvojitého úderu (double hit), který by měření ovlivnil hrubou chybou. Velikost buzení byla udávána jako poměr zrychlení a budící síly $[(m \cdot s^{-2})/N]$, tudíž lze výsledky jednotlivých sestav srovnávat. Výstupní signál byl snímán jako odezva pomocí jednoosého IEPE akcelerometru, umístěného na ocelové hlavě nástroje. Získané charakteristiky tuhosti odpovídají výchylce v radiálním směru nástroje. Tato tuhost je klíčová při odklácení nástroje. Měření proběhlo dvakrát pouze u variant, u kterých byl členem sestavy kompozitní nástroj. Snímač výstupního signálu se vždy při druhém opakování měření přemístil o 90° v horizontální rovině. Tato měření byla provedena za cílem odhalit odlišné vlastnosti nástroje v různých směrech, především difference v tuhosti. Jisté odchylky jsou patrné z frekvenční závislosti (frekvence – amplituda). Akcelerometr byl umístěn na nástroji pomocí magnetické části. Rozsah měřených frekvencí byl omezen hranicí 6,4kHz. Získaný signál popisující dynamické vlastnosti nástroje vznikl z průměru tří po sobě jdoucích měření.



Obrázek č. 13: Modální analýza (zprava): zavěšená n. sestava; umístění IEPE akcelerometru; měřicí karta; rázové kladívko

4.8.2 Rozbor signálu

Zpracování získaného signálu pro tuto práci neprobíhalo ve zmíněném analyzátoru PulseLabShop. Data, která byla k dispozici po provedení experimentu, představovala frekvenční odezovou funkci (FRF) a časovou funkci (Time Domain Function). FRF byla komplexně numericky popsána pomocí reálné (Re) a imaginární části (Im). Úkolem bylo tento signál zpracovat pomocí vybraného softwaru a získat obdobná data, která byla zobrazena při měření dynamických vlastností sestav.

Vyhodnocení probíhalo v SW MS Excel, přičemž bylo nutné zpracovat velké objemy dat. Při určování frekvenčních charakteristik byla využita frekvenční odezová funkce. Bylo nutné vypočítat absolutní hodnotu komplexního čísla pro konkrétní frekvence a následně bylo možné vykreslit graf popisující frekvenční charakteristiky.

Reálná část frekvenční odezové funkce je možné využít k vytvoření diagramu stability, tzv. Stability Lobes. Graf diagramu stability popisuje závislosti mezi modálními parametry získanými z FRF. Formulace pro kalkulaci limitní šířky třísky pro frézování vychází ze studie Prof. Tlustého. Vztah je charakterizován specifickou řeznou silou (k_c), minimem reálného kořene záporné části frekvenční odezové funkce ($G_o^{neg}(f)$) a průměrným počtem zubů v záběru (m). Limitní šířka třísky [27]:

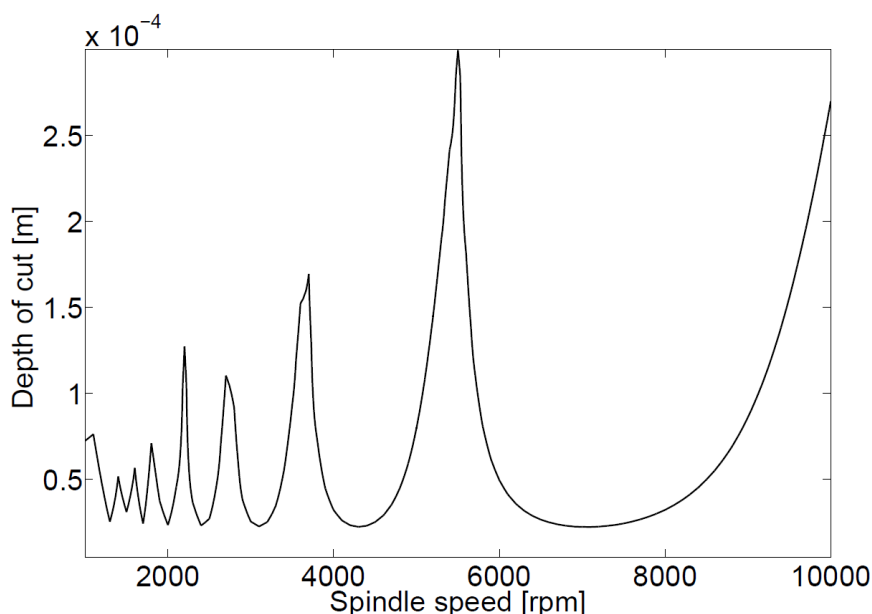
$$b_{lim} = \frac{-1}{2 \cdot m \cdot k_c \cdot G_o^{neg}(f)} \quad (4.9)$$

Tímto výpočtem je určena šířka třísky, při které nebude docházet ke ztrátě stability. Šířku třísky je možné definovat jako funkci axiální hloubky třísky (a_p). Pro stanovení diagramu stability je nutné zahrnout veškeré části reálné složky FRF. Při tvorbě diagramu stability je dále nutné uvážit posun fází.

Otáčková rovnice pro výpočet lobů grafu stability zahrnuje celý počet vln mezi posunem fází (N), posun fáze vln na povrchu obrobku a reálných kmitů nástroje (ε) (tento parametr souvisí s tzv. reprodukčním principem), konkrétní frekvenci (f), počet zubů na nástroji (z) a otáčky nástroje (n). Po úpravě vztahu dostupného z [28]

$$n = \frac{60 \cdot f}{z \cdot (N + \frac{\varepsilon}{2\pi})} \quad (4.10)$$

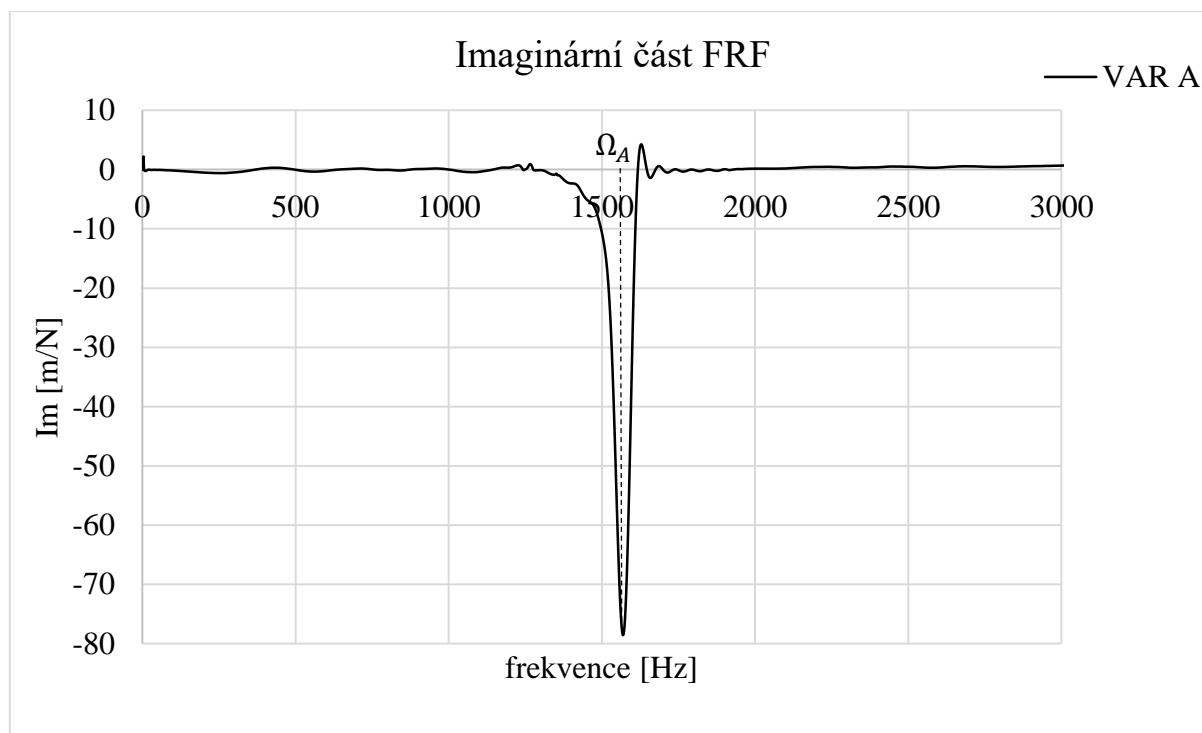
je možné určit celé spektrum stability obrábění. Graf určuje oblasti, ve kterých nástroj nabízí vysokou dynamickou tuhost a je možné zvýšit řezné parametry, aniž by byla ovlivněna stabilita řezu. Na druhé straně zobrazuje kritická pásma, při kterých je nutné dodržet maximální hodnotu šířky třísky, resp. axiální hloubku na nejmenší možné hranici, tedy b_{lim} .



Obrázek č. 14: Diagram stability obrábění [29]

Na základě provedeného výzkumu diplomové práce [28] bylo experimentálně zjištěno, že se diagram stability mění v závislosti na stavu systému, při kterém je měření provedeno. Diagram lze sestavit na základě matematického modelu systému (velice rozsáhlá metoda vycházející z konstrukčního návrhu nástroje, uvažuje nespočet fyzikálně-mechanických faktorů), další možností je měření modální analýzou za statické polohy nástroje (experiment této práce) a poslední možností, jak diagram sestavit, respektive získat data, ze kterých je následně sestaven, je použít měření frekvenční odezvové funkce za rotace nástroje. Metodika tohoto měření a vůbec charakter přístroje pro tento postup nelze z běžně dostupné literatury získat, na rozdíl od výsledků, které jsou v některých odborných pracích zveřejněny. Metoda měření FRF za rotace nástroje získává zatím nejbližší možný pohled na reálné situace nastávající při obrábění. Dle [31] bylo zjištěno, že se závislosti popisující stabilitu obrábění posouvají směrem k vyšším otáčkám a současně mírným směrem k vyšším šířkám třísky. Lobe diagram stability tak nelze brát za stoprocentní predikci pravdivého stavu, nicméně zjišťované odchylky při obrábění nejsou velké (nejpřesnější stanovení lobe diagramu pomocí měření FRF za rotace nástroje).

Imaginární část frekvenční odezvové funkce lze využít pro stanovení vlastní frekvence nástrojové sestavy. Tato metoda je přesnější oproti nacházení vlastních frekvencí ve frekvenčních charakteristikách (platí pro široké peaky). Při zobrazení popisovaných závislostí je tato frekvence jednoznačně určena, jak je patrné z grafu č. 3.



Graf č. 3: Zobrazení imaginární č. FRF a určení vlastní frekvence n . sestavy

Časový záznam sloužil pro získání tlumících charakteristik měřených sestav. Stanovení těchto závislostí bylo vcelku snadné.

4.8.3 Hodnocené parametry

- Tlumící vlastnosti sestav
- Vlastní frekvence nástrojů
- Limitní šířka třísky

Prvním ukazatelem pro hodnocení byly zvoleny tlumící schopnosti sestavy. Hodnoceny byly jednak z časového hlediska, přičemž byl důležitý tzv. dokmitání nástroje. Mezi další sledovaný parametr patřil tvar těchto charakteristik. Vlastní frekvence nástrojových sestav tvořily další parametr vstupující do hodnocení nástrojů a posledním byla limitní šířka třísky. Samotnou tvorbou diagramů stability se tato práce taktéž zabývala, nicméně to sloužilo pouze jako nástroj vysvětlující určité nesrovnalosti při závěrečném hodnocení experimentů.

4.9 Měření vibrací nástroje

Po přepracování konstrukčního návrhu frézy řady 1.0, byly k dispozici dva zcela nové koncepty nástrojů (řada 2.0) s ocelovou výztuhou stopky. Pro nevhodnost použití metody měření AE, byly hledány vhodné alternativy. Jako nejvhodnější přístup k získání přesných hodnot vibrací nástroje byl použit laserový vibrometr, pracující na principu Dopplerova efektu.

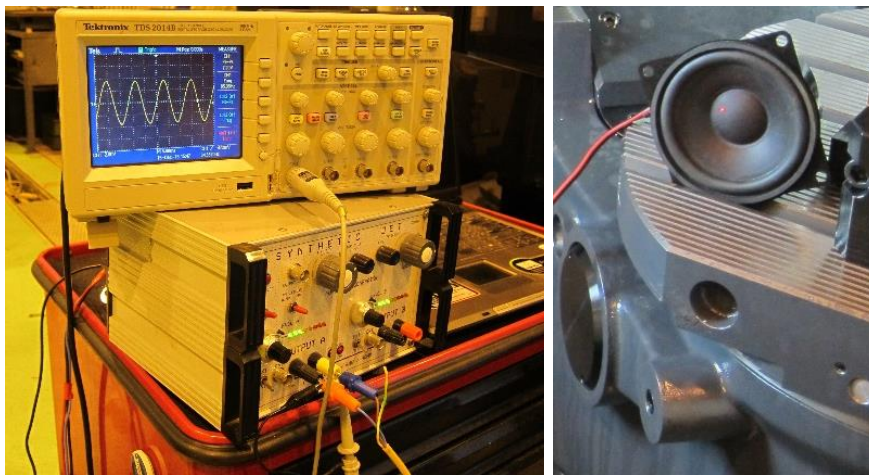
4.9.1 Laserový vibrometr

Předmětem laserového vibrometru bylo měření rychlosti vibrací na stopce nástroje ve dvou polohách. Pro měření vibrací byl zvolen laserový vibrometr Polytec PDV 100, pracující na základě Dopplerova jevu využívající posunu fází vyslaného a odraženého laserového paprsku, za účelem určení rychlosti kmitání měřeného povrchu. Tato bezkontaktní technika měření je schopna monitorovat dynamické chování nástroje s vysokou přesností. Rozsah měřitelných

rychlostí snímání 0-20 [mm/s]; 0-100 [mm/s]; 0-500 [mm/s]. Při měření byla dodržena optimální vzdálenost zdroje paprsku od měřeného objektu ($l = 96 + (n \cdot 138)$ [mm]). Hodnota „n“ nabývá celočíselných hodnot. Více informací o principu vibrometru a metodiky měření - k nalezení v literatuře dostupné z [30].

4.9.2 Kalibrace přístroje

Probíhala při zapojení osciloskopu, reproduktoru připojeného k počítači a zprovozněného laserového vibrometru včetně zapojení pro výstupní signál z měřící aparatury. Kalibrace spočívala ve vybuzení kmitavého pohybu reproduktorem o zvolené frekvenci (např. 800Hz) a současném snímání těchto kmitů z membrány reproduktoru pomocí zaměřeného laserového paprsku. Po nasnímaném signálu vibrometrem se vytvořila frekvenční charakteristika získaného signálu, která zobrazovala zaznamenané frekvence.



Obrázek č. 15: Kalibrace laserového vibrometru

Pro věrohodnost naměřených dat byl proveden test rychlosti snímání vibrací – obsahem přílohy č. 6.

4.9.3 Strategie frézování

Oproti způsobu frézování v případě snímání AE, byla v této metodice strategie změněna. Klíčovou částí pro měření vibrometrem byl nástroj, který se u koncepcie použitého stroje pohyboval (kinematika stroje neumožňuje posuvný pohyb stolu) a s ohledem na časovou náročnost měření bylo nutné zajistit, aby se frézovací nástroj nacházel vždy na stejném místě v XY rovině stroje (tzv. referenční poloha pro měření) a nevznikal tak požadavek na neustálé přemísťování stativu vibrometru, včetně jeho ostření.

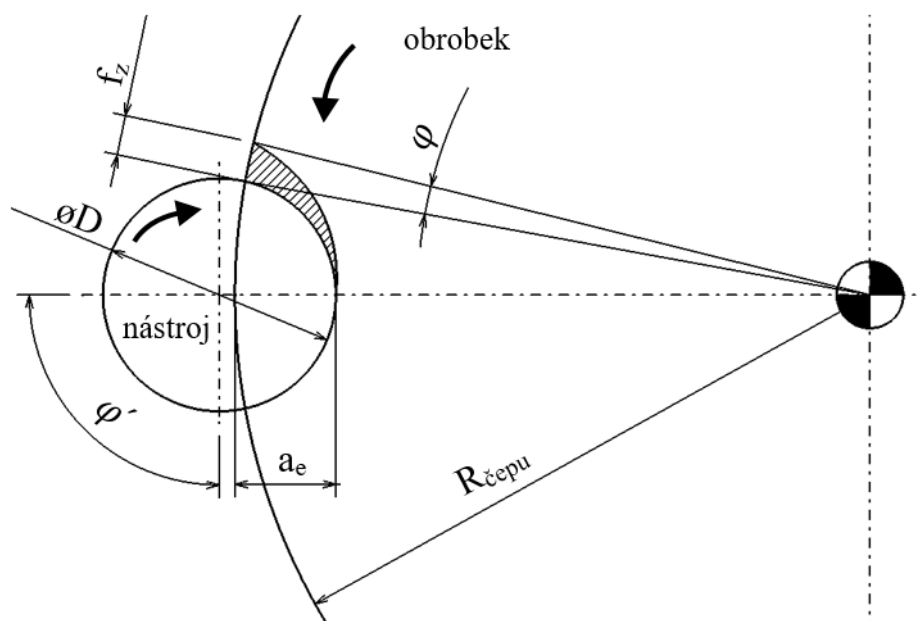
Vhodným způsobem opracování, při stálé poloze vřeteníku během snímání vibrací, byl zvolen následující postup:

- Polotovar: upravený původní (90x90x120) s vytvořeným kruhovým čepem $\varnothing 88\text{mm}$
- Najetí na příslušnou souřadnici Z (nastavení a_p) mimo obrobek
- Najetí do řezu (nastavení a_c) v rovině XY (referenční poloha pro měření vibrací)
- Kruhá interpolace stolu (360°) se zadanou rychlostí rotace
- Vyjetí z řezu

Jak je vidět z postupu, byla nutná úprava polotovaru (vytvoření kruhového čepu na horní ploše obrobku). Důležité bylo dodržet soustřednost kruhového čepu s osou rotace stolu. Pokud by se tak nestalo, rotace stolu by zapříčinila nerovnoměrné zatížení nástroje a následné ovlivnění pohledu na vibrace. Další ověření spočívalo v možnostech rychlosti rotace otočného stolu

(centrum je primárně určeno pro frézování, nedisponuje prstencovým motorem, jako je tomu u soustružnicko-frézovacích center, které disponují vysokou rychlostí rotace otočného stolu).

Řezné podmínky vycházející z předchozího testování zůstaly stejné ($h_m = \text{konst} = 0,1 \text{ mm}$). Úkolem však bylo synchronizovat rotační pohyb nástroje s rotačním pohybem stolu, což mělo význam v dodržení stanoveného posuvu na zub. Svázání pohybů vysvětluje obrázek č. 16. Následně byla pozornost věnována způsobu zadávání NC příkazů pro stroj.



Obrázek č. 16: Synchronizace rotačních pohybů (nástroj/obrobek)

Výpočet vycházek z této podmínky:

Přírůstek času pro rotující nástroj, který opíše délku oblouku vytyčenou úhlem φ' (90°) na poloměru nástroje ($D/2$) je totožný s přírůstkem času, který je potřebný pro opsání délky oblouku vytyčeného úhlem φ na poloměru obrobku ($R_{\text{čepu}}$).

$$\Delta t_{\text{nástroje}} = \frac{\Delta \varphi'}{\omega'} = \frac{\Delta \varphi}{\omega} = \Delta t_{\text{obrobku}} \quad (4.11)$$

Úlohou spočívala v nalezení otáček stolu. Rychlost rotace otočného stolu vycházející ze stanovených řezných podmínek nepřesahovala možnosti rychlosti rotace otočného stolu ($n_{\text{max}} = 60 \text{ [ot./min]}$).

Úhlová rychlost: $\omega = \frac{d\varphi}{dt} \text{ [rad}\cdot\text{s}^{-1}]$

Otáčky nástroje: $n' = 1910 \text{ [ot}\cdot\text{min}^{-1}]$

Úhlová rychlost nástroje: $\omega' = 2\pi f = \frac{2\pi n'}{60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 1910}{60} = 200,0147323 \text{ [rad}\cdot\text{s}^{-1}]$

Výpočet délky oblouku: $L = \frac{\pi r \alpha}{180}$ $\alpha \dots$ obecný úhel $[\circ]$

Přírůstek úhlu $\Delta\varphi$ za $\Delta t_{obrobku}$ při $\omega, f_z = 0,24$:

$$L \approx 0,24 \approx \frac{\pi r \varphi}{180} \rightarrow \varphi = 0,312522 [^\circ] = 0,005454537 [\text{rad}]$$

Přírůstek úhlu $\Delta\varphi'$ za $\Delta t_{nástroje}$ při ω' :

$$\varphi' = \frac{\pi}{2} = 1,570796327 \text{ rad} \rightarrow \text{nástroj má nedělenou rozteč zubů } 4 \times 90^\circ$$

$$\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta\varphi'} * \omega' = \frac{0,005454537}{1,570796327} * 200,0147323 = 0,694544378 [\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}]$$

$$\text{Otáčky stolu: } n = \frac{60 * \omega}{2\pi} = \frac{60 * 0,694544378}{2 * 3,14} = 6,6324 [\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}]$$

Zadat rychlost rotace stolu bylo možné v jednotkách [ot. /min], nebo v obvodové rychlosti [mm/min]. Poloměr pro zadání obvodové rychlosti udávala vzdálenost mezi osou nástroje a osou rotačního stolu. Řezné podmínky pro zadání - uvedené v příloze č. 8.

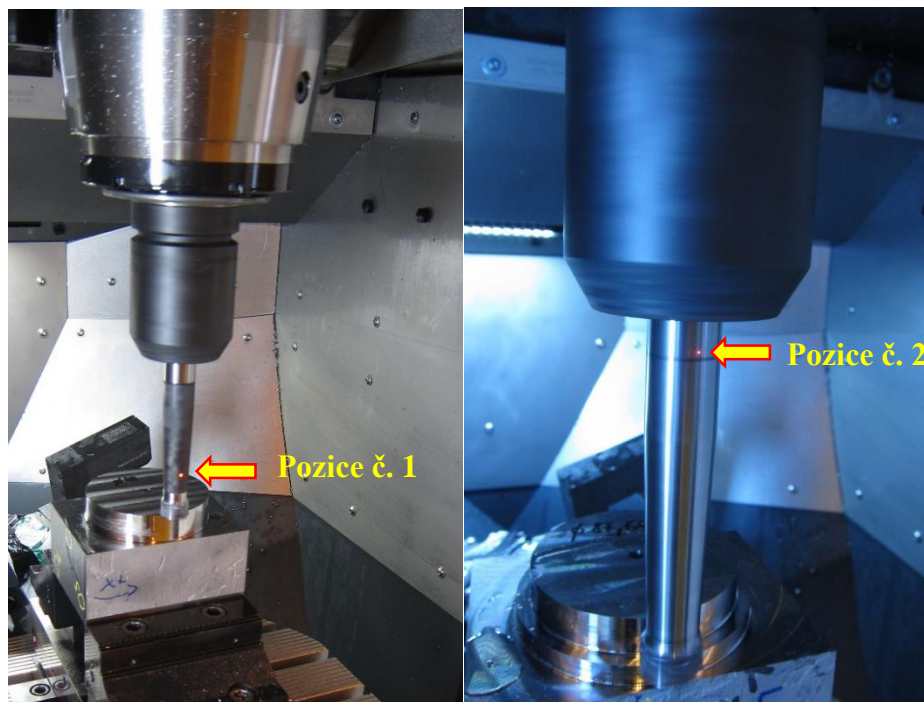
4.9.4 Průběh testování

Pro testování byly k dispozici totožné HSK hydraulické upínače (standardní, upínač s kompozitním materiálem). Otestován byl ocelový nástroj a dva nástroje s kompozitním materiálem. Mimo doposud zmíněné cíle testování v kapitole 4. vznikl další požadavek na výstup a to určení případné diference chování v řezném procesu mezi kompozitními nástroji. Toto zjištění požadoval výrobce nástrojů. Předpokládané využití této informace lze spojovat s budoucí deklarací chování nástroje například u potenciálního zákazníka, který očekává stejné vlastnosti od každého nástroje. Oba kompozitní nástroje řady 2.0 byly vyrobeny stejnou technologií navíjení uhlíkových vláken, nicméně při finálním opracování těchto nástrojů (frézování lůžek pro dosednutí VBD) došlo k mírným výrobním odchylkám. Kompozitní nástroj č. 1 vykazoval čelní házení 0,0623mm a radiální házení 0,0554mm oproti nástroji č. 2, který nabýval hodnoty čelního házení 0,0339mm a radiálního házení 0,0153mm. Protokoly z měření na přístroji Zoller Genius 3 jsou součástí přílohy č. 4. Z pohledu úchylek tvaru byl nástroj č. 2 vyroben přesněji. Při testování byly uváženy nebezpečí destrukce kompozitních nástrojů, a tudíž probíhala průběžná kontrola házení, po každém obrobku jedné hladiny. Při měření nebyly zjištěny zásadní odchylky ani nerovnosti na povrchu obrobku, které by nasvědčovaly zásadnímu porušení nástroje.

Měřená oblast vibrací nástroje byla zvolena ve vzdálenosti 75mm od čela upínače a byla zachována pro všech 16 podmínek experimentů. Záznamy vibrací naměřené v této vzdálenosti tvořili hlavní objem dat pro vyhodnocení. Pro každé nové měření byl laserový paprsek nastaven do výchozí polohy (75mm od čela upínače). Toto nastavení umožňovaly rysky na nástroji, které označovaly úrovně pro startovací pozici paprsku. Uvažována byla i proměnlivá tuhost obrobku v různých horizontálních rovinách. Z tohoto důvodu bylo dbáno na to, aby se polotovary opracovávaly rovnoměrně. Následné porovnání vibrací jednotlivých nástrojových sestav srovnávalo vždy vibrace, v pokud možno totožně vzdálené horizontální rovině (jednoduše řečeno, každý experiment č. 1 začínal na stejné souřadnici osy Z). Tímto postupem se snažilo o dodržení stejných podmínek tuhosti celé soustavy S-N-O, která je v závislosti na poloze vřeteníku, výšce obrobku, proměnná.

Druhou pozicí pro měření vibrací byla zvolena oblast vzdálená 7mm od čela upínače. Důvodem tohoto postupu bylo ověření výsledků, které se u předchozí metodiky zaznamenávají na základě snímání vibrací ze dvou odlišných povrchů nástroje (ocel, CFRP). Před testováním se předpokládaly jiné podmínky odrazivosti a pohltivosti snímaných povrchů. Tento předpoklad se neprokázal a z kontrolního důvodu byly navrženy další cykly snímání vibrací, tentokrát z kovové plochy (část ocelové stopky vyčnívající z upínače nástroje). Toto snímání, se

zaměřením paprsku v 7mm od čela upínače, zaznamenávalo vibrace všech variací nástrojových sestav. Překvapivě byl prokázán stejný trend vibrací, jako při měření v pozici č. 1. Zjištění vede k vyloučení ovlivnění měření na základě fyzikálně rozdílných povrchů snímané plochy.



Obrázek č. 17: Rozdílné pozice laserového paprsku při snímání vibrací

Testy proběhly v tomto pořadí:

- a) Testování varianty A (ocelový upínač + ocelový nástroj)
- b) Testování varianty B (kompozitní upínač + ocelový nástroj)
- c) Testování varianty C1 (ocelový upínač + kompozitní nástroj č. 1 (řada 2.0))
- d) Testování varianty C2 (ocelový upínač + kompozitní nástroj č. 2 (řada 2.0))
- e) Testování varianty D1 (kompozitní upínač + kompozitní nástroj č. 1 (řada 2.0))
- f) Testování varianty D2 (kompozitní upínač + kompozitní nástroj č. 2 (řada 2.0))

Otestované experimenty: 1-16

Počet opakování testů: 2x (vyjma variant s nástrojem č. 1- opakování 1x)

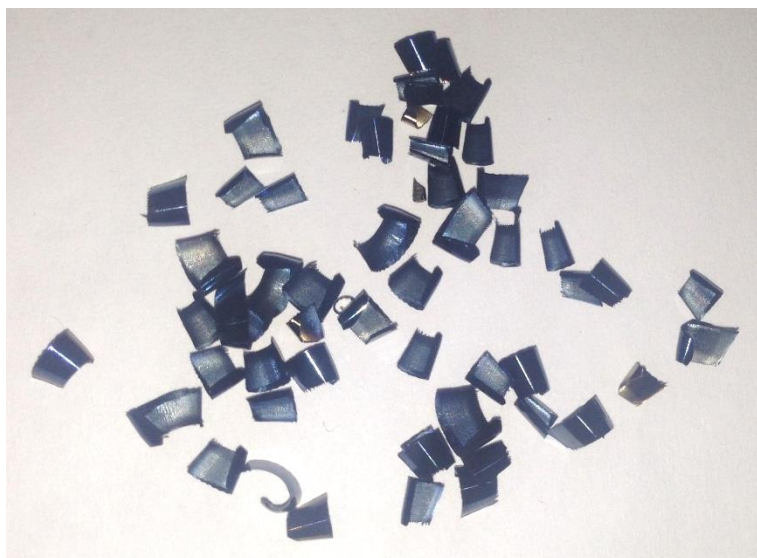
Zaměření paprsku: stopka nástroje (75mm od čela upínače)

Celkově bylo nasnímáno 160 měření, z toho 32 měření pro každou nástrojovou sestavu a 16 měření pro nástrojové sestavy s kompozitním nástrojem č. 1.



Obrázek č. 18: Průběh testů

Z hlediska zvolených parametrů pro frézování nenastávaly komplikace z pohledu na vznikající tvar třísky, který by mohl negativně ovlivňovat testování. Při obrábění vznikaly obloučkovité třísky dělené. Tento tvar třísky je řazen do třídy ISO 6.

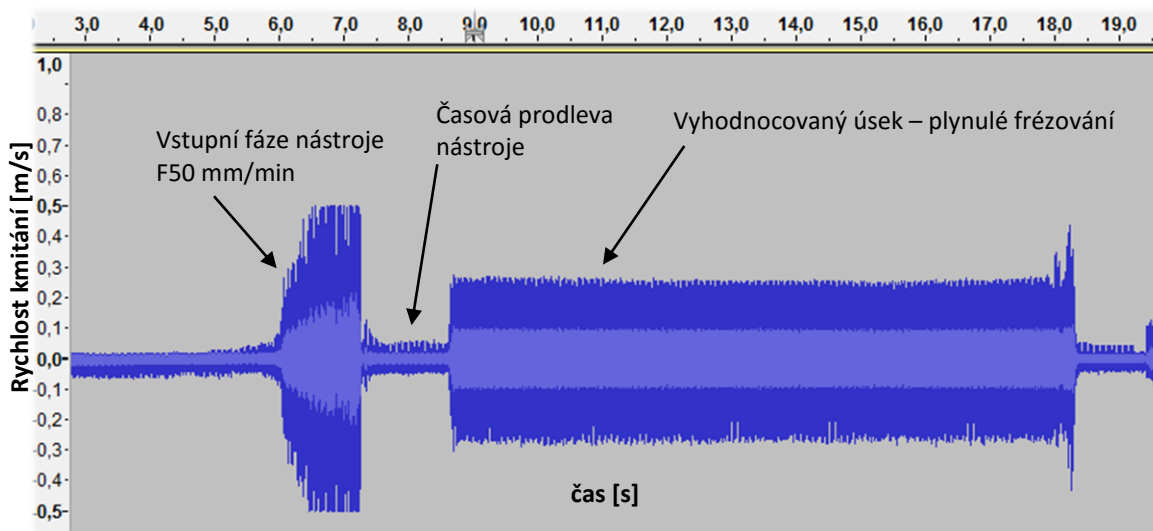


Obrázek č. 19: Tvar třísky ISO 6 (6.2)

4.9.5 Získaný signál

Před samotným měřením bylo nutné zapojit veškeré potřebné prvky měřicího přístroje. Pro správné měření bylo nutné zaostření paprsku na měřený povrch (míra zaostření ovlivňuje intenzitu zpětného paprsku, pro relevantní měření snaha o co nejvyšší intenzitu). Start snímání byl spouštěn v nahrávacím softwaru (Audacity). Výstupní signál z vibrometru představoval průběh rychlost kmitání snímaného povrchu [m/s] v závislosti na čase. Formát signálu byl v digitální podobě. Tvorba tohoto formátu dat závisela na převodu analogového signálu na

digitální, která proběhla ve snímacím zařízení. Výstupní signál se podrobil antialiasing kontrole 5kHz.



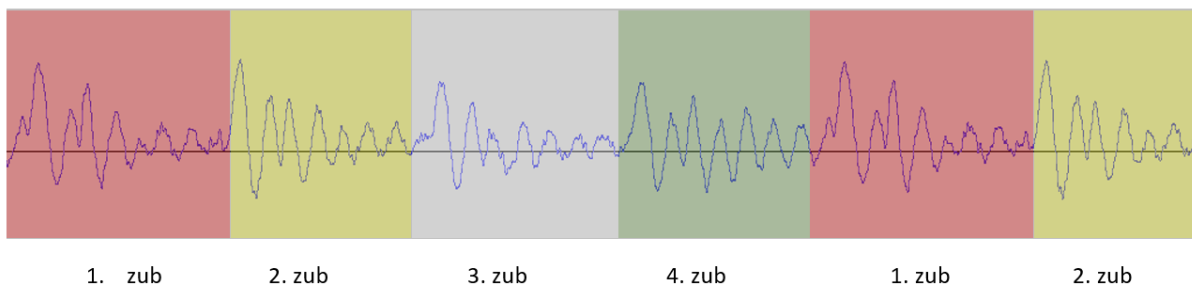
Obrázek č. 20: Získaný signál z vibrometru

Antialiasing je chápán jako chyba při měření, která souvisí se vzorkováním spojitého signálu v čase. Pro vznik tohoto jevu je zvolena příliš nízká vzorkovací frekvence signálu v porovnání s frekvencí, kterou je nutné snímat. V případě měření vibrací nástroje byla dodržena podmínka, kdy je maximum snímané frekvence (f_{max}) alespoň dvojnásobkem frekvence vzorkovací (f_{vz}).

Pro jednotlivé záznamy snímané záznamy bylo nutné zajistit minimální posun (offset) signálu ve vertikálním směru od horizontální plochy, který by následně ovlivnil vyhodnocované parametry. Data o konkrétním záznamu nabízely informaci o hodnotě posunu, která přispěla ke zpřesnění výsledků (byla uvažována při výpočtu hodnocených faktorů).

4.9.6 Rozbor záznamů

Při hledání periodického signálu bylo zjištěno, že sekvence výchylek se neustále opakují v čase. Opakující se podoba signálu rychlosti kmitání vykazovala určité odlišnosti. Nalezeny byly celkem čtyři mírně odlišné opakující se sekvence. Každému charakteristickému úseku lze přiřadit jeden konkrétní zub frézy. Toto tvrzení vyplývá z logiky věci, čtyřem mírně odlišným periodicky se opakující úsekům jsou přiřazeny čtyři zuby nástroje - ověřeno výpočtem a rozбором signálu.



Obrázek č. 21: Detailní pohled na průběh rychlosti kmitání nástroje v čase,

Úseky pro následné hodnocení byly vybrány tak, aby nedošlo k ovlivnění výsledků rychlostmi vibrací při vstupu nástroje do řezu, hodnocení se zaměřuje pouze na proces za vstupní fází, zároveň jsou vynechány fáze výstupu nástroje z řezu.

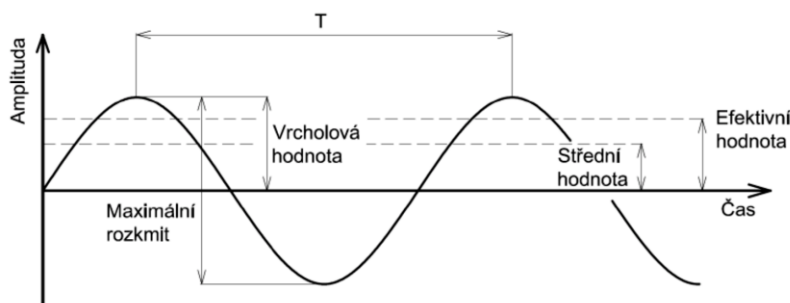
4.9.7 Hodnocené parametry

a) Efektivní hodnota kmitání nástroje

Efektivní hodnotu lze považovat jako statickou hodnotu měnící se veličiny, v našem případě rychlosti kmitání. V anglické literatuře je tato hodnota označena indexem RMS (Root Mean Square), neboli druhá odmocnina ze střední hodnoty kvadrátu časového průběhu funkce [31].

Efektivní rychlost vibrací v_{ef} :

$$v_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T v^2(t) dt} \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (4.12)$$

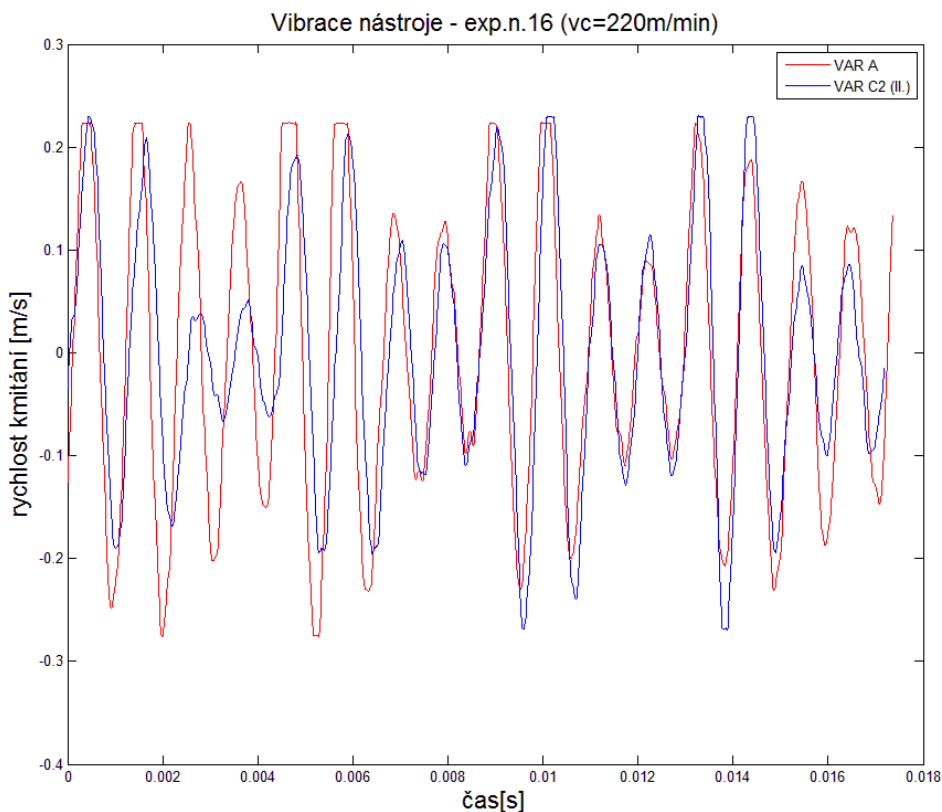


Obrázek č. 22: Efektivní hodnota

Způsob stanovení efektivní hodnoty nabízela funkce v SW Audacity, nicméně nebylo známo, jakým algoritmem byly hodnoty vypočteny. Tento podnět vedl k ověření získaných hodnot efektivní rychlosti kmitání pro veškeré nasnímané záznamy (160 záznamů). Digitální záznam dat v programu Audacity byl převeden na analogický. Tento způsob byl nutný pro zpracování signálu v prostředí MatLab. V každém záznamu (SW Audacity) byla vyčleněna charakteristická část a analogově popsána. Zkreslení dat bylo minimální, jelikož byl přírůstek pro numerický popis signálu extrémně malý (0,00001s). Časová délka se u vybraných úseků pohybovala v rozmezí 4,5s. Formát dat představoval numerický popis časové osy a příslušnou hodnotu rychlosti kmitání. Tato data byla následně propojena se systémem MatLab, a na základě vytvořeného algoritmu byly pro veškeré záznamy přepočítány hodnoty efektivních rychlostí.

b) Porovnání kmitání jednotlivých sestav

Dalším přístupem k nalezení možného popisu chování jednotlivých sestav byla použita metoda, při které došlo k zobrazení rychlostí kmitání dvou nástrojových sestav v jednom grafu. Pro stejná čísla experimentů byly vybrány podobně vypadající signály. Na základě numerického popisu těchto signálů a zpracování v prostředí Matlab, došlo k vytvoření překrytí obou záznamů kmitání. Poté bylo možné posuzovat jednotlivé nastavení a změnu chování nástrojů.



Graf č. 4: Zobrazení rychlosti kmitání (experiment č. 15)

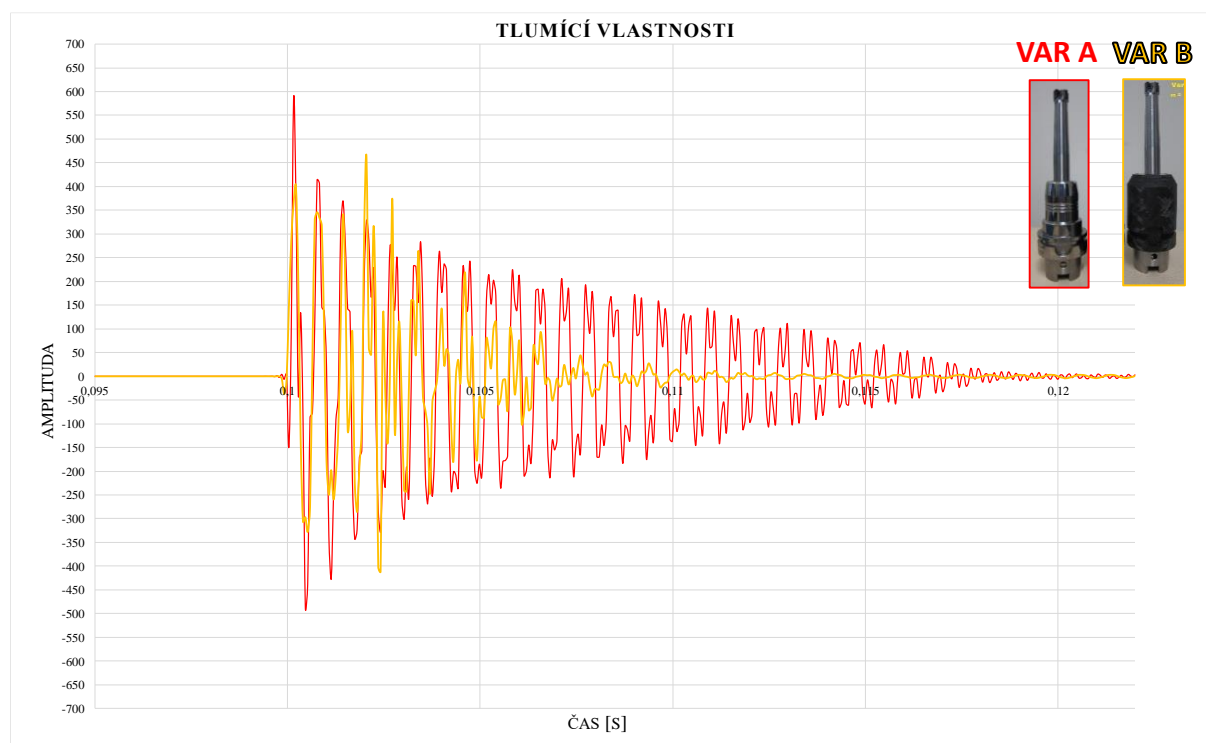
5 Experimentální část

Tato stěžejní část představuje výstupy jednotlivých experimentů a testovacích metod, které byly zmíněné v kapitole č. 4, vyjma pre-experimentů. Právě vysvětlené závěry pre-experimentů sloužily jako vodítka v průběhu celého řešení. Pre-experimenty posloužily pro nalezení správného směru a postoje k hodnocení a prokazování přínosu kompozitního materiálu. Dalším přínosem bylo vytvoření závěrečné metodiky, která stanovila charakteristiky jednotlivých variant. Na základě dílčích rozborů a analýz hlavních experimentů, byla určena závěrečná shrnutí, která ucelila pohled na uhlíková vlákna v aplikacích frézy a HSK upínače.

5.1 Výstupy z modální analýzy – tlumící charakteristiky

Vychází se z časových záznamů pro jednotlivé varianty, které jsou hodnoceny pomocí tzv. „zázněje“ respektive koeficientu materiálového tlumení. Následující grafy reprezentují srovnání variant vůči celo-ocelové variantě A, která je považována jako referenční.

5.1.1 Varianta A vs. varianta B



Graf č. 5: Tlumící charakteristiky (varianta A, varianta B)

Hodnocení:

Kompozitní upínač má pozitivní vliv na tuhost sestavy. Kmitání zcela vyhlazeno v kratším časovém úseku oproti referenci.

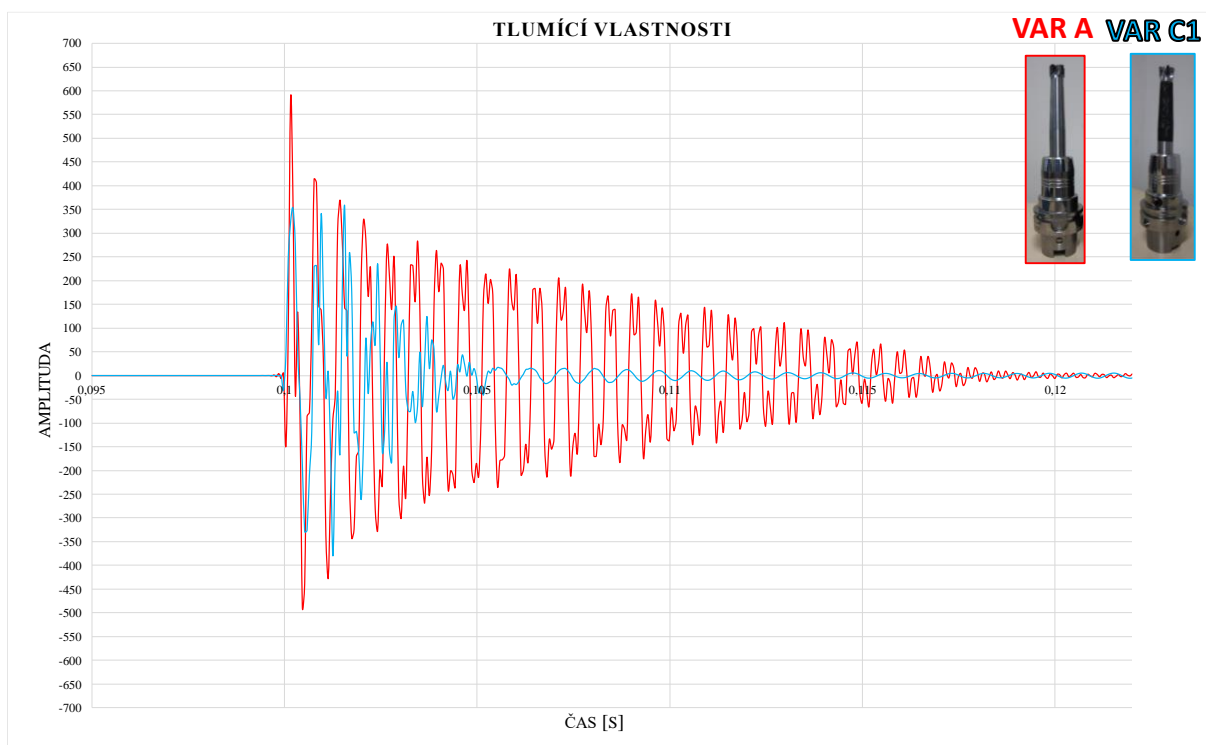
5.1.2 Varianta A vs. varianta C

Jak bylo zmíněno v kapitole 4.8.1, měření pro variantu C proběhlo vždy ve dvou směrech. K dispozici jsou tedy celkem čtyři záznamy časových funkcí. Pro určení jistých odlišností je nutností tyto grafy vzájemně porovnat. Označení jednotlivých průběhů je následující:

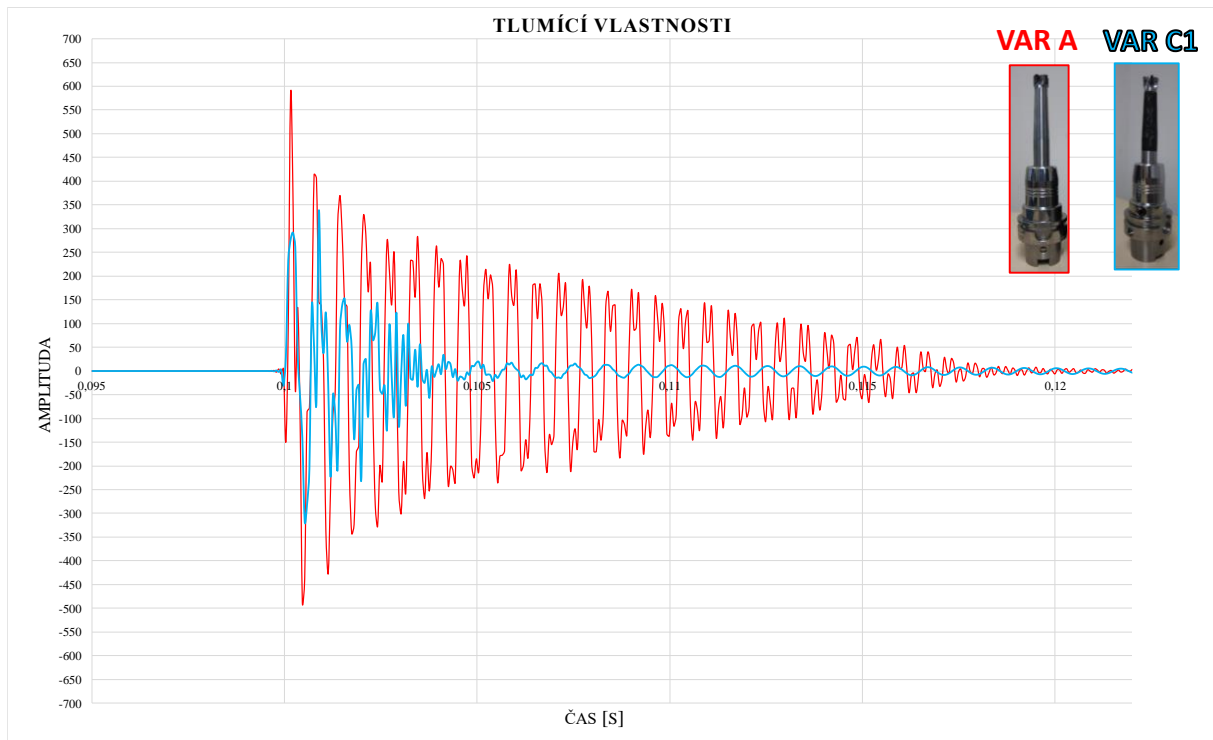
Varianta C, kompozitní nástroj č. 1, I. měření: C1 (I.)

Varianta D, kompozitní nástroj č. 2, II. měření: D2 (II.)

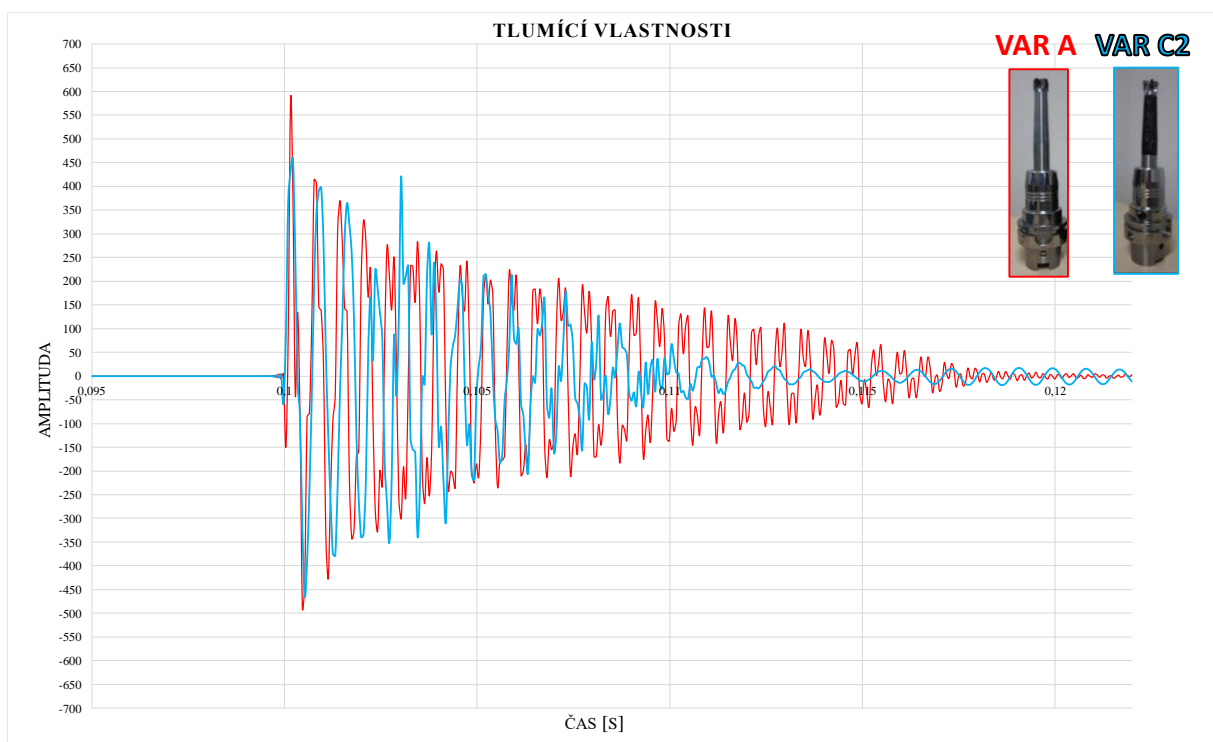
Ostatní označení je možné určit pomocí stejného postupu.



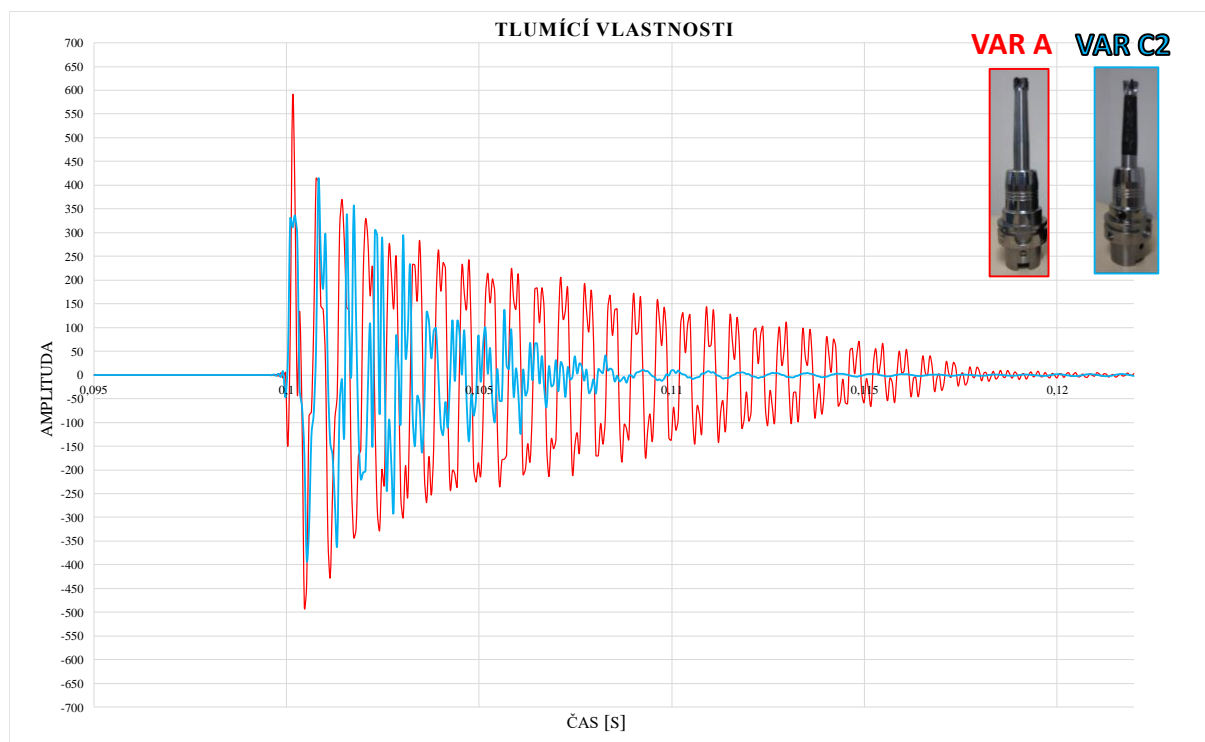
Graf č. 6: Tlumící charakteristiky - varianta A, varianta C1 (I.)



Graf č. 7: Tlumící charakteristiky - varianta A, varianta C1 (II.)



Graf č. 8: Tlumící charakteristiky – varianta A, varianta C2 (I.)



Graf č. 9: Tlumící charakteristiky – varianta A, varianta C2 (II.)

Hodnocení:

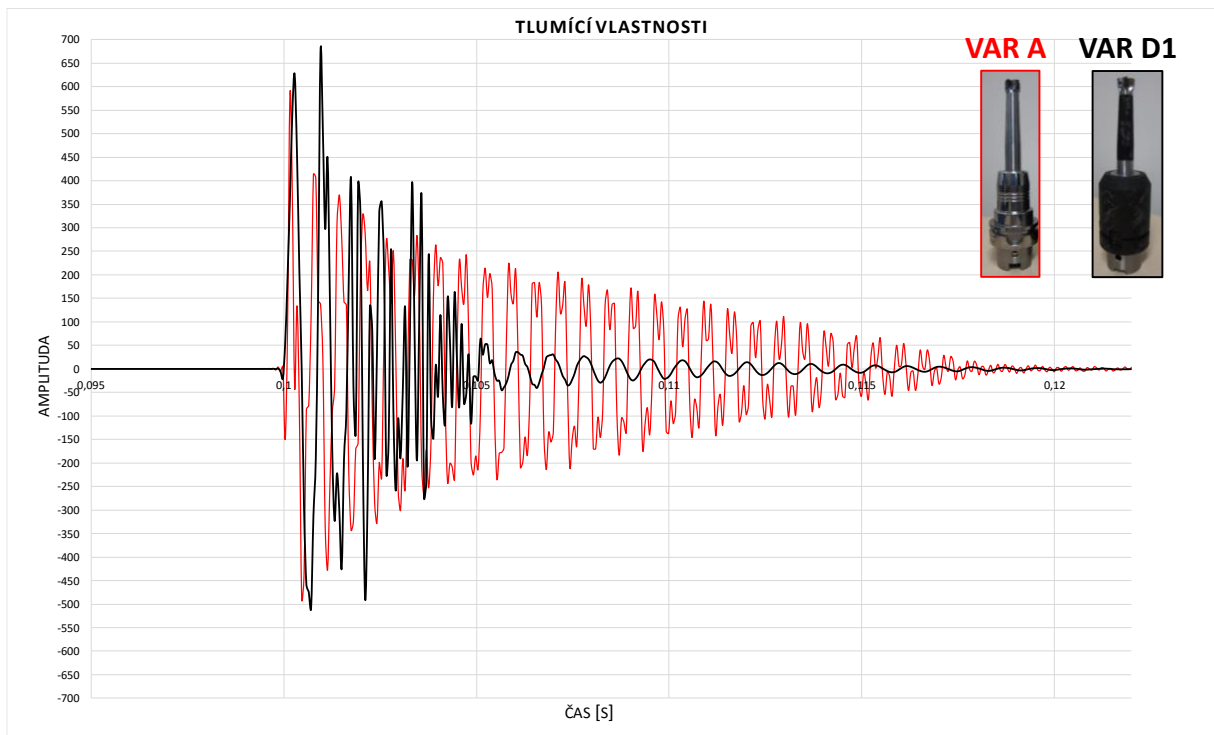
Pro možné srovnání se stanovilo jedno grafické zobrazení průběhu tlumení varianty C. Za referenci varianty C byl vybrán průběh měření varianty C2 (II.). Tento výběr nebyl náhodný, ale vycházel z frekvenčních charakteristik (zobrazené v další kapitole) a následného použití konkrétních kompozitních nástrojů v řezném procesu. Varianta s kompozitním nástrojem č. 2 byla vybrána záměrně, jelikož je v další části provedeno měření vibrací na nástroji s dvojnásobným opakováním. Tento krok se nabízí z důvodu větší vypovídající schopnosti, při následném propojování závěrů z jednotlivých experimentů. Výběr představitele je ovlivněn počtem nasazení nástroje č. 2 v řezném procesu.

Varianta C2 (II.) dosahuje lepších tlumících vlastností než referenční VAR A. Pro průběh VAR C2 (I.) jsou charakteristické zbytkové kmity, které se ne zcela vyhladí.

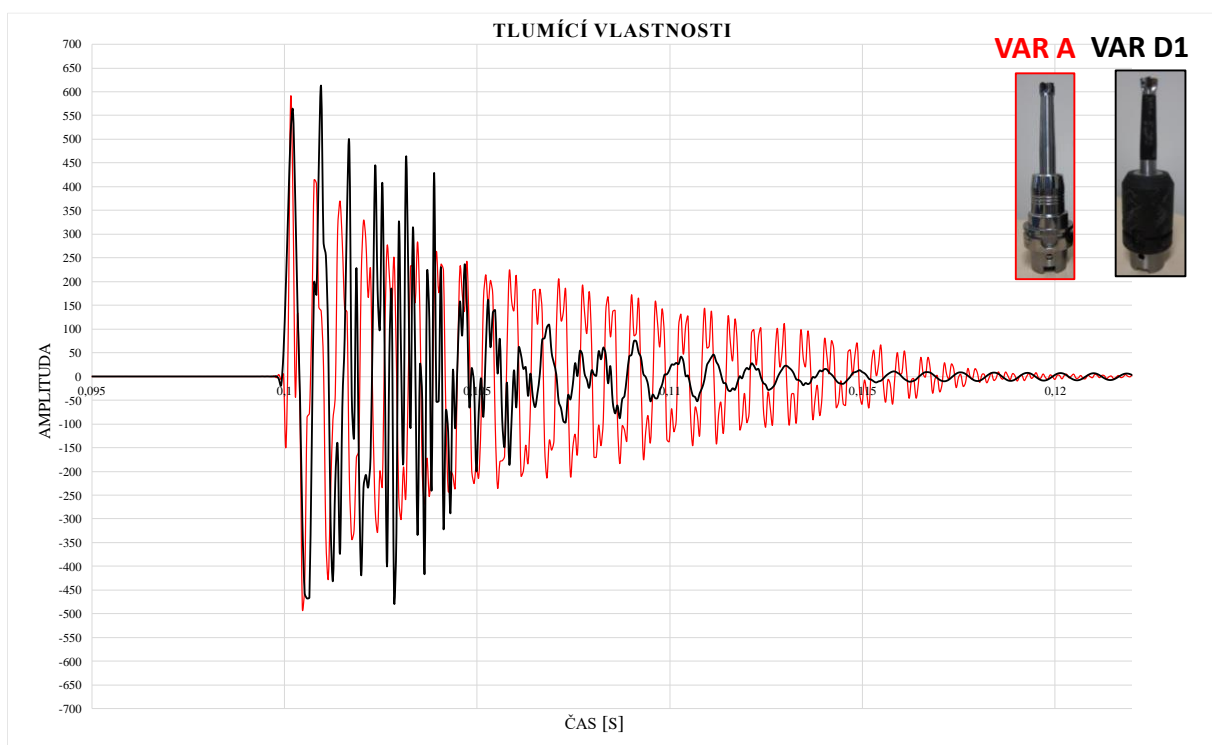
Amplitudy kmitů jsou srovnatelné s referenční variantou A, mnohdy i nižší. Jediný případ, kdy je amplituda opakovaně větší, než reference je VAR C2 (I.).

Varianta C1 (I.) a varianta C1 (II.), respektive grafy č. 6 a č. 7 mají o něco jiný průběh v porovnání s variantou C2 (I.) a variantou C2 (II.) respektive grafy č. 8 a č. 9. Toto zjištění vede k hypotéze, že nástroje nemají totožné modální vlastnosti. Důvodem těchto odlišností se nabízí uvažovat difference v seskupení vláken u nástroje č. 1 a u nástroje č. 2, případně jiné výrobní vlivy. Pro tyto nástroj č. 1 je typická větší výchylka se strmějším spádem oproti variantě nástroji č. 2. Zmenšení amplitud výchylek u nástroje č. 1 lze považovat za skokové. Oba kompozitní nástroje prokazují jistou heterogenitu s ohledem na modální vlastnosti, která je podložena často mírně rozdílnými tvarů křivek.

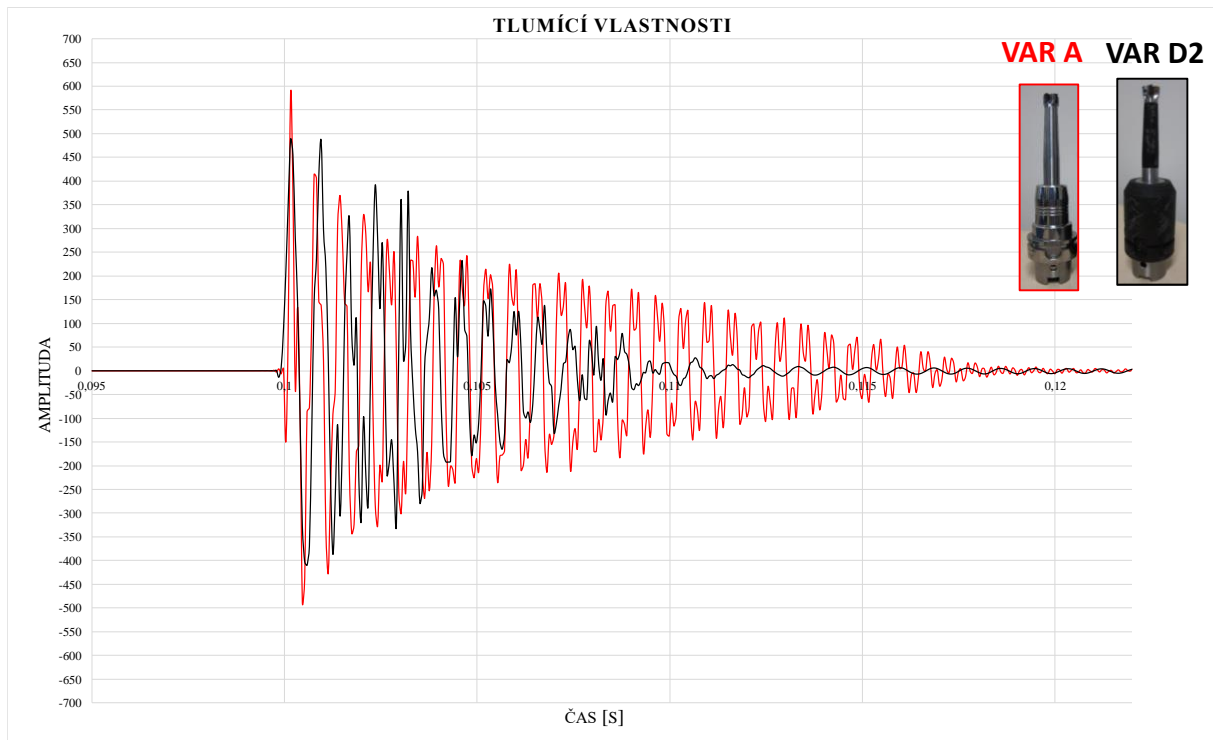
5.1.3 Varianta A vs. varianta D



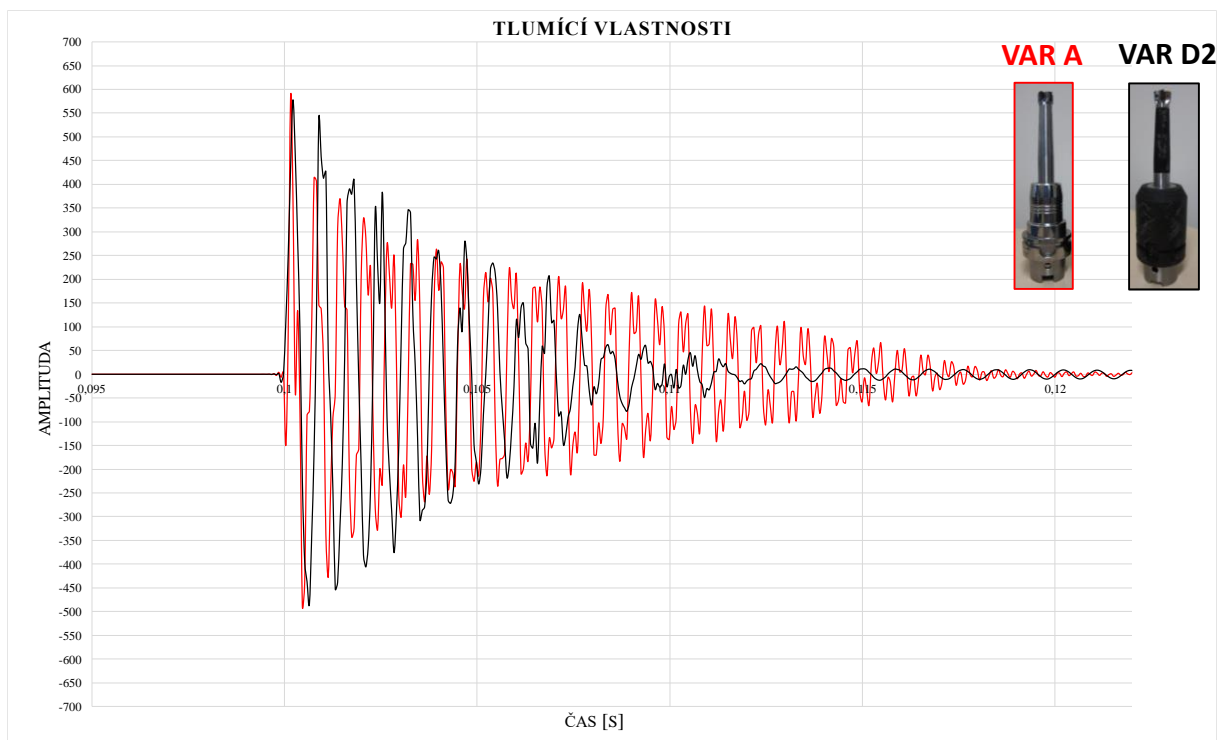
Graf č. 10: Tlumící charakteristiky - varianta A, varianta D1 (I.)



Graf č. 11: Tlumící charakteristiky - varianta A, varianta D1 (II.)



Graf č. 12: Tlumící charakteristiky - varianta A, varianta D2 (I.)



Graf č. 13: Tlumící charakteristiky - varianta A, varianta D2 (II.)

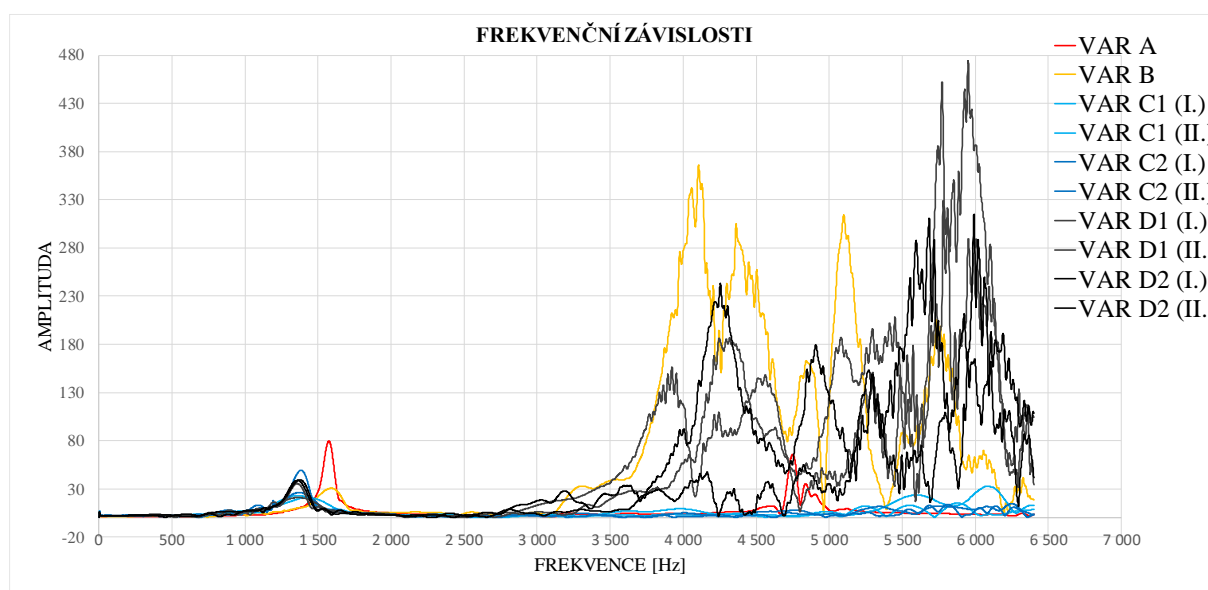
Hodnocení:

U této nástrojové sestavy, bylo při výběru referenční varianty, postupováno stejným způsobem jako u varianty C. Zvolenou referencí se stala varianta D2 (II.) (graf č. 13). Charakteristiky vybrané reference kopírují výchylky varianty A s mírným přesahem v první části grafického zobrazení a následně se tyto výchylky zmenšují. V oblasti horizontální osy grafu jsou zaznamenány zbytkové kmity, které převyšují kmitání ocelové sestavy.

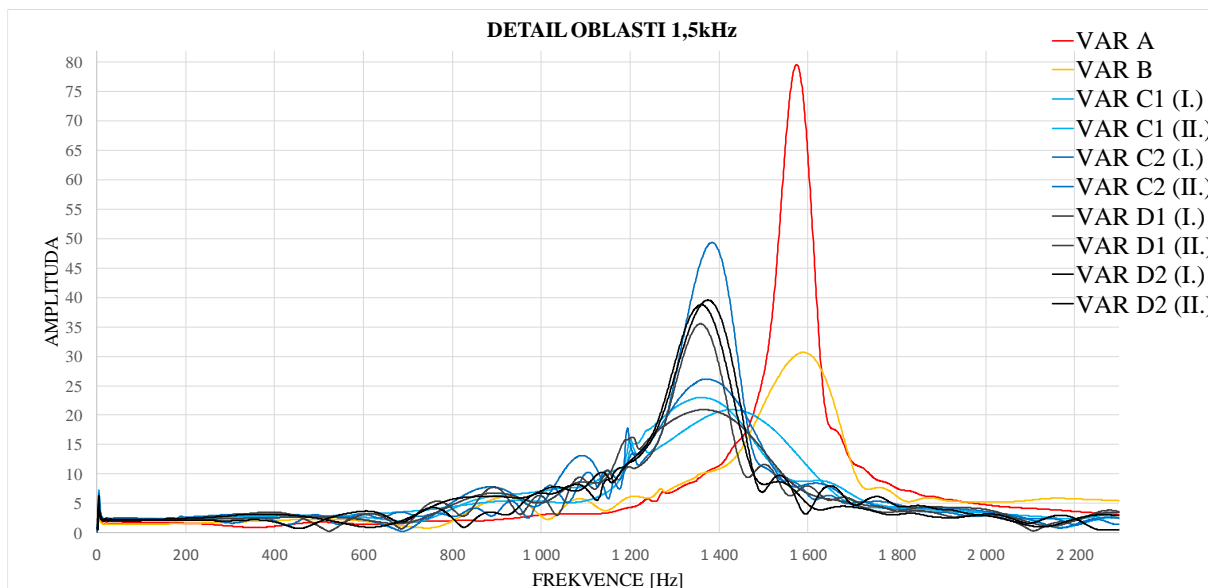
Grafické zobrazení dokazuje rozdílné vlastnosti frézy č. 1 a frézy č. 2. Rozdíl mezi těmito nástroji reprezentuje obdobný charakter křivek, na jaký bylo poukázáno při popisu variant C1 a C2. Oba kompozitní nástroje opět projevily určité známky heterogenních dynamických vlastností, které se mohou negativně projevit při nasazení v procesu frézování.

5.2 Výstupy z modální analýzy - frekvenční charakteristiky

Zobrazení frekvenčních charakteristik v grafu č. 14 zobrazují celou šíři měřitelného rozsahu měřící aparatury. Při posuzování hodnot vlastních frekvencí jednotlivých sestav bylo přihlíženo ke klesající koherenci signálu v oblastech 3,5 až 6,4kHz. V důsledku toho došlo k vyčlenění zmíněného pásma z hodnocení jednotlivých variant. První peaky charakterizující vlastní frekvence jsou patrné v oblasti 1,5kHz. Bližší pohled pro tuto oblast tvoří graf č. 15. Při porovnávání zvýšení/snížení tuhosti byly uvažovány hodnoty výchylek při rezonanci nástroje. Ukazatel zvýšení tuhosti (zavedeno označení Σ) je dán jako poměr tuhosti standardní varianty A a nestandardních variant, ($\Sigma=k_A/k_i$).



Graf č. 14: Frekvenční charakteristiky – naměřený rozsah 0 - 6,4kHz



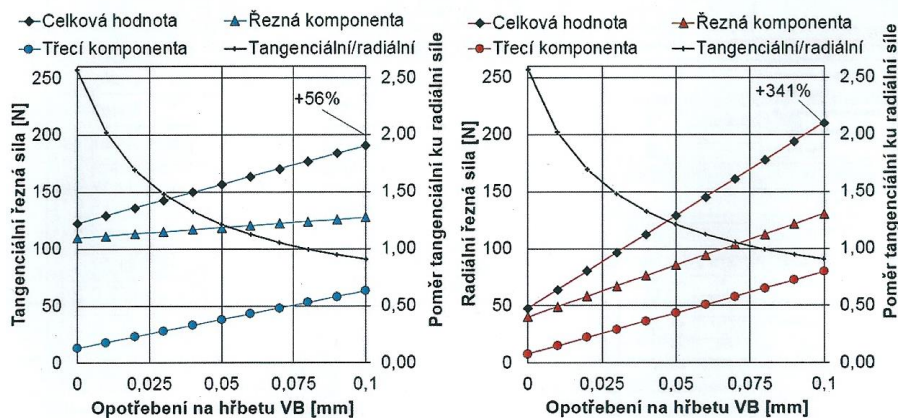
Graf č. 15: Detail oblasti 1,5kHz

Zobrazené křivky popisují vztah frekvence a relativní amplitudy. Pro hodnocení na základě frekvenčních charakteristik platí, že čím vyšší výchylka dané křivky na ose amplitudy, tím je systém poddajnější. Z pohledu tuhosti nástrojové sestavy (značení vychází dle obr. č. 6), která je definována vztahem

$$k_y = \frac{\Delta F_{CN1}}{\Delta y} \left[\frac{N}{\mu m} \right] \quad (5.1)$$

platí, že čím větší výchylka, tím menší tuhost (nezávisí na velikosti působící síly).

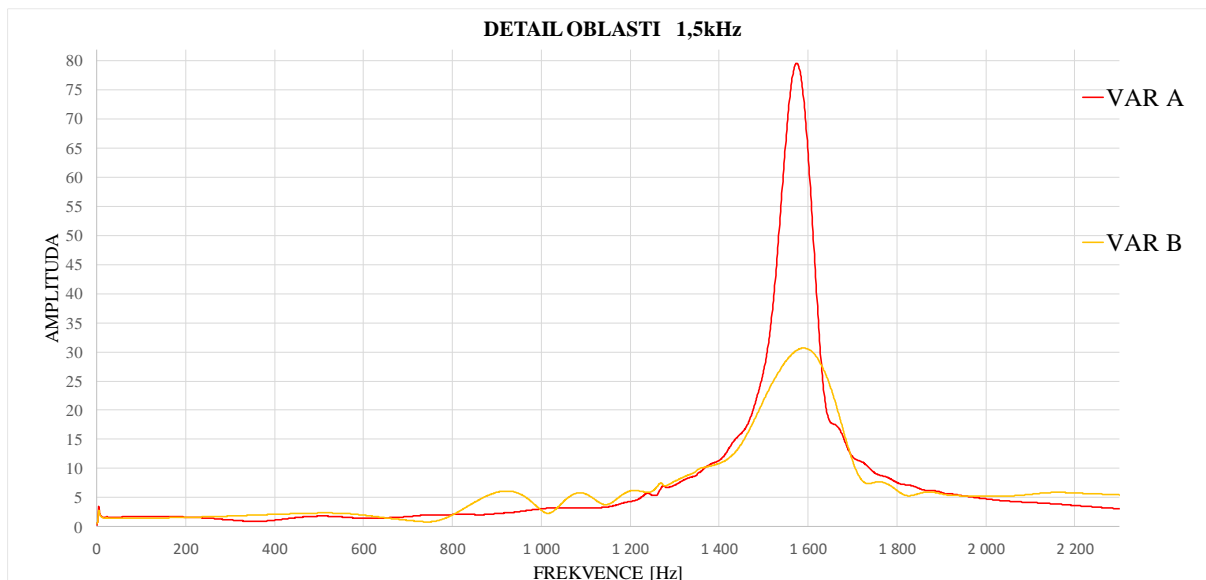
Dle způsobu umístění a směru osy snímání výstupních signálů byly získané signály popisující dynamické vlastnosti v radiálním směru nástroje. Tato tuhost je klíčová v případě, kdy se znásobí silový účinek radiální řezné síly vlivem opotřebení břitu nástroje a mnohdy i převládne nad tangenciální složkou. Tangenciální složka pochopitelně taktéž vzrůstá, nicméně v řádech desítek procent oproti až tři sta násobnému převýšení původní hodnoty radiální složky. Tuto změnu dokazuje získaný poměr na základě experimentů dle [32]. Simulaci nárůstu tangenciální a radiální řezné síly a jejich komponent v průběhu trvanlivosti nástroje znázorňuje graf č. 16. Ve vazbě na to je zcela viditelná změna poměru mezi celkovou velikostí tangenciální a radiální síly. Příklad je uvažován pro frézování válcovou frézou se šikmými zuby.



Graf č. 16: Simulace nárůstu tangenciální (vlevo) a radiální (vpravo) řezné síly [32]

Pro zobrazené charakteristiky (graf č. 15) vykazuje největší poddajnost varianta A. Veškeré nestandardní varianty vykazují vyšší tuhost, avšak křivky charakterizující kompozitní nástroje je nutné podrobit bližšímu rozboru.

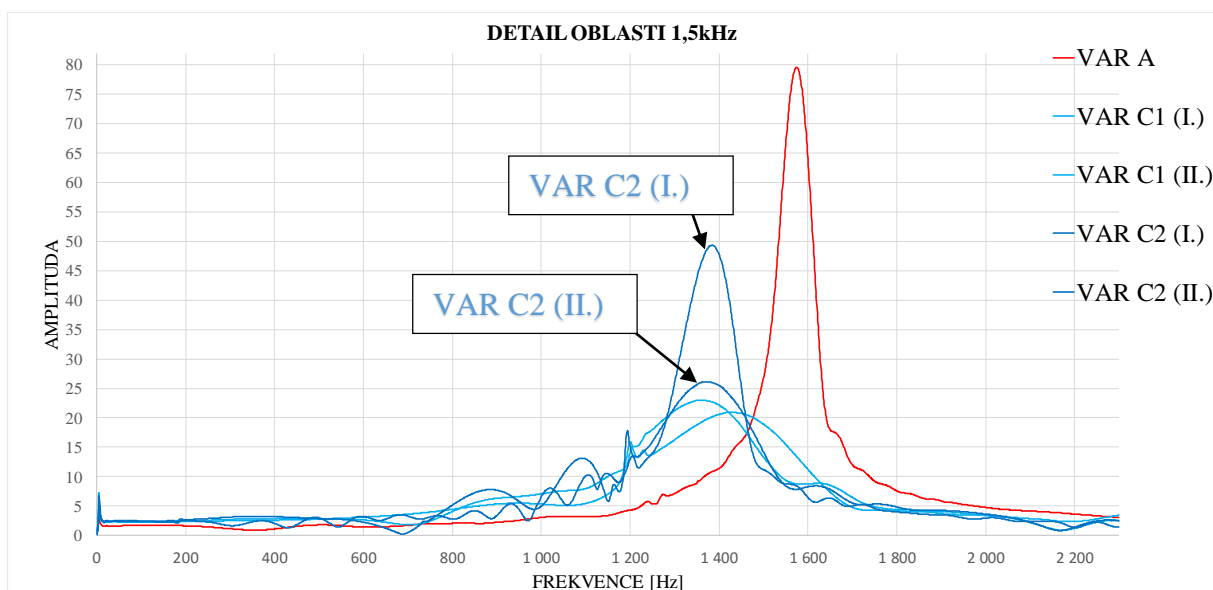
5.2.1 Varianta B



Graf č. 17: : Zobrazení frekvenčních charakteristik varianty B

Uplatnění uhlíkového kompozitního materiálu je opodstatněno navýšením tuhosti varianty B o téměř 2,5 násobek oproti standardu ($\Sigma=2,47$). Tento graf zobrazuje vliv kompozitního upínače. Jak je vidět z pozice špiček křivky varianty A a varianty B, kompozitní upínač měl zásadní vliv na tuhost sestavy, nikoliv na naladění systému jako celku, což je stanoveno při pohledu na téměř shodné vlastní frekvence sestav, $\Omega_A = 1569\text{Hz}$, $\Omega_B = 1570\text{Hz}$.

5.2.2 Varianta C



Graf č. 18: Zobrazení frekvenčních charakteristik pro všechna měření varianty C

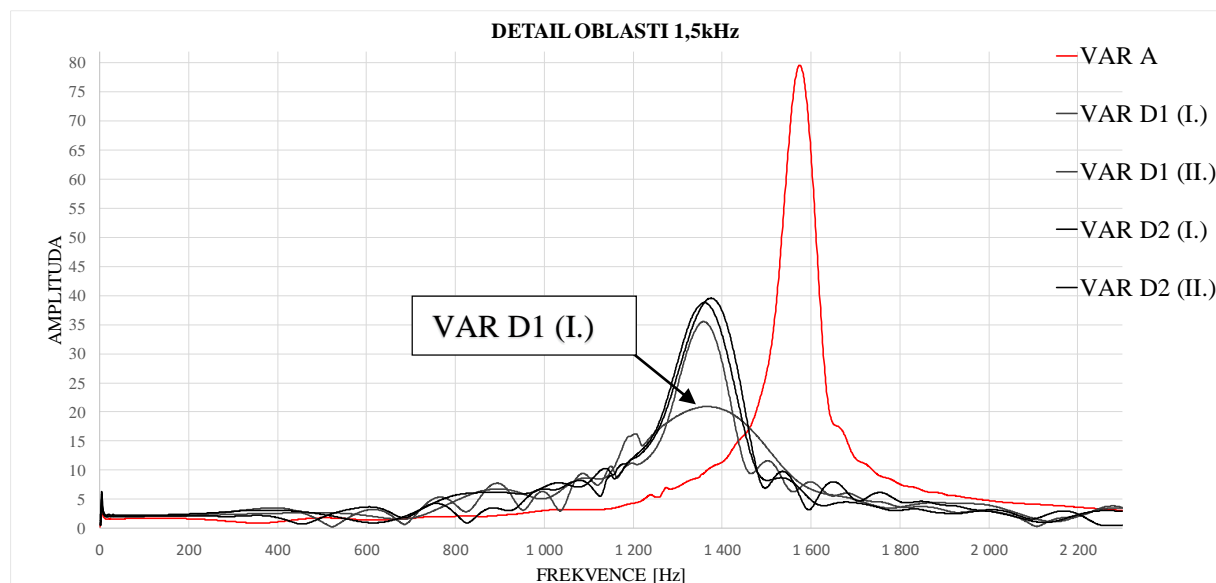
V grafu č. 17 převládají tři křivky, které mají menší výchylku než křivka VAR C2 (I.). Lze předpokládat, že závislosti mohou být ovlivněny rozdílnou tuhostí v různých směrech

nástroje, v tomto případě je výchylka varianty C2 (I.) o 88% vyšší, než je tomu u stejného nástroje ve směru o 90°potočeném tj. referenční varianta pro hodnocení těchto závislostí (varianta C2 (II.)). Druhým vysvětlením může být chyba měření. Veškeré křivky popisující charakter chování sestavy C vykazují zvýšení tuhosti oproti standardu. Při porovnání referenční varianty C2 (II.) a standardní varianty A, došlo ke zvýšení tuhosti vlivem použití kompozitního materiálu na nástroji o hodnotu tuhosti přesahující 3,5 násobek tuhosti varianty A, ($\Sigma=3,71$). Vlastní frekvence pro tuto sestavu zůstala víceméně neměnná, hodnoty jsou uvedeny v tabulce č. 8.

Měřená sestava	Zjištěná vlastní frekvence Ω_c [Hz]
C1 (I.)	1351
C1 (II.)	1401
C2 (I.)	1374
C2 (II.)	1361

Tabulka č. 8: Hodnoty vlastních frekvencí pro variantu C

5.2.3 Varianta D



Graf č. 19: Zobrazení frekvenčních charakteristik pro všechna měření varianty D

K dispozici jsou opět čtyři závislosti popisující celo-kompozitní sestavy. Pro obě měření varianty D2 charakteristika vykazuje značnou shodu. Jako reprezentující průběh varianty D byl stanoven průběh D2 (II.). Reference se s drobnými odchylkami shoduje s nástrojem č. 1. Z frekvenčních křivek vybočuje měření pro variantu D1 (I.), které vykazuje o 84% nižší výchylku ve srovnání s referencí (varianta D2 (II.)). Při porovnání referenční varianty pro sestavu D, tedy variantu D2 (II.) se standardem došlo ke zvýšení tuhosti dvojnásobně, ($\Sigma=2,06$).

V následující tabulce č. 9 jsou uvedeny zjištěné vlastní frekvence provedených měření u varianty D.

Měřená sestava	Zjištěná vlastní frekvence Ω_D [Hz]
D1 (I.)	1347
D1 (II.)	1353
D2 (I.)	1362
D2 (II.)	1352

Tabulka č. 9: Hodnoty vlastních frekvencí pro variantu D

Při porovnání vlastních frekvencí varianty C a varianty D byl potvrzen vliv upínače na tuhost sestav, nikoliv na celkové naladění. Z výsledků vyplývá, že dominantní vliv na hodnotu vlastní frekvence určuje nástroj. U posouzení hodnoty vlastní frekvence se vycházelo ze vztahu (4.8.4.), nutně říci, že v porovnání vlastních frekvencí jednotlivých nástrojových sestav neplatí pravidlo, čím vyšší frekvence, tím lepší řešení. Vlastní frekvence je obrazem naladění daného systému a určuje pouze frekvenční oblasti, kterým je nutné se vyhnout, pokud není požadována rezonance systému (hudební nástroje). Vysokými hodnotami vlastní frekvence je možné oddálit oblast rezonance od násobků frekvence budící síly. Experimentálně testované nástroje vykazovaly odlišnou hmotnost jednotlivých členů a tak je srovnávání vlastních frekvencí krajně nepoužitelné co do posouzení pořadí nástrojových sestav.

5.3 Výstupy z modální analýzy – limitní šířka třísky

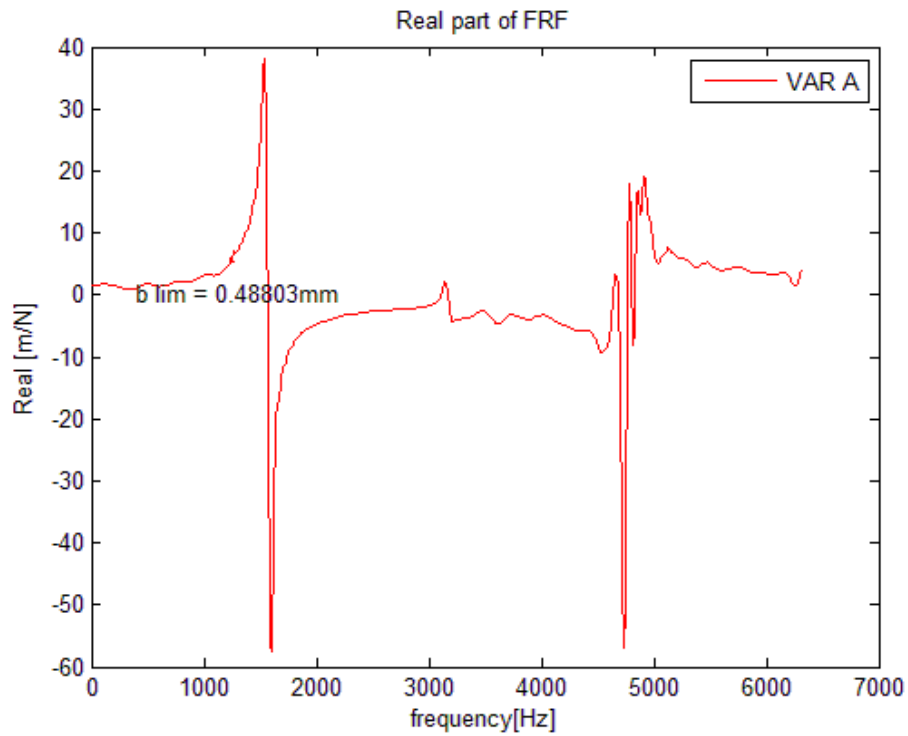
Zpracování těchto hodnot proběhlo v prostředí Matlab. Důvodem bylo rychlé generování velkého počtu grafů, při současném zpracování značných objemů dat. Důležitým výstupem z tohoto prostředí byly hodnoty limitních šířek třísky. Vyhodnocování proběhlo v rovině popsané v kapitole 4.8.2. Limitní šířka třísky je chápána jako ukazatel zvýšení množství odebraného materiálu (Q). Ukazatel se vypočte následujícím způsobem:

$$Q = \frac{a_p \cdot a_e \cdot v_f}{1000} \quad [\text{cm}^3/\text{min}] \quad (5.2)$$

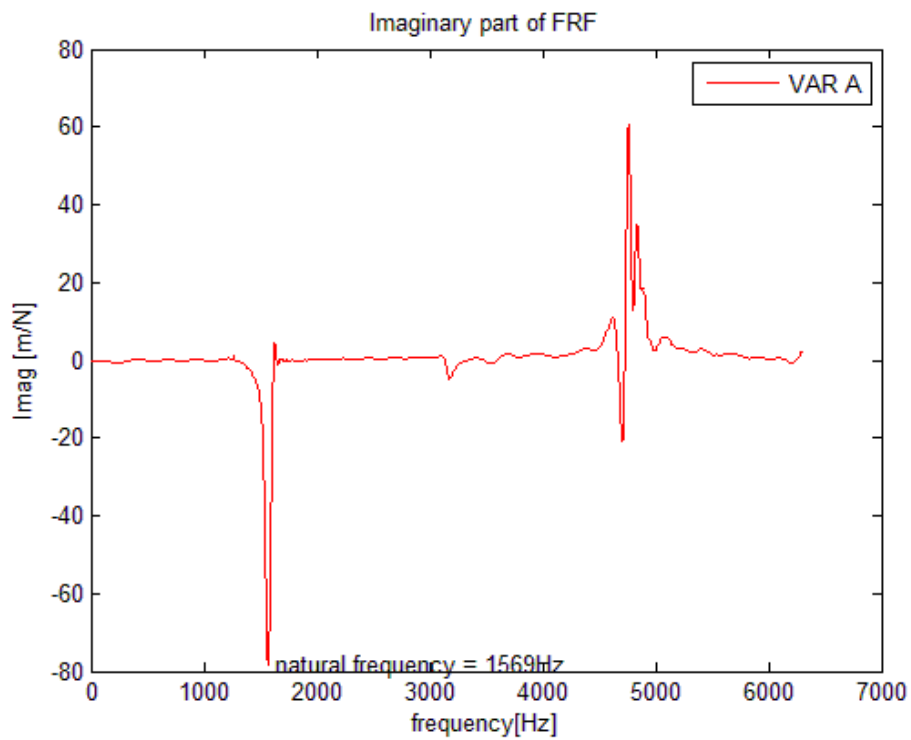
Radiální záběr nástroje je reprezentován faktorem a_e , posuvová rychlost (v_f) vychází z posuvu na zub frézy (f_z) a otáček nástroje (n). Limitní šířka třísky vystupuje ve faktoru axiální hloubky třísky (a_p). Vztah těchto faktorů objasňuje výpočet vycházející z geometrie nástroje.

$$b_{lim} = \frac{a_p}{\sin \kappa_r} \quad [\text{mm}] \quad (5.3)$$

Veškeré grafy zobrazující průběhy reálných a imaginárních složek jsou umístěny do přílohy č.1.



Graf č. 20: Reálná složka FRF – varianta A



Graf č. 21: Imaginární složka FRF – varianta A

V následující tabulce jsou uvedeny hodnoty vypočtených limitních šířek třísky. Pro výpočet byl aplikován vztah 4.8.5 v kapitole 4.8. Hodnota specifické řezné síly byla stanovena na základě katalogu Tungaloy a specifikaci obráběného materiálu, ($k_{c1,1}=1800\text{MPa}$).

Varianta	b_{lim}	Násobek zvýšení hospodárného úběru materiálu Q
	[mm]	[cm^3/min]
A	0,488	1
B	1,232	2,524
C1 (I.)	1,545	3,166
C1 (II.)	1,609	3,297
C2 (I.)	0,601	1,232
C2 (II.)	1,299	2,661
D1 (I.)	1,550	3,177
D1 (II.)	0,924	1,893
D2 (I.)	0,730	1,496
D2 (II.)	0,788	1,614

Tabulka č. 10: Určené limitní šířky třísky jako ukazatel zvýšení produktivity obrábění

Pro všechny nestandardní varianty došlo ke zvýšení limitní šířky třísky, což vede ke zvýšení axiální hloubky třísky a_p , případně úpravě geometrie nástroje snížením úhlu nastavení hl. ostří κ_r a tedy větší přiblížení směru působení výslednice řezné síly s vřetenem.

Dosažitelná axiální hloubka třísky: $a_p \leq 0,7\text{mm}$

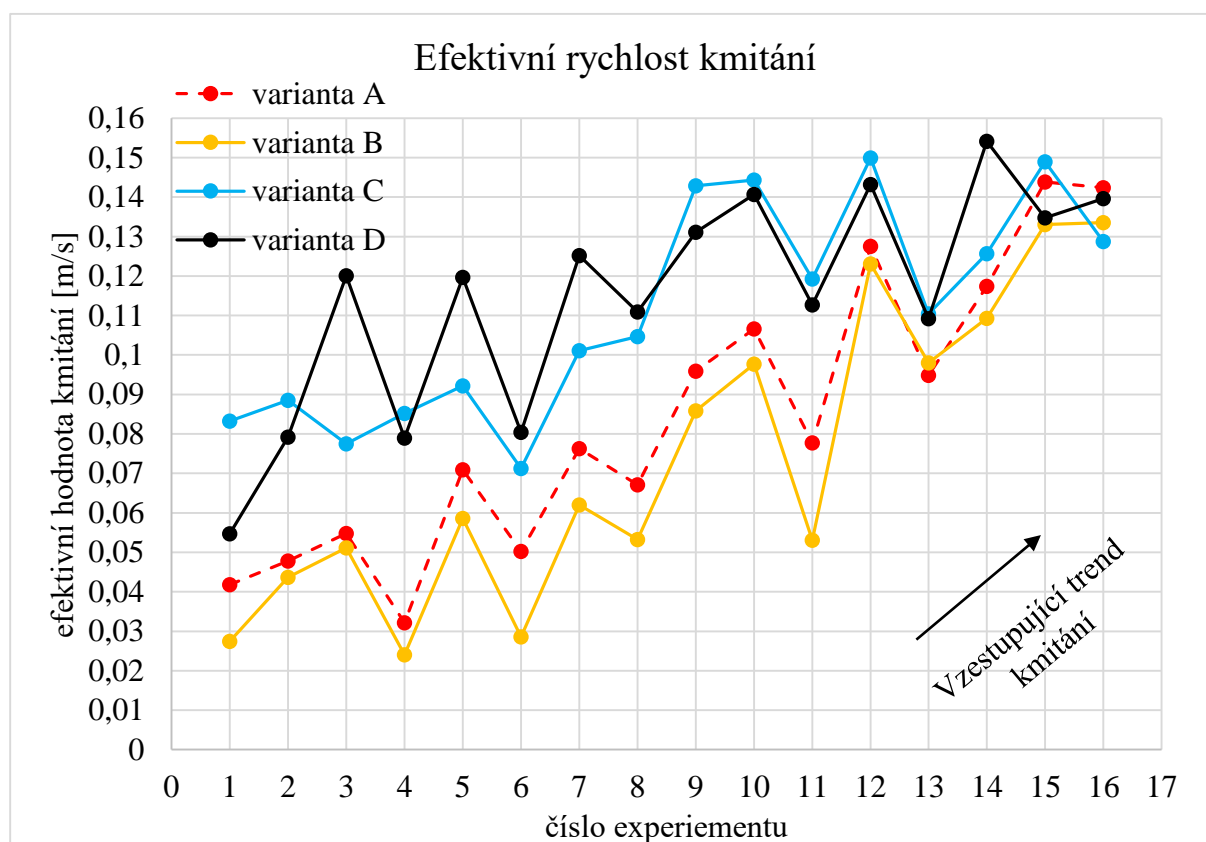
Omezení platí pro vyložení nástroje přesahující $5xD$, nicméně geometrie VBD umožňuje úběr třísky při maximální hodnotě hloubky třísky v axiálním směru 1mm.

5.4 Výstupy z měření vibrací nástroje

Tento experiment prakticky ověřil předpokládané vlastnosti sestav s uhlíkovými vlákny. Při měření vibrometrem byl uvažován i faktor radiálního házení nástroje kontra měření vibrací a ovlivnění výsledků. Z tohoto důvodu došlo k ověření, zda zjištěné odchylky v tomto směru neovlivňují výsledky. Pro získaný signál proběhlo hodnocení nasnímaných rychlostí kmitání nástroje (za rotace) v nezátíženém stavu (v pozici mimo materiál). Výsledné hodnoty vibrací se pochopitelně u jednotlivých sestav lišily, nicméně byl stanoven závěr, který vyloučil možné ovlivnění výsledků a zatížení výraznou chybou, díky rozměru nasnímaných vibrací, který byl v porovnání s naměřenými hodnotami minimální.

5.4.1 Efektivní rychlost kmitání nástrojových sestav

Zobrazené závislosti vychází z výpočtu dle algoritmu v Matlabu, který prokázal totožný charakter průběhu efektivních rychlostí na provedených experimentech.



Graf č. 22: Zobrazení výsledků efektivní rychlosti pro testované experimenty

Trend všech křivek zobrazuje nárůst vibrací v řezném procesu vlivem zvyšující se řezné rychlosti, neboli zvyšujících se frekvencí buzení systému. Hodnoty efektivních vibrací se místy skokově měnily, což kopíruje skokové změny v zadávaných řezných podmínkách. Pro hodnocení těchto závislostí je nutné přistupovat ke každému experimentu, jako k nově nastavenému systému. Jednotlivé spojnice bodů pouze upozorňují na zásadní změnu při křížení, které značí změnu chování nástrojů vůči sobě. Tyto křivky jednoznačně vypovídají o chování jednotlivých sestav při obrábění. Je možné vidět určitou podobnost průběhu vibrací přes testovanou škálu experimentů.

č. experimentu	A2	B2	C2 (II.)	D2 (II.)
1	0,0417855	0,0274825	0,0832396	0,0547099
2	0,0477854	0,0436949	0,0885302	0,0791769
3	0,0547502	0,0511365	0,0774508	0,1200655
4	0,0321428	0,0240587	0,0852116	0,0789126
5	0,0708869	0,0585933	0,0922039	0,1196586
6	0,0502309	0,0285824	0,0712685	0,0804443
7	0,0763049	0,0620317	0,1011176	0,1251501
8	0,0671241	0,0532412	0,1046306	0,1108785
9	0,0958878	0,0858033	0,1428654	0,1311013
10	0,1065725	0,0976961	0,1442967	0,1406350
11	0,0777600	0,0530863	0,1192426	0,1127213
12	0,1275302	0,1230356	0,1499448	0,1431454
13	0,0948353	0,0980455	0,1104492	0,1091716
14	0,1173751	0,1092997	0,1256684	0,1541399
15	0,1438301	0,1330352	0,1489294	0,1347300
16	0,1423815	0,1335232	0,1287534	0,1395901
průměrný pokles/nárůst vibrací [%]	-	snížení	zvýšení	zvýšení
	reference	-21,1	+27,7	+29,6

Tabulka č. 11: Hodnoty efektivních rychlostí [m/min]

(kompletní hodnoty pro veškeré testované varianty viz příloha č. 3)

Z grafu č. 22 a tabulky č. 11 vyplývají tyto závěry:

VARIANTA B:

- Varianta B prokázala přínos uhlíkových vláken v téměř celém testovaném rozsahu (vyjma experimentu č. 13, kdy o 4% přesáhla efektivní hodnotu kmitů varianty A)
- Varianta B prokázala v průměru snížení vibrací o 21%
- Maximální snížení vibrací bylo dosaženo v experimentu č. 1 a to o celých 52%

VARIANTA C:

- Varianta C neprokázala potenciál uhlíkových vláken v celém rozsahu, došlo k průměrnému zvýšení vibrací o 27,7%
- Varianta C dosáhla maximálních vibrací v experimentu č. 1, nárůst o 50% oproti standardu
- Varianta C změnila svůj charakter v experimentu č. 16, kde došlo ke snížení vibrací oproti standardu o 10,6%

VARIANTA D:

- Varianta D neprokázala potenciál uhlíkových vláken v celém rozsahu, došlo k průměrnému zvýšení vibrací o 29,6%
- Varianta D změnila svůj charakter v experimentu č. 15 a č. 16, při snížení vibrací o 13,6% v obou experimentech
- Nejvyšší nárůst vibrací oproti standardu byl zaznamenán u experimentu č. 4 o 59,3%

Pohled na kompozitní nástroje:

- Varianty C a D vykazují výrazně vyšší vibrace v oblasti nižších řezných rychlostí (nižšího dynamického zatížení systému)
- Prokázala se funkčnost kompozitních nástrojů (varianty C, D) při výraznějším dynamickém zatížení (pozitivní zjištění vzhledem k vyšším hodnotám úběru materiálu (Q [cm^3/min]), který má dopad na produktivitu obrábění, platí pro experimenty 15, 16)
- Vysvětlení změny charakteru varianty C a varianty D v experimentu č. 15 a č. 16, analyzovány v příloze č. 5. Hledání změny charakteru ve výhodnosti nastavení řezných podmínek pro variantu C a D, s ohledem na problematiku rezonancí probíranou v kapitole 4.8.
- Průběhy kmitání mohla ovlivnit i změna modulu pružnosti v závislosti na hodnotě frekvenčních zatížení nástrojových sestav. Při vysokofrekvenčním buzení (vysoká řezná rychlost) kompozitního materiál se hodnota modulu pružnosti zvyšuje, na rozdíl od nízkofrekvenčního zatížení (nízká řezná rychlost). Tento jev napovídá použití kompozitní materiály při vyšších řezných rychlostech (experiment byl omezen použitím nejvyšší rychlosti s ohledem na obráběný materiál, trvanlivost, teplotu řezání)

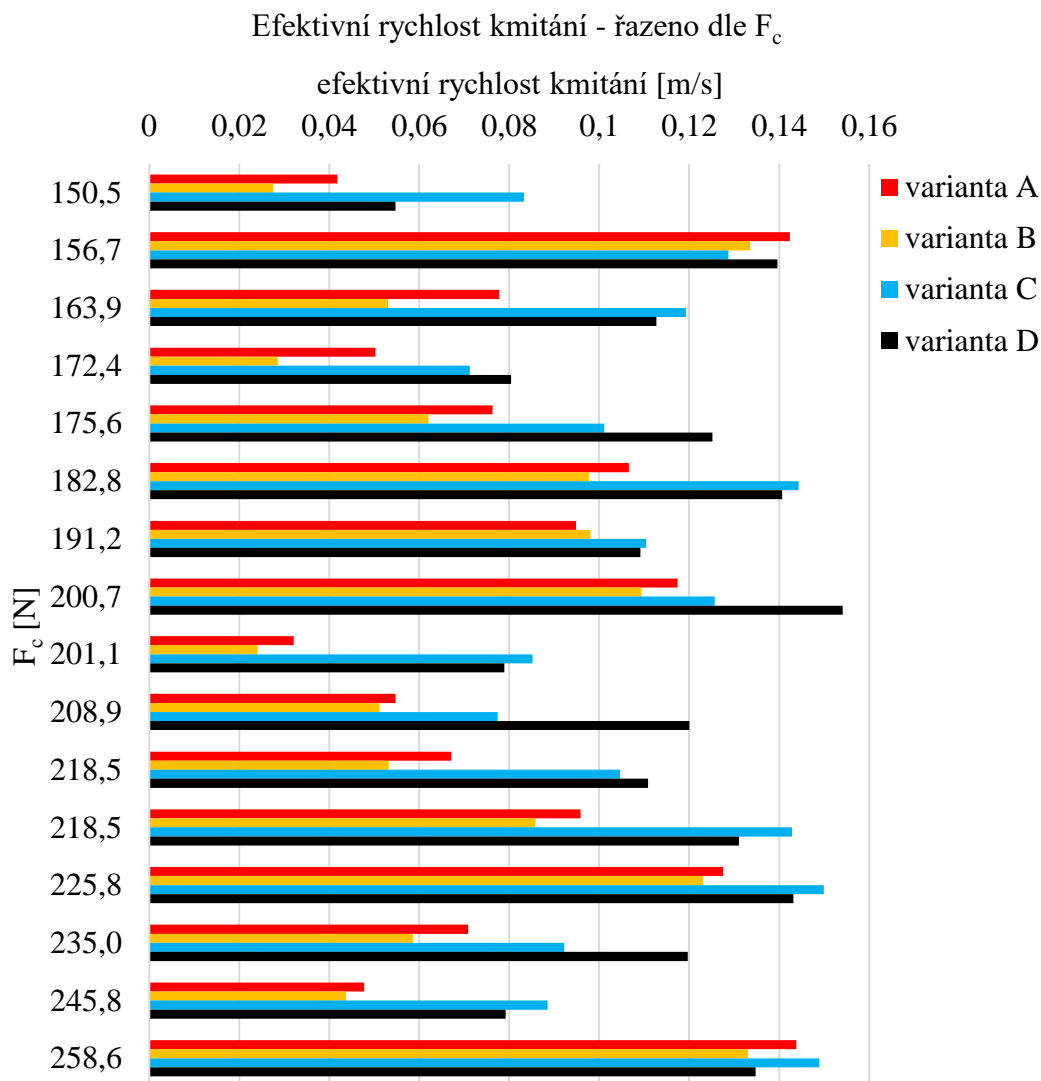
Do řešení byly zapojeny i hmotnosti jednotlivých nástrojových sestav, přičemž byl sestaven graf vyplývající z grafu č. 22 s rozdílem vyjádření kinetické energie kmitů dle známého výpočtu:

$$E_k = \frac{1}{2} m \cdot v_{ef}^2 \quad (5.4)$$

Hmotnosti jednotlivých sestav jsou uvedeny v tabulce č. 12:

varianta	Nástroj [kg]	HSK upínač [kg]	hmotnost sestavy [kg]	Celková úspora hmotnosti sestavy
A	0,320	1,190	1,510	-
B	0,320	1,141	1,461	3,4%
C	0,174	1,190	1,364	10,8%
D	0,174	1,141	1,315	14,7%

Tabulka č. 12: Hmotnosti jednotlivých nástrojových sestav



Graf č. 23: Efektivní rychlost kmitání – řazeno dle hl. složky řezné síly

V grafu uvedeném výše nelze hledat závislosti, které by potvrdzovaly úsudek, že s narůstající silou se zvyšují vibrace. Každá hodnota hlavní složky řezné síly reprezentuje nový experiment, při kterém byly podmínky měněny skokově. Pokud by byla zachována konstantní řezná rychlost, tedy i hodnota budící frekvence a následně byla řezná síla záměrně zvyšována pomocí změny faktorů uvedených ve vztahu pro výpočet hlavní složky řezné síly, očekával by se i nárůst vibrací. Nicméně v případě testovaných nástrojů je (jak již bylo zmíněno) nutné vnímat každý experiment odděleně. Nástroj byl v průběhu experimentů zatížen zcela odlišnými budícími frekvencemi. Následující rovnice objasňuje způsob výpočtu hlavní složky řezné síly. Pro výpočet řezné síly byla použita metoda Kienzle, která vychází z technologie soustružení. Přenositelnost tohoto způsobu výpočtu na technologii frézování je značně komplikované vlivem nezahrnuté třetí složky ve vztahu, která hraje významnou roli. Pro funkci tohoto experimentu nebyl výpočet řezných sil klíčový, a proto byla použita metoda dostačující.

Výpočet hlavní složky řezné síly:

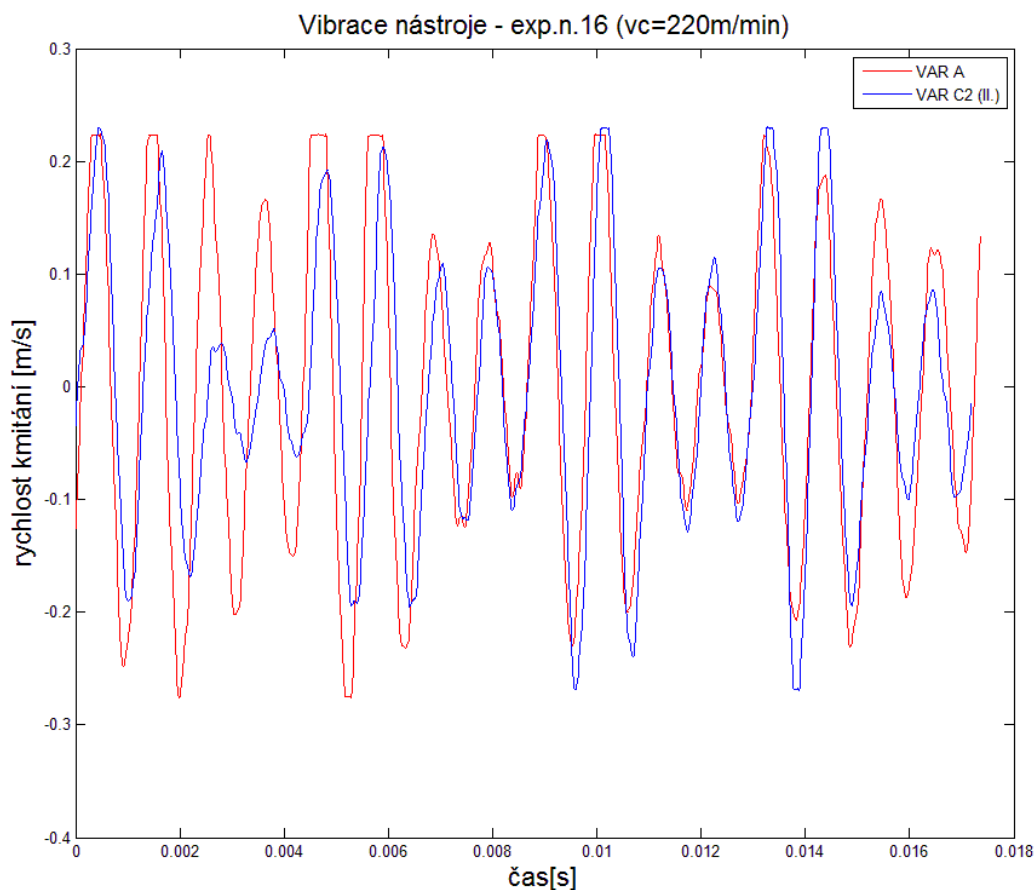
$$F_c = K \cdot b \cdot h^{(1-m_c)} \cdot k_{c1.1} \quad [N] \quad (5.5)$$

K [-]	korekční faktor
b [mm]	šířka odřezávané vrstvy
h [mm]	tloušťka odřezávané vrstvy
$k_{c1.1}$ [$N \cdot mm^{-2}$]	specifická řezná síla
m_c [-]	faktor tloušťky třísky

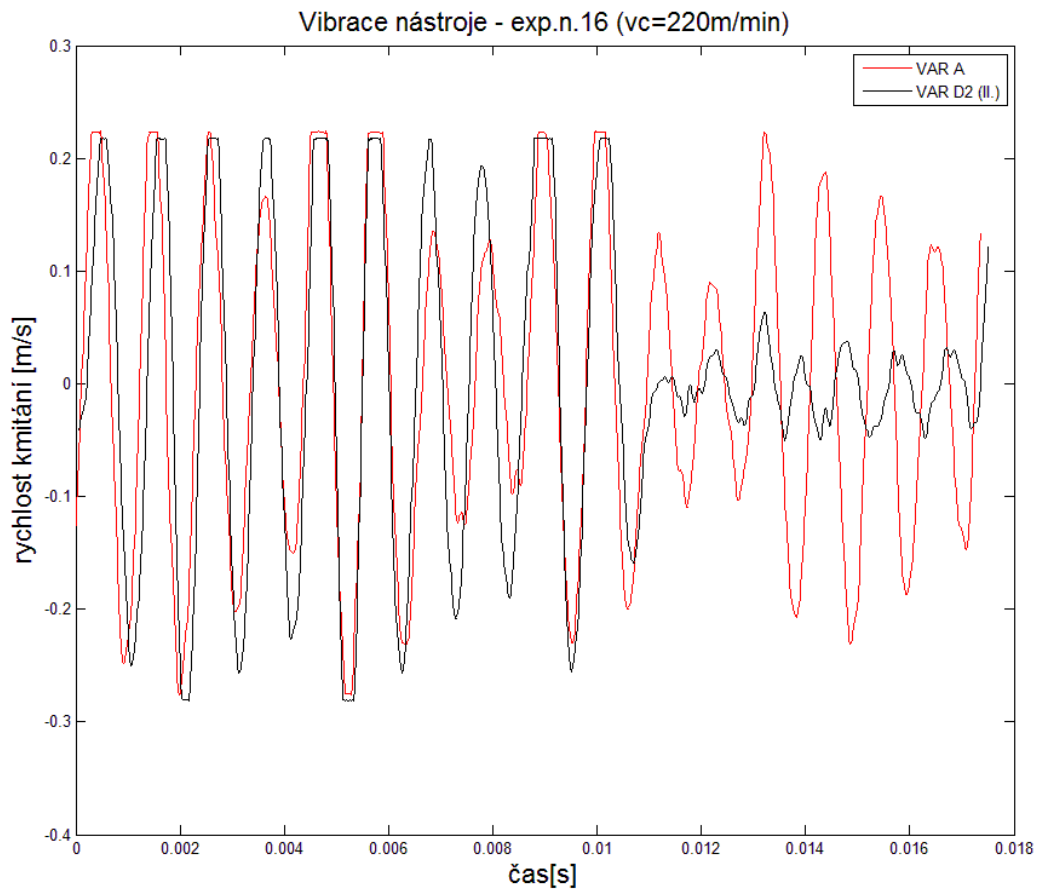
5.4.2 Zobrazení reálných kmitů

Pro utvrzení charakteru dynamických vlastností nástrojových sestav došlo k vytvoření grafů pro veškeré provedené experimenty. Pohled na vytvořené závislosti testovaných variant potvrzuje korektní výpočet efektivní rychlosti kmitání pro jednotlivé experimenty.

Pro případ experimentu č. 16 jsou zde vyobrazeny grafy (č. 23, č. 24), které značí lepší dynamické vlastnosti nestandardních sestav.



Graf č. 24: Zobrazení skutečného pohledu na kmitání nástroje (varianta A, varianta C2(II.))



Graf č. 25: Zobrazení skutečného pohledu na kmitání nástroje (varianta A, varianta D2(II.))
Totožný typ srovnání pro veškeré provedené experimenty a varianty uvedeny v příloze č. 2.

6 Souhrnné hodnocení testovaných variant

V této části bylo nutné spojit určité závěry z experimentálně zjištěných vlastností jednotlivých nástrojových sestav s ekonomickou stránkou věci.

6.1 Možné směry hodnocení

Při hodnocení technicko-ekonomického pohledu na jednotlivé varianty vzniká prostor pro několik možných srovnání:

- Úspora energie vlivem snížení hmotnosti nestandardních variant
- Lepší geometrie tvaru vyhrubovaných ploch s dopadem na následné dodržení přesnosti po dokončování vlivem zvýšení stability řezu
- Ochrana vřeten obráběcích strojů vlivem absorpce vibrací, které jinak snižují životnost ložisek vřetena
- Zvýšení produktivity obrábění vlivem zvýšení řezných parametrů
- Kvalitativní hledisko jakosti obrobených ploch (při použití kompozitního upínače a nástroje pro dokončení)
- Zvýšení trvanlivosti břitů na základě snížení vibrací u nestandardních variant

6.2 Ekonomické hodnocení

Tato část pojednává o zvýšení produktivity obrábění vlivem možnosti zvýšení řezných parametrů na základě závěrů vyplývajících z modální analýzy a měření vibrací v řezném procesu.

6.2.1 Stanovení normy času

Uvažovaný výpočet normy času vychází z oblasti použití nástrojových sestav v oblasti obrábění forem (uvažuje se velkosériová výroba). Úkolem je vyhrubovat tvarově složitou dutinu, která představuje hlavní položku spotřeby času. V následujícím výpočtu je uvažováno nahrazení standardního nástroje (varianta A) testovanou variantou kompozitního upínače s ocelovým nástrojem (varianta B). Jedinou odlišností mezi srovnávanými nástrojovými sestavami je posuv na zub. Navýšení posuvu na zub pro variantu B vychází z měření vibrací vibrometrem a uvažuje podmínky, při kterých byly vibrace o 52% nižší oproti standardní sestavě. Na základě toho byl zvýšen posuv při předpokladu lineární závislosti posuv na zub – kmitání nástroje. Tento postup uvažuje zachování konstantní kvality jakosti obrobených ploch. Zvýšení posuvu u varianty B kompenzují uhlíková vlákna, aniž by bylo zvýšeno kmitání nástroje.

Řezná rychlost v_c	120m/min
Axiální hloubka řezu a_p	0,3mm
Radiální šířka řezu a_e	5mm
Výrobní dávka d_v	50ks
Objem materiálu k odebrání	138cm ³
Posuv na zub varianta A	0,2mm/z
Posuv na zub varianta B	0,3mm/z
Cena upínače Schunk	6 500 Kč
Cena kompozitního upínače	20 500 Kč

Tabulka č. 13: Vstupní parametry pro ekonomické posouzení

Výpočet času obrobení požadovaného objemu materiálu:

Úběr materiálu:

$$Q = \frac{a_p \cdot a_e \cdot v_f}{1000} = \frac{a_p \cdot a_e \cdot f_z \cdot n}{1000} = \frac{a_p \cdot a_e \cdot f_z \cdot v_c}{\pi \cdot D_{nástroje}} \quad (6.1)$$

	f_z [mm/z]	Q [cm ³ /min]
Varianta A	0,2	0,5729
Varianta B	0,3	0,8594

Jednotkový čas pravidelné práce t_{A1}' pro veškeré operace vyjma technologie hrubování je roven 1541 Nmin/ks.

Pro stanovení celkového času pravidelné práce je nutné přičíst čas potřebný k hrubování technologií frézování.

Objem požadovaného úběru materiálu: $Q'=138\text{cm}^3/\text{min}$

Výpočet jednotkového času pravidelné práce:

$$t_{A_{hrubování}} = \frac{Q'}{Q} \quad (6.2)$$

	$t_{A_{hrubování}}$ [min]	t_{A1} [Nmin/ks]
Varianta A	240,88	1781,88
Varianta B	160,58	1701,58

Výpočet času jednotkového:

$$t_A = t_{A1} + 0,05 \cdot t_{A1} \quad (6.3)$$

	t_A [min]
Varianta A	1870,97
Varianta B	1786,66

Výpočet koeficientu celkového využití kapacity:

- Uvažuje se osmihodinová pracovní směna při odpočinkové sazbě rovné 62min, ($t_c=62\text{min}$)

$$k_c = \frac{T}{T - t_c} = \frac{480}{480 - 62} = 1,148 \quad (6.4)$$

Výpočet normy jednotkového času s podílem času směnového:

$$t_{AC} = t_A \cdot k_c \text{ [Nmin/ks]} \quad (6.5)$$

Varianta	t_{AC} [Nmin/ks]
Varianta A	2147,87
Varianta B	2051,09

Výpočet normy času dávkového s podílem času směnového [Nmin/dávka]:

- Čas dávkový $t_B = 220$ [Nmin/dávka]

$$t_{BC} = t_B \cdot k_c = 220 \cdot 1,148 = 252,56 \text{ [Nmin/dávka]} \quad (6.6)$$

Norma času jednoho kusu:

- Uvažuje se výrobní dávka $d_v = 50$ ks

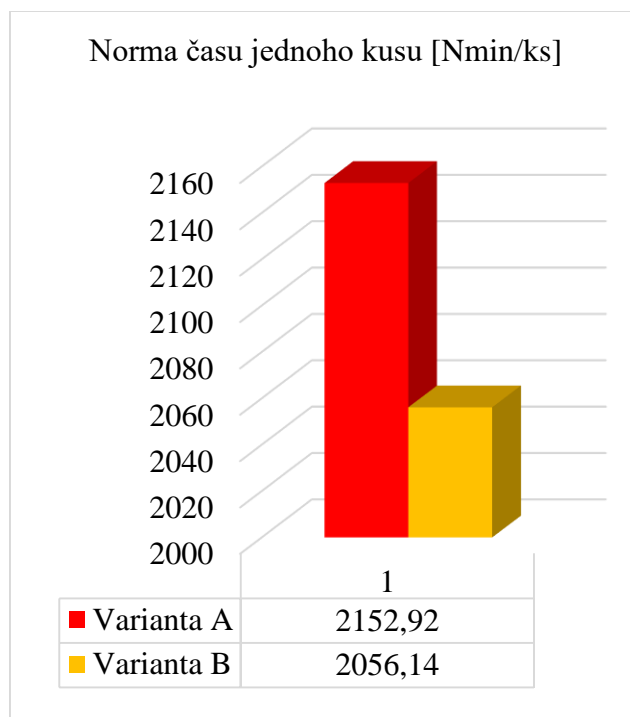
$$t_N = t_{AC} + \frac{t_{BC}}{d_v} \quad (6.7)$$

	t_N [Nmin/ks]
Varianta A	2152,92
Varianta B	2056,14
Úspora při využití varianty B	96,78

Norma času dávky:

$$t_N = t_{AC} \cdot d_v + t_{BC} \quad (6.8)$$

	t_N [Nmin/dávka]
Varianta A	107 646,06
Varianta B	102 807,06
Úspora při využití varianty B	4839



Graf č. 26: Zobrazení úspory při využití varianty B pro normu času jednoho kusu

Tento výpočet zobrazuje potenciál využití kompozitních materiálů s ohledem na možnou úsporu při stanovení norem času. Obdobný poměr obou variant zobrazených v grafu č. 26 vykazuje srovnání normy času dávky. Dalším postupem je uvážení výše fixních nákladů vyplývajících z uvažovaných prodejních cen jednotlivých nástrojových upínačů. Varianta B je považována za finančně nákladnější a proto se její nasazení vyplatí až od jistého ukazatele vyjadřující objem produkce. Pomocí metody bodu zvratu je možné stanovit tuto mez.

7 Závěr

Po provedeném testování veškerých nástrojových sestav byly vytvořeny dva pohledy na jejich dynamické vlastnosti. Předpokládané chování, které vzniklo na základě modální analýzy, stanovilo veškeré nestandardní varianty jako výhodnější. Nutné podotknout, že modální analýza naznačila jistý vliv heterogenity kompozitních nástrojů na jejich modální vlastnosti v různých směrech. Tento fakt pořadí nijak neovlivnil, avšak do jisté míry upozorňoval na možné komplikace při nasazení nástrojů v řezném procesu. Druhý pohled vznikl po experimentu snímání vibrací laserovým vibrometrem. Vytvořené grafy charakterizující efektivní rychlosti kmitání a grafy zobrazující tyto reálné kmity potvrdily výhodné vlastnosti v celém rozsahu u nástrojové sestavy složené z kompozitního upínače a ocelového nástroje (vyjma jednoho experimentu, při kterém došlo k vyšším vibracím o 4%). HSK upínač s využitím kompozitních materiálů je považován za finální návrh pro sériovou produkci, neboť se u něj prokázalo násobné zlepšení užitečných vlastností vlivem použitých uhlíkových vláken. U kompozitních nástrojů se při zvolených podmínkách experimentů nepotvrdily předpovídané výhody ve většině testů. Důležitým poznatkem bylo prokázání snížení vibrací kompozitních nástrojů při vyšším dynamickém zatížení, které dává prostor pro zvyšování řezných parametrů. Vysvětlení lze hledat v proměnlivém modulu pružnosti těchto materiálů.

Hlavním přínosem této práce bylo definovat chování nestandardních variant v procesu frézování. Tento cíl byl splněn v celém rozsahu. Zjištěné závislosti dávají objektivní pohled na jednotlivé nástrojové sestavy. Závěry stanovené z provedených experimentů lze považovat za klíčové poznatky, které ovlivňují další směry vývoje nástrojových sestav s využitím kompozitních materiálů. Díky provedeným experimentům modální analýzy a měření vibrací nástroje při frézování, došlo k vytvoření metodiky, kterou je možné jednoduše aplikovat na další typy kompozitních nástrojů. Testované nástroje byly první svého druhu a na zjištěné výsledky v této práci jistě naváží další řešení a návrhy. Směr vývoje bude zaměřen na způsob rozložení vláken v objemu kompozitního materiálu s pozitivním dopadem na vlastnosti nástrojů, zvýšení podílu tlumících vrstev integrovaných do kompozitního návinu, který pozitivně ovlivňuje dynamické vlastnosti potažmo produktivitu při obrábění. Zmíněné úpravy vycházejí z potřeby stabilizovat určité partie nestandardního frézovacího nástroje. Tyto úpravy byly stanoveny na základě provedeného výzkumu.

Existuje předpoklad optimálního nastavení poměru objemu kompozitního materiálu a objemu oceli použitého na nástrojové sestavě, které je nutné vhodně navrhnout. Při tomto správném nastavení bude docíleno ideálních vlastností celé sestavy a na základě toho se promítnou vlastnosti v tom nejvhodnějším směru, a to s ohledem na dynamické chování celku (hmotnost, tlumící vlastnosti, tuhost).

Aby se prokázal přínos kompozitního materiálu, je nutné vytvořit vhodnou koncepci nástroje. Vývoj těchto inovativních nástrojových sestav cílí na efektivnější hrubovací operace, snížení vibrací, zvýšení produktivity obrábění. Prakticky je technologie hrubovacích operací založena na hmotě a masivních, až robustních celcích.

Vývoj nástrojů s využitím kompozitních materiálů způsobuje určitou protichůdnost ve standardním smýšlení běžně navrhovaných hrubovacích nástrojů. Na nástroje jsou kladeny požadavky zvýšení řezných parametrů, zejména posuvové rychlosti, nicméně na druhé straně je nástrojové sestavě odebrána hmota díky použití uhlíkových vláken. Je cílem, aby vzniklou diferencí úbytku hmoty na nástroji nahradily výhodné parametry uhlíkových kompozitních materiálů, které se při určitých podmínkách experimentů výhodně prokázaly.

Seznam použité literatury

- [1] HUMÁR, A. *Obrábění vláknově vyztužených kompozitu*. 1. vyd. BRNO: VUTIUM, 2004. 26 s. ISBN 80-214-2740-X. [cit. 2015-06-10]
- [2] DERBYSHIRE, F., ANDREWS, R., JACQUES, D., JAGTOYEN, M., KIMBER, G., RANTELL, T. *Synthesis of isotropic carbon fibers and activated carbon fibers from pitch precursors*, Fuel 80 (2001) 345–356. [cit. 2015-06-15]
- [3] LAŠ, Vladislav. *Mechanika kompozitních materiálů*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2004. 154 s. ISBN 80-7043-273-X. [cit. 2015-07-15]
- [4] KŘÍŽ, A. *Strojírenské materiály (přednáška č. 14)*, [cit. 2015-06-18]. dostupné z: http://www.ateam.zcu.cz/download/kompozity09_10.pdf. Plzeň: ZČU-KMM, 2009
- [5] Compo Tech PLUS, spol. s r. o. *technologie*, [online]. [cit. 2015-07-20]. dostupné z: <http://cz.compotech.com/content/files/CompoTech%20Machine%20Building%20Article.pdf>
- [6] Compo Tech PLUS, spol. s r. o. *Technologie*, [online]. [cit. 2015-07-21]. dostupné z: <http://cz.compotech.com/content/files/CompoTech%20Plus%20Spol.%20s%20r.o.%20Terms%20and%20Conditions.pdf>
- [7] AGARWAL, BHAGWAN, D., BROUTMAN, LAWRENCE, J. *Vláknové kompozity: Celostátní vysokoškolská příručka pro vysoké školy technické*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1987. 294 s.
- [8] COMPOSITESWORLD. [online]. [cit. 2015-08-22]. dostupné z: <http://www.compositesworld.com/articles/the-making-of-carbon-fiber>
- [9] JANČÁŘ, J. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. Vyd. 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2003. 194 s. ISBN 80-214-2443-5.
- [10] GIBSON, Ronald F. *Principles of composite material mechanics*. CRC press, 2011.
- [11] Compo Tech PLUS, spol. s r. o. *Technologie*, [online]. [cit. 2015-10-27]. Dostupné z: <http://cz.compotech.com/technologie>
- [12] Sandvik Coromant [online]. [cit. 2015-11-05]. dostupné z: http://www.sandvik.coromant.com/en-gb/products/silent_tools
- [13] JANDA, Z., ŘEHOŘ, J., ŠVEC, J., FULEMOVÁ, J. *Porovnání nástrojových upínačů s ohledem na řezné síly a jakost obrobeného povrchu při frézování austenitické oceli*. Plzeň: ZČU-KTO. [cit. 2016-03-20] dostupné z: <https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/16368/Janda.pdf?sequence=1>
- [14] Upínání rotačních nástrojů. *MM Průmyslové Spektrum*. 2004, roč. 9, s. 70. [cit. 2016-03-20]

- [15] Upínání nástrojů smrštěním, teplem i chladem. *MM Průmyslové spektrum*, 2003. roč. 4, rubrika- obrábění, s. 24. [cit. 2016-03-18]. dostupné z: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/upinani-nastroju-smrstenim-teplem-i-chladem.html>
- [16] JUSTIA TRADEMARKS. [online].[cit. 2016-02-08]. dostupné z: <https://trademarks.justia.com/782/75/silent-tools-78275430.html>
- [17] Sandvik Coromant [online]. [cit. 2016-02-27]. dostupné z: <http://www.sandvik.coromant.com/en-gb/products/silent_tools
- [18] KOTTNER, R., KROUPA, T., LAŠ, V. Návrh kompozitní lávky. In: *Mechanika kompozitních materiálů a konstrukcí 2014*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2014. s. 69-70. ISBN 978-80-261-0355-4. [cit. 2015-08-29]
- [19] KOŽMÍN, P., *Hofmeister s.r.o.- konzultace* [cit. 2015-11-10]
- [20] TUNGALOY, *Hlavní katalog 2015-2016* [cit. 2015-08-14]. dostupné z: <https://www.tungaloy.com/cz/products/cutting/cutting_11.php
- [21] PATRICK DE VOS. JAN-ERIC STÄHL. *Obrábění kovů Teorie v praxi*. SECO TOOLS AB. [cit. 2015-09-01]
- [22] RADE, L., WESTERGREN, B. *Mathematics handbook for science and engineering*. Springer Science & Business Media, 2013. [cit. 2016-04-05]
- [23] MILÁČEK, Stanislav. *Modální analýza mechanických kmitů*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 1992. 154 s. ISBN 80-01-00872-X. [cit. 2015-11-22]
- [24] DVOŘÁK, V. *Experimentální modální analýza jako metoda určení vlastních frekvencí a vlastních tvarů kmitu mechanické soustavy*. Plzeň, 2009. Diplomová práce (Ing.). ZČU V PLZNI. Fakulta strojní
- [25] ŘEHOŘ, J. *Teorie obrábění – skripta*. Plzeň: FST ZČU
- [26] SCHMITZ, Tony L.; DONALSON, R. R. Predicting high-speed machining dynamics by substructure analysis. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2000, 49.1: 303-308. [cit. 2016-05-02]
- [27] TLUSTY, G. *Manufacturing Processes And Equipment*, Prentice Hall, 2000, Upper Saddle River, NJ. [cit. 2016-04-12]
- [28] CHARLES, M., STANISLAUS, V., *Frictional damper to enhance dynamic stability in end milling*, A Thesis Presented to The Graduate School of The University of Florida in Partial Fulfillment of The Requirements For The Degree of Master of Science, University of Florida, 2003. [cit. 2016-01-05]
- [29] NIJMEIJER, H., ALTINTAS, Y. *Overview of Stability Analysis in Machining Processes*, Eindhoven University of Technology, Department Mechanical Engineering, Dynamics and Control Group, 2008, [cit. 2016-01-09]. dostupné z: <<http://www.mate.tue.nl/mate/pdfs/10060.pdf>
- [30] POLYTEC. *Portable Digital Vibrometer- User Manual*. [online].[cit. 2015-11-02], dostupné z: <http://www.music.mcgill.ca/caml/lib/exe/fetch.php?media=equipment:pdv100_1104_03e.pdf

- [31] MĀŠA, P. *Eletrical Circuits 1, Mean Value, Root Mean Square, Factors*.
[online].[cit.2016-01-20]. dostupné z:
<<http://amber.feld.cvut.cz/vyu/eo1/english/files/variables.pdf>>
- [32] ZEMAN, P., SULITKA, M., KOLÁŘ, P. *Workshop - Modelování řezných sil a stability řezného procesu s ohledem na geometrii a opotřebení nástroje*. RCMT Praha, Ústav výrobních zařízení a strojů. 2015

Použitý software

MS Office

Audacity

Matlab R2013a

Catia V5 R21

PulseLabShop

Seznam obrázků

Obrázek č. 1: Testované nástrojové sestavy (A, B, C, D).....	13
Obrázek č. 2: Synergické chování kompozitního materiálu	14
Obrázek č. 3: Druhy zakončení upínací techniky	19
Obrázek č. 5: Kompozitní fréza	23
Obrázek č. 4: Přiblížení výpočtu průhybu.....	24
Obrázek č. 6: Schématické zatížení frézy	24
Obrázek č. 7: Nástroj s kompozitní stopkou (řada 1.0)- předchůdce frézy vpravo (řada 2.0). 25	
Obrázek č. 8: Laboratoř katedry materiálů a strojírenské metalurgie	29
Obrázek č. 9: Strategie frézování – pre-experiment.....	32
Obrázek č. 10: Destrukce kompozitního nástroje (řada 1.0).....	33
Obrázek č. 11: Vtisky nástroje způsobené snížení tuhosti při změně zatěžujících sil	35
Obrázek č. 12: Frekvenční analýza exp. č. 14 (varianta A)	36
Obrázek č. 13: Modální analýza (zprava): zavěšená n. sestava; umístění IEPE akcelerometru; měřící karta; rázové kladívko 3	40
Obrázek č. 14: Diagram stability obrábění	41
Obrázek č. 15: Kalibrace laserového vibrometru	43
Obrázek č. 16: Synchronizace rotačních pohybů (nástroj/obrobek)	44
Obrázek č. 17: Rozdílné pozice laserového paprsku při snímání vibrací	46
Obrázek č. 18: Průběh testů.....	47
Obrázek č. 19: Tvar třísky ISO 6	47
Obrázek č. 20: Získaný signál z vibrometru	48
Obrázek č. 21: Detailní pohled na průběh rychlosti kmitání nástroje v čase,	48
Obrázek č. 22: Efektivní hodnota.....	49

Seznam tabulek

Tabulka č. 1: Testované varianty nástrojových sestav	13
Tabulka č. 2: Parametry upínačů	22
Tabulka č. 3: Parametry řezných nástrojů	23
Tabulka č. 4: Technická data VBD	26
Tabulka č. 5: Volené podmínky pre-experimentu (následnou kombinací na základě	31
Tabulka č. 6: Test celistvosti nástroje - otáčky	31
Tabulka č. 7: Experiment č.2 – destrukce nástroje	32
Tabulka č. 8: Hodnoty vlastních frekvencí pro variantu C	60
Tabulka č. 9: Hodnoty vlastních frekvencí pro variantu D	61
Tabulka č. 10: Určené limitní šířky třísky jako ukazatel zvýšení produktivity obrábění	63
Tabulka č. 11: Hodnoty efektivních rychlostí [m/min]	65
Tabulka č. 12: Hmotnosti jednotlivých nástrojových sestav	66
Tabulka č. 13: Vstupní parametry pro ekonomické posouzení	71

Seznam grafů

Graf č. 1: Resonanční křivky [25].....	38
Graf č. 2: Fázový posun [25].....	39
Graf č. 3: Zobrazení imaginární č. FRF a určení vlastní frekvence n. sestavy	42
Graf č. 4: Zobrazení rychlosti kmitání (experiment č. 15).....	50
Graf č. 5: Tlumící charakteristiky (varianta A, varianta B)	51
Graf č. 6: Tlumící charakteristiky - varianta A, varianta C1 (I.).....	52
Graf č. 7: Tlumící charakteristiky - varianta A, varianta C1 (II.)	53
Graf č. 8: Tlumící charakteristiky – varianta A, varianta C2 (I.).....	53
Graf č. 9: Tlumící charakteristiky – varianta A, varianta C2 (II.).....	54
Graf č. 10: Tlumící charakteristiky - varianta A, varianta D1 (I.)	55
Graf č. 11: Tlumící charakteristiky - varianta A, varianta D1 (II.)	55
Graf č. 12: Tlumící charakteristiky - varianta A, varianta D2 (I.)	56
Graf č. 13: Tlumící charakteristiky - varianta A, varianta D2 (II.)	56
Graf č. 14: Frekvenční charakteristiky – naměřený rozsah 0 - 6,4kHz.....	57
Graf č. 15: Detail oblasti 1,5kHz.....	58
Graf č. 16: Simulace nárůstu tangenciální (vlevo) a radiální (vpravo) řezné síly [32]	58
Graf č. 17: : Zobrazení frekvenčních charakteristik varianty B.....	59
Graf č. 18: Zobrazení frekvenčních charakteristik pro všechna měření varianty C.....	59
Graf č. 19: Zobrazení frekvenčních charakteristik pro všechna měření varianty D	60
Graf č. 20: Reálná složka FRF – varianta A	62
Graf č. 21: Imaginární složka FRF – varianta A	62
Graf č. 22: Zobrazení výsledků efektivní rychlosti pro testované experimenty	64
Graf č. 23: Efektivní rychlost kmitání – řazeno dle hl. složky řezné síly	67
Graf č. 24: Zobrazení skutečného pohledu na kmitání nástroje (varianta A, varianta C2(II.))	68
Graf č. 25: Zobrazení skutečného pohledu na kmitání nástroje (varianta A, varianta D2(II.))	69
Graf č. 26: Zobrazení úspory při využití varianty B pro normu času jednoho kusu.....	73

Seznam příloh

PŘÍLOHA č. 1: Zobrazení reálné a imaginární části FRF	I
PŘÍLOHA č. 2: Rychlost kmitání nástroje pro jednotlivé experimenty	VIII

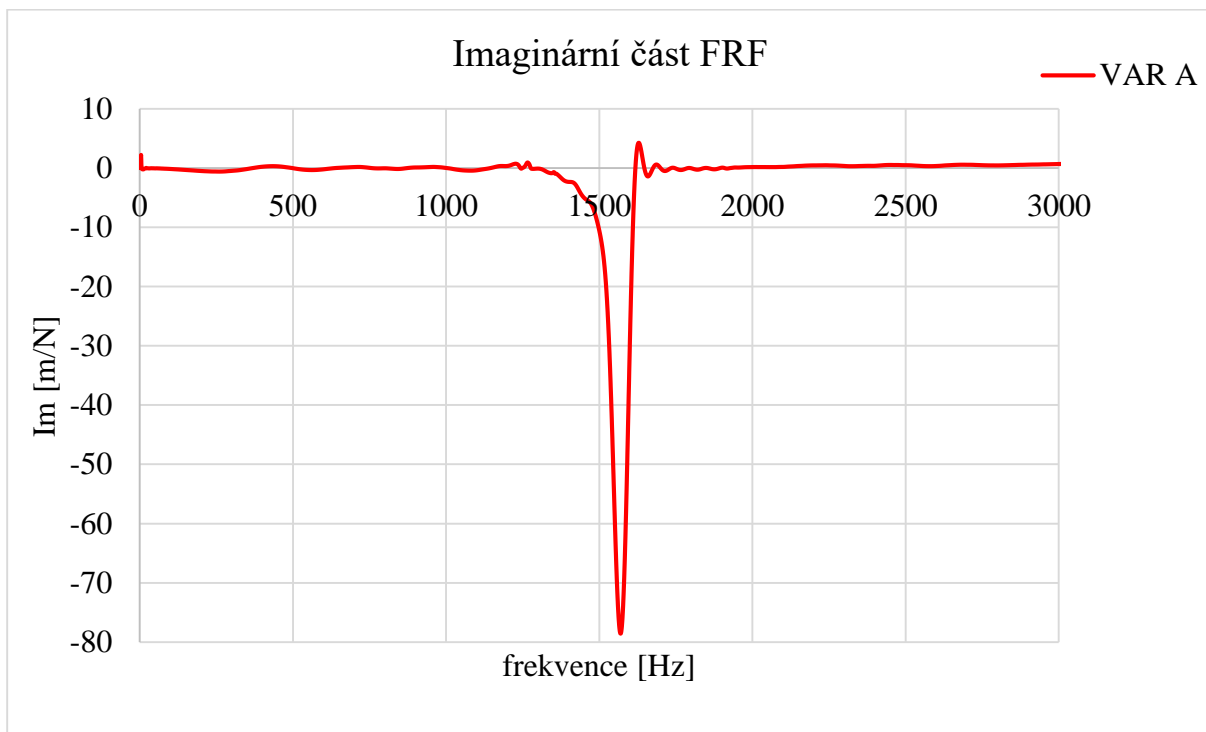
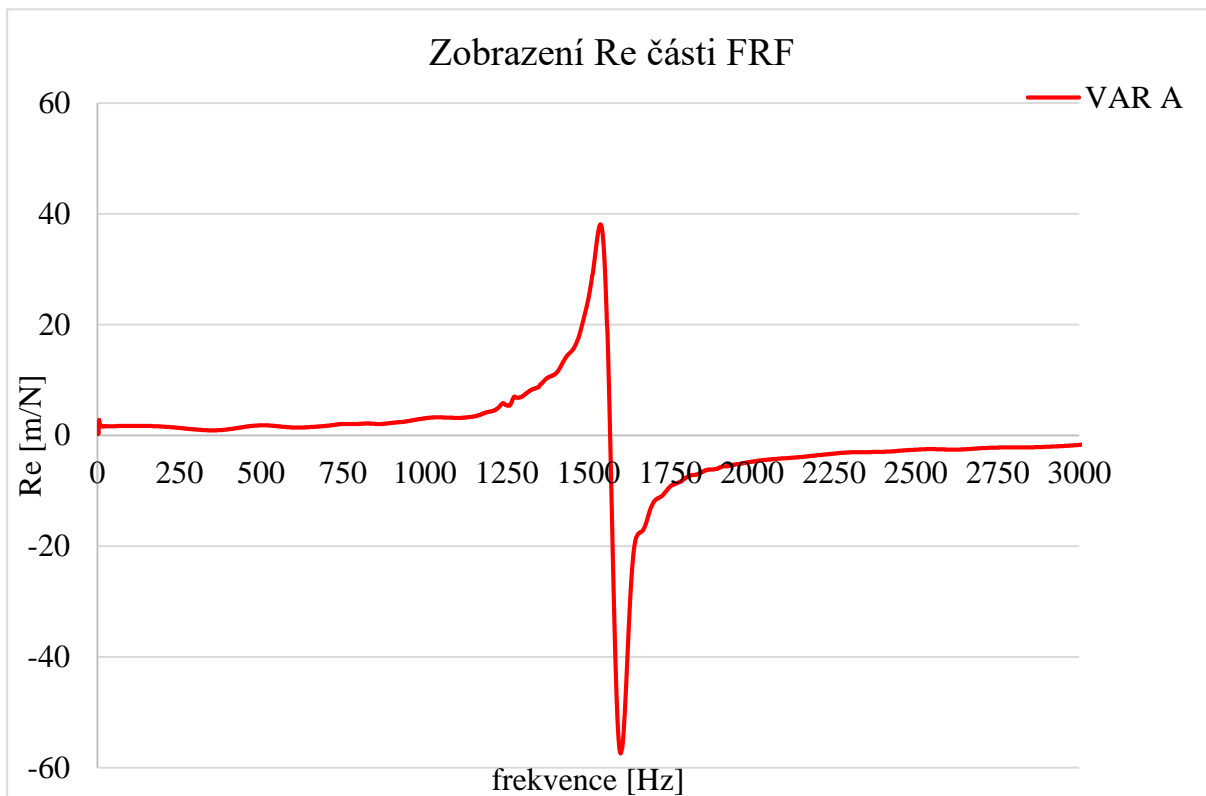
Seznam příloh – volně vložených

PŘÍLOHA č. 3: Efektivní rychlost kmitání – veškeré testované varianty	
PŘÍLOHA č. 4: Házení kompozitních nástrojů	
PŘÍLOHA č. 5: Přiblížení experimentů č. 15, č. 16	
PŘÍLOHA č. 6: Ověření signálu z vibrometru – test rychlosti snímaných vibrací	
PŘÍLOHA č. 7: Rozbor akustické emise	
PŘÍLOHA č. 8: Kombinace řezných podmínek – experiment č. 1-16	
PŘÍLOHA č. 9: Popouštěcí křivky a křivky prokalitelnosti oceli 34CrNiMo6 dle ČSN EN 10083-1	
PŘÍLOHA č. 10: Použité výpočtové vztahy pro hl. složku řezné síly	

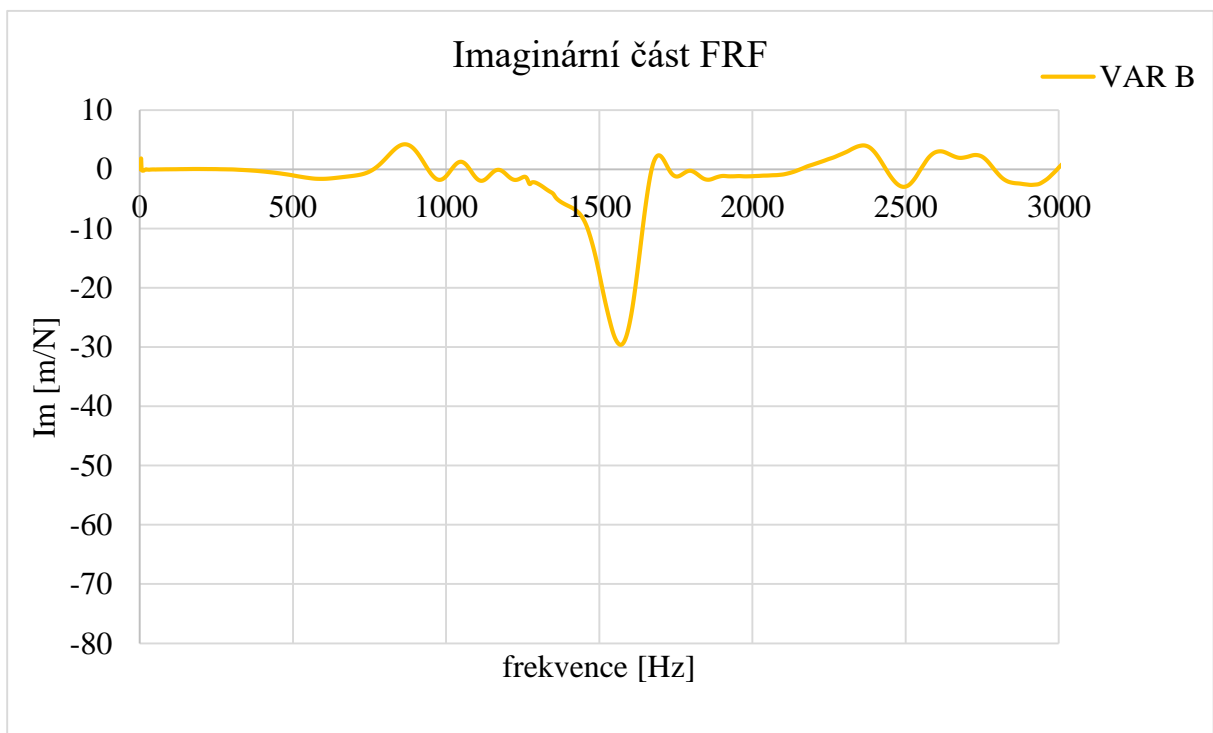
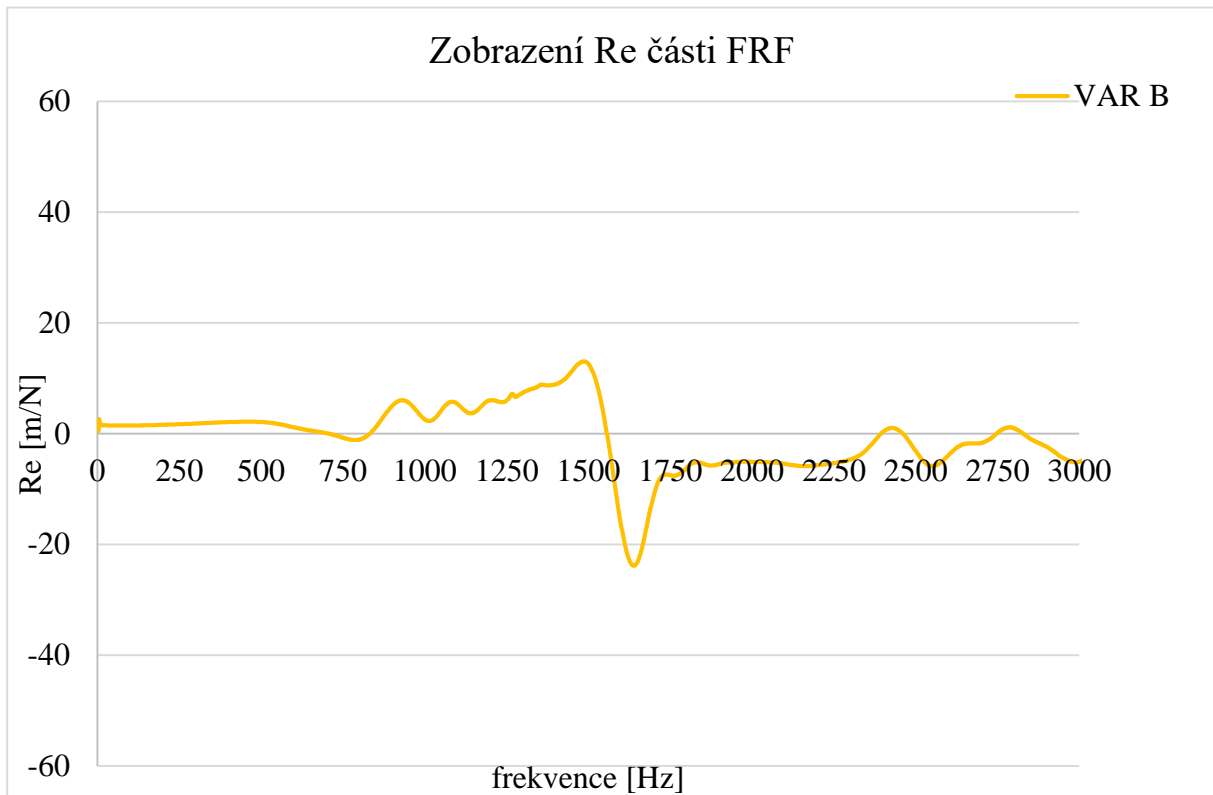
PŘÍLOHA č. 1

Zobrazení reálné a imaginární složky frekvenční odezvové funkce

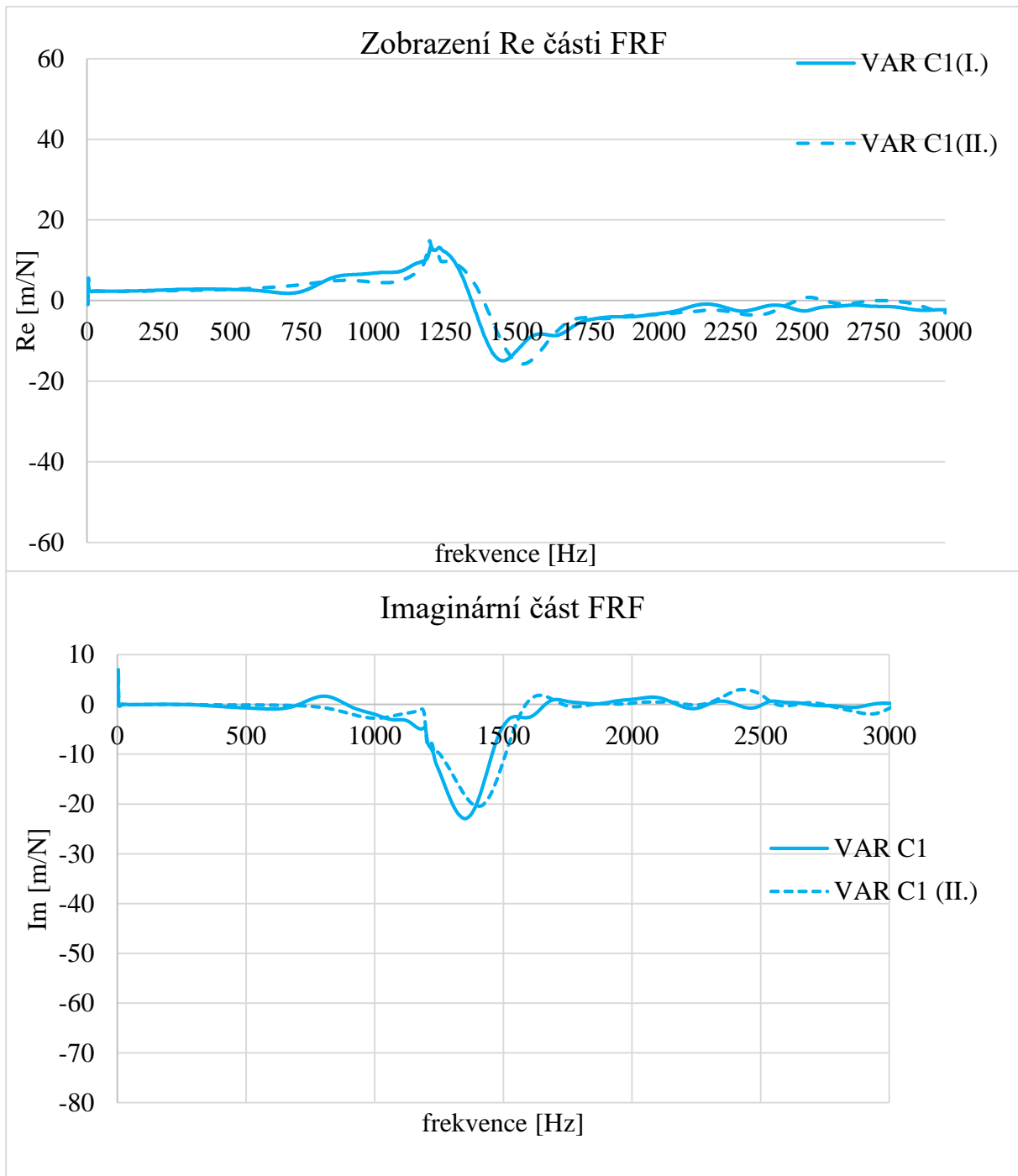
Varianta A:



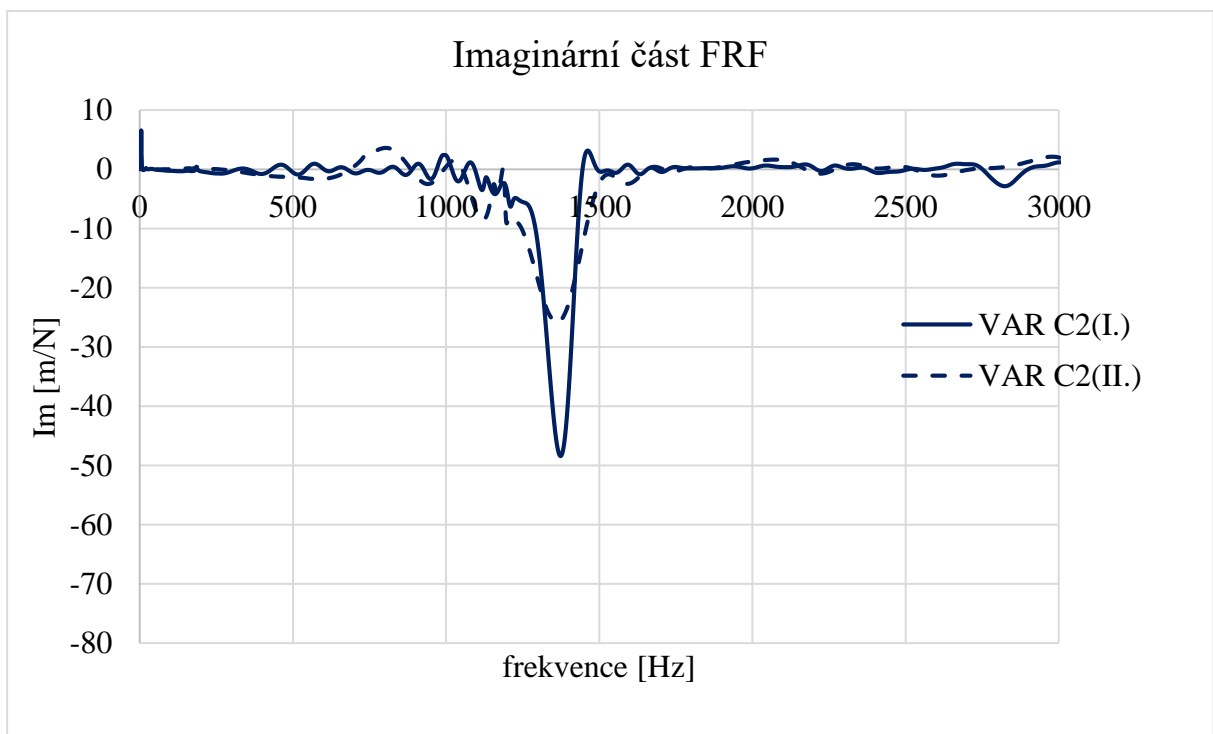
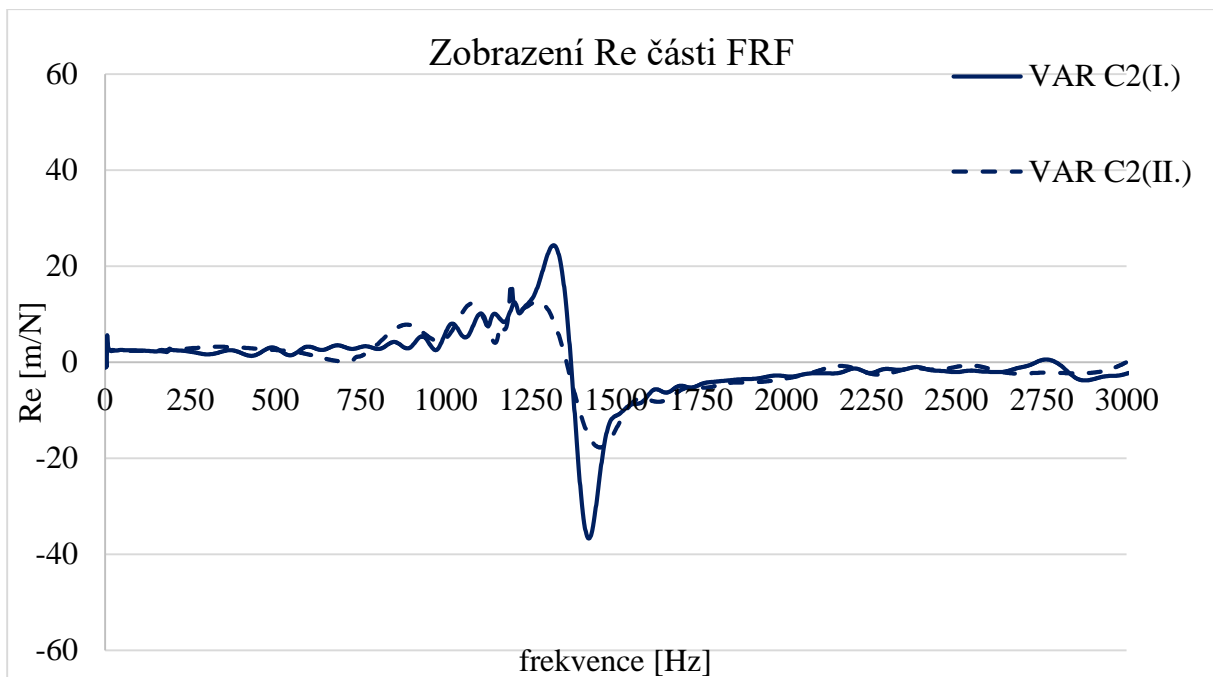
Varianta B:



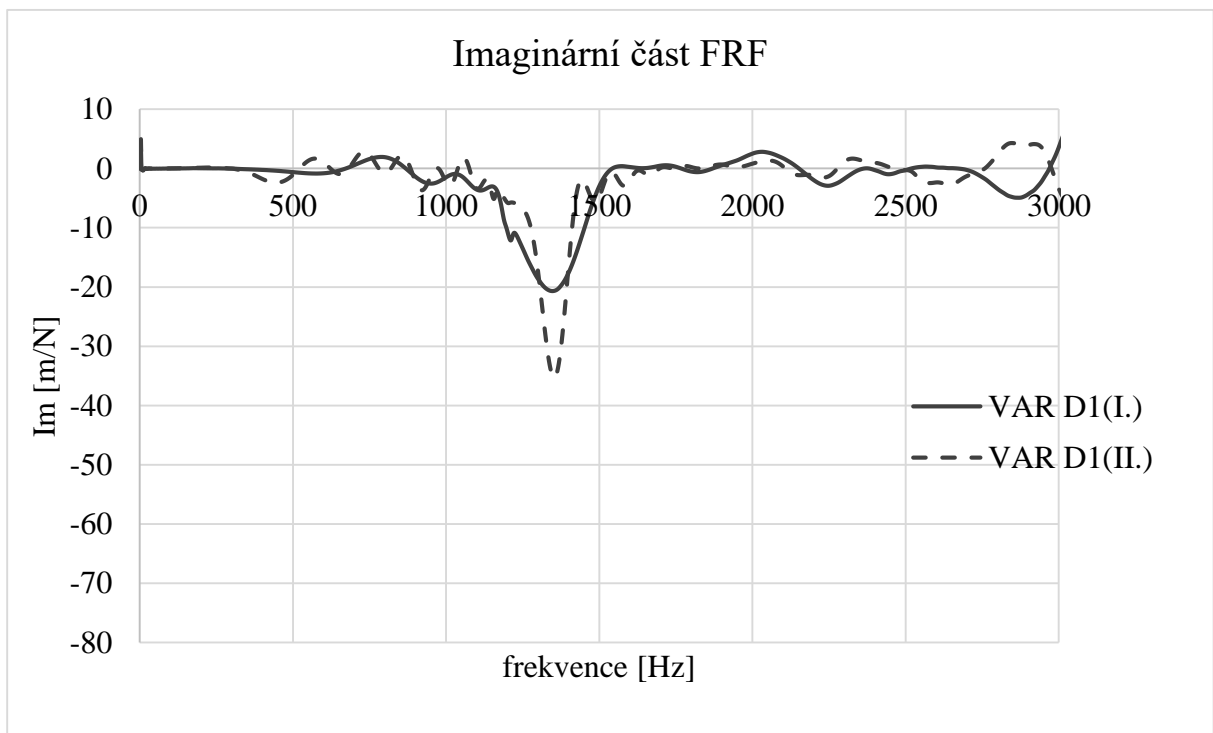
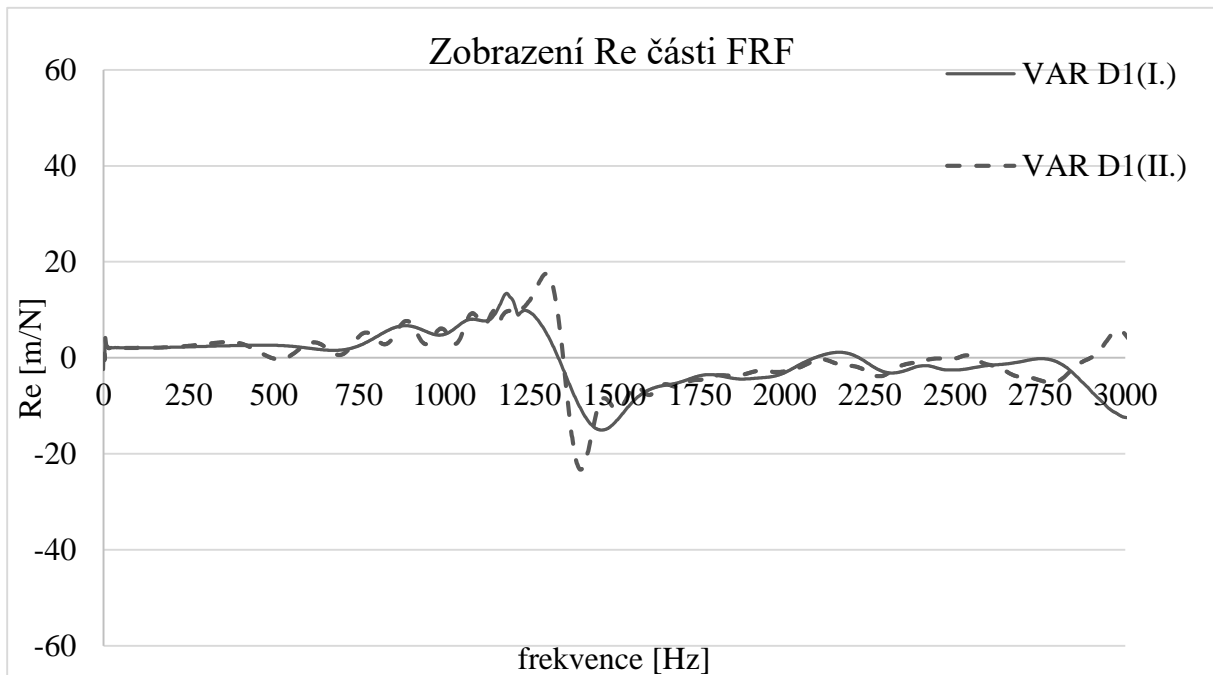
VARIANTA C1:



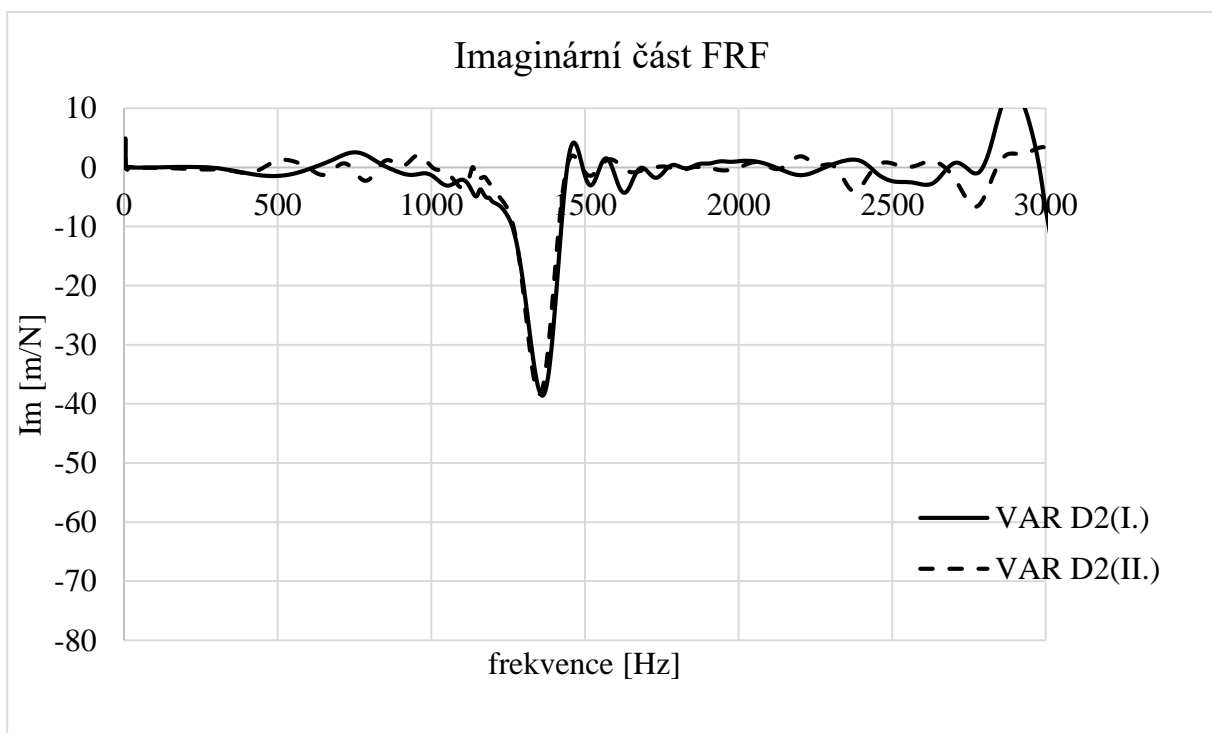
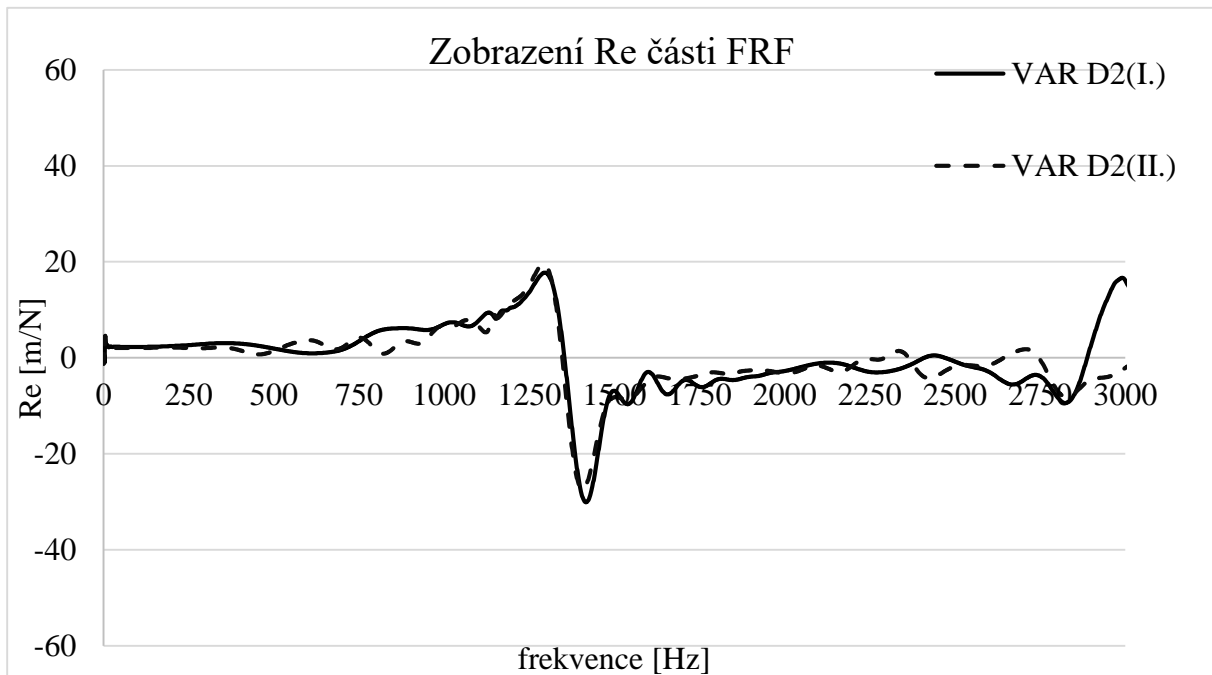
VARIANTA C2:



VARIANTA D1:



VARIANTA D2:



PŘÍLOHA č. 2

Rychlost kmitání nástroje pro jednotlivé experimenty

