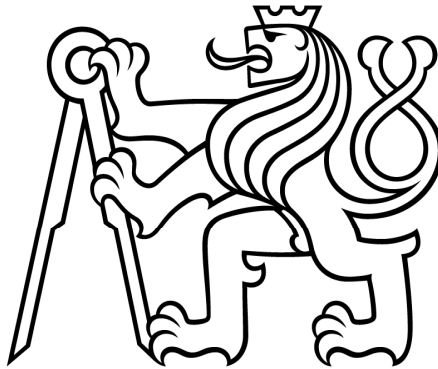


**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**TEZE
DISERTAČNÍ
PRÁCE**

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

TEZE DISERTAČNÍ PRÁCE

*Predikce silových parametrů řezného procesu při
frézování*

Ing. Jaroslav Kovalčík

Doktorský studijní program: *Strojní inženýrství*

Studijní obor: *Strojírenská technologie*

Školitel: *prof. Dr. Ing. František Holešovský*

Teze disertace k získání akademického titulu "doktor", ve zkratce "Ph.D."

Název anglicky: *Force parameters prediction of the cutting process during milling*

Disertační práce byla vypracována v kombinované formě doktorského studia na Ústavu *Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie* Fakulty strojní ČVUT v Praze.

Disertant: *Ing. Jaroslav Kovalčík*
Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie,
Fakulta strojní ČVUT v Praze,
Technická 4, 166 07 Praha 6 - Dejvice

Školitel: *prof. Dr. Ing. František Holešovský*
Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie,
Fakulta strojní ČVUT v Praze,
Technická 4, 166 07 Praha 6 - Dejvice

Školitel-specialista: *Ing. Pavel Zeman, Ph.D.*
Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie,
Fakulta strojní ČVUT v Praze,
Technická 4, 166 07 Praha 6 - Dejvice

Oponenti: *prof. Dr. Ing. Ivan Mrkvica – VŠB TU, FS Ostrava*
doc. Ing. Miroslav Zetek, Ph.D. – ZČU, FST Plzeň
Ing. Vítězslav Rázek, CSc. – ČVUT, FS Praha

Teze byly rozeslány dne:

Obhajoba disertace se koná dne v hod.
v zasedací místnosti č. 17 (v přízemí) Fakulty strojní ČVUT v Praze,
Technická 4, Praha 6
před komisí pro obhajobu disertační práce ve studijním oboru *Strojírenská technologie*.

S disertací je možno se seznámit na oddělení vědy a výzkumu Fakulty strojní ČVUT v Praze, Technická 4, Praha 6.

prof. Ing. Jan Suchánek, CSc.
předseda oborové rady oboru *Strojírenská technologie*
Fakulta strojní ČVUT v Praze

Anotace

Tato disertační práce se zabývá predikcí silových parametrů řezného procesu při frézování a návrhem softwarové aplikace pro predikci těchto vypočtených parametrů. Výchozí veličinou pro výpočet silových parametrů, mezi které patří řezný výkon, výkon obráběcího stroje a krouticí moment, je řezná síla. Pro návrh matematického modelu byla na základě rešeršní části práce vybrána metodika založená na výpočtu řezné síly pomocí součinu měrné řezné síly a plochy odřezávané vrstvy. Základní podoba navrženého matematického modelu řezné síly byla oproti modelům uvedeným v rešeršní části zpřesněna o vliv řezné rychlosti a o uvažování zaoblené řezné hrany. Tento nově vytvořený model je aplikovatelný pro vyměnitelné břitové destičky kruhového i nekruhového tvaru. Na základě navrženého modelu byl navržen vztah pro výpočet efektivní hodnoty řezné síly, pomocí které se vypočítá efektivní hodnota výkonu a krouticího momentu pro aktuální režim zatížení vřetene. Tyto hodnoty po vynesení do výkonové a momentové charakteristiky vřetene stroje predikují zatížení vřetene stroje. Pro navržený model byly následně experimentálně zjištěny materiálové konstanty pro tři vybrané materiály, a to pro hliníkovou slitinu EN AW 7075, titanovou slitinu Ti6Al4V a ocel DIN C45. Na základě navrženého modelu a získaných materiálových konstant byl model ověřen porovnáním vypočtených a experimentálních hodnot. Ověřený matematický model byl následně zobecněn o uvažování vlivu úhlu čela, který má z geometrických charakteristik významný vliv na měrnou řeznou sílu. Takto navržený zobecněný model byl poté ověřen experimenty s použitím nástrojů s různou geometrií, a to u oceli DIN C45. Tento model byl dále zobecněn o uvažování vlivu meze pevnosti v tahu. Zobecněný model byl následně ještě zpřesněn o vliv opotřebení na hřbetě břitu řezného nástroje, a to rovněž pro materiál DIN C45. Na základě navrženého modelu byla následně vytvořena softwarová aplikace, která pomůže technologům v praxi správně volit vhodné typy nástrojů, operací, strojů a rychle stanovovat hlavní parametry řezného procesu.

Klíčová slova

obrábění, frézování, řezná síla, řezný výkon, krouticí moment, měrná řezná síla

Annotation

This thesis is focused on the prediction of the force parameters of the cutting process during milling and the creation of software application to predict these force parameters. The initial parameter for calculating the force parameters, such as cutting power, machine power, torque, is the cutting force. Based on the research part of this thesis, a method of the calculation of the cutting force based on the product of the specific cutting force and the cutting area was chosen to create a new mathematical model. The basic form of the proposed mathematical model of the cutting force was, in comparison with the models mentioned in the research part, refined by the effect of the cutting speed and by considering the round part of the cutting edge. This newly created mathematical model is applicable to cutting tool inserts of circular and non-circular shape. Based on the proposed mathematical model, an equation to calculate the effective value of the cutting force was created. By using this equation, effective value of the cutting power and torque can be calculated, so we can predict the spindle load. Afterwards, material constants for three selected materials, namely for the aluminum alloy EN AW 7075, titanium alloy Ti6Al4V and steel DIN C45, were experimentally determined. Based on the created model and obtained material constants, the model was verified by comparing calculated and experimental values. Afterwards, the successfully verified mathematical model was generalized by considering the rake angle effect, which has a significant impact on the specific cutting force. This generalized model was then verified by experiments using cutting tools with different geometry and for the workpiece material made of the DIN C45 steel. This model was then also generalized by considering the effect of tensile strength. Thereafter, the generalized model was refined by the effect of the flank tool wear. Based on the created mathematical model, a software application was created. This software application will help technologists to select appropriate types of cutting tools, operations, machine tools and quickly determine the main parameters of the cutting process.

Keywords

machining, milling, cutting force, cutting power, torque, specific cutting force

Obsah

Seznam použitých veličin	11
1 Rozbor současného stavu	13
1.1 Silové účinky při frézování	13
1.1.1 Silový rozklad na břitů frézovacího nástroje	14
1.1.2 Oblast primární plastické deformace a její souvislost se silovými jevy při obrábění 15	
1.2 Měření sil při frézování	16
1.2.1 Přímé měření sil při frézování	16
1.2.2 Nepřímé měření sil při frézování	17
1.3 Metodiky modelování a simulace řezného procesu	17
1.4 Predikce zatížení vřetene	18
2 Cíle disertační práce	20
3 Vlastní zpracování	21
3.1 Vlastní návrh matematického modelu	21
3.1.1 Úvod a motivace pro zpřesnění modelu	21
3.1.2 Výpočet šířky a aktuální tloušťky odřezávané vrstvy	21
3.1.3 Rovná část břítu řezné hrany	22
3.1.4 Zaoblená část břítu řezné hrany	22
3.1.5 Výpočet aktuální hodnoty řezné síly	23
3.1.6 Střední hodnota řezné síly za záběr pro 1 zub frézy	24
3.1.7 Střední hodnota řezné síly za otáčku pro N zubů v záběru	25
3.1.8 Výpočet efektivní hodnoty řezné síly	25
3.1.9 Výpočet počátečního a koncového úhlu záběru	26
3.2 Materiálové konstanty pro vybrané materiály	27
3.3 Ověření navrženého matematického modelu	30
3.3.1 Ověření výpočtu řezné síly s uvažováním řezné rychlosti	30
3.3.2 Ověření řezné síly s uvažováním řezné rychlosti a polom. špičky	32
3.4 Zobecnění navrženého modelu a jeho ověření	33
3.5 Zpřesnění navrženého modelu o vliv opotřebení	35
3.6 Návrh softwarové aplikace pro predikci silových parametrů a zatížení vřetene při frézování	37
4 Závěry a diskuze	40
4.1 Shrnutí výsledků práce	40
4.1.1 Vlastní návrh matematické modelu pro predikci silových parametrů řezného procesu 40	
4.1.2 Získání materiálových konstant pro navržený model	41
4.1.3 Ověření navrženého matematického modelu	42

4.1.4	Zobecnění navrženého modelu s následným ověřením.....	43
4.1.5	Zpřesnění navrženého modelu o vliv opotřebení.....	45
4.1.6	Vytvoření softwarové aplikace pro predikci silových parametrů a zatížení včetně 45	
4.2	Splnění cílů disertační práce.....	46
4.3	Teoretický přínos disertační práce.....	47
4.4	Přínos disertační práce pro praxi	47
4.5	Doporučení dalšího výzkumu studované problematiky.....	48
	Seznam použité literatury v tezích.....	50
	Seznam autorových publikací.....	51

Seznam použitých veličin

Veličina	Jednotka	Popis
γ_o	°	Nástrojový ortogonální úhel čela
γ_{o_0}	°	Nástrojový ort. úhel čela nástroje, který byl použit při experimentech, při kterých byly zjištěny mat. konstanty
$\gamma_{o_{akt}}$	°	Nástrojový ortogonální úhel čela řezného nástroje, pro který je počítána, respektive predikována řezná síla
κ_r	°	Nástrojový úhel nastavení hlavní řezné hrany
φ	rad	Aktuální úhel natočení nástroje
$\varphi_1(\varphi)$	rad	Aktuální hodnota úhlu záběru i-tého zubu řezného nástroje
φ_{st}	rad	Počáteční úhel záběru bříty frézovacího nástroje
φ_{ex}	rad	Koncový úhel záběru bříty frézovacího nástroje
φ_z	rad	Úhel mezi zuby frézovacího nástroje
$\varphi_{záb}$	rad	Úhel záběru bříty frézovacího nástroje
θ_{st}	rad	Počáteční úhel působení zaoblené části bříty
θ_{ex}	rad	Koncový úhel působení zaoblené části bříty
A_D	mm ²	Plocha odřezávané vrstvy
$A_D(\varphi)$	mm ²	Plocha odřezávané vrstvy pro aktuální úhel záběru
$A_{D_1}(\varphi)$	mm ²	Plocha odřezávané vrstvy rovné části bříty řezné hrany pro aktuální úhel záběru
$A_{D_2}(\varphi)$	mm ²	Plocha odřezávané vrstvy zaoblené části bříty řezné hrany pro aktuální úhel záběru
\bar{z}_e	mm	Radiální hloubka řezu
\bar{z}_p	mm	Axiální hloubka řezu
b_D	mm	Šířka odřezávané vrstvy
b_{D_1}	mm	Šířka odřezávané vrstvy rovné části bříty řezné hrany
b_{D_2}	mm	Šířka odřezávané vrstvy zaoblené části bříty řezné hrany
D	mm	Průměr frézovacího nástroje
D_d	mm	Průměr VBD kruhového průřezu
$d\theta$	°	Element úhlu působení zaoblené části bříty

dA_{D_2}	mm ²	Element plochy odřezávané vrstvy zaoblené části břitu
db_{D_2}	mm	Element šířky odřezávané vrstvy zaoblené části
e	mm	Excentricita
F_c	N	Řezná síla
$F_c(\varphi)$	N	Aktuální hodnota celkové řezné síly
$F_{c1z}(\varphi)$	N	Aktuální hodnota řezné síly na 1 zub frézovacího nástroje
F_{cm}	N	Střední hodnota celkové řezné síly za otáčku
F_{cm1z}	N	Střední hodnota řezné síly na 1 zub řezného nástroje
F_{cN}	N	Kolmá řezná síla
f_z	mm	Posuv na zub
h_D	mm	Tloušťka odřezávané vrstvy
h_{Dm}	mm	Střední hodnota tloušťky odřezávané vrstvy
$h_D(\varphi)$	mm	Aktuální hodnota tloušťky odřezávané vrstvy
$h_{D1}(\varphi)$	mm	Aktuální hodnota tloušťky odřezávané vrstvy rovné části břitu řezné hrany
$h_{D2}(\varphi, \theta)$	mm	Aktuální hodnota tloušťky odřezávané vrstvy zaoblené části břitu řezné hrany
K_{γ_o}	-	Opravný koeficient úhlu čela
K_{mat}	-	Opravný koeficient opotřebení materiálu obrobku
K_{VB}	-	Opravný koeficient opotřebení na hřbetě břitu nástroje
k_c	N/mm ²	Měrná řezná síla
$k_c(\varphi)$	N/mm ²	Aktuální hodnota měrné řezné síly
$k_{c1.1}$	N/mm ²	Měrná řezná síla pro plochu odřezávané vrstvy 1 mm ²
m_c	-	Materiálová konstanta určující vliv tloušťky odřezávané vrstvy na změnu měrné řezné síly
m_{vc}	-	Materiálová konstanta určující vliv řezné rychlosti na změnu měrné řezné síly
N	-	Počet zubů frézovacího nástroje
r_e	mm	Poloměr špičky
VB	μm	Opotřebení na hřbetě břitu řezného nástroje
v_c	m/min	Řezná rychlost
Z_e	-	Počet zubů v záběru

1 Rozbor současného stavu

V současné době, v tvrdé konkurenci uživatelů, ale i dodavatelů nástrojů, strojů a komponent, je třeba stále zdokonalovat využití potenciálu jednotlivých prvků řezného procesu (nástroj, stroj, pracovní podmínky). Pro výrobce je důležitá znalost produktivity a hospodárnosti procesu obrábění a jejich dílčích aspektů, jako je například potřebný příkon a krouticí moment stroje, rychlost úběru materiálu, energetická náročnost obrábění, doba trvání a odhadovaná cena navržené operace. Znalost uvedených ukazatelů obráběcího procesu lze pro navrhované řezné podmínky, nástroj a materiál obrobku, predikovat pomocí různých modelovacích technik.

Obrábění je však velmi komplikovaný proces, jehož výsledek je ovlivněn celou řadou, často ne zcela jednoznačně definovaných parametrů a veličin. Především z toho důvodu je velmi komplikované provádět modelování řezného procesu, respektive přesnou predikci jeho hlavních parametrů (síla, teplota, tvar vznikající třísky, opotřebení břitu nástroje atp.). Pro dosažení maximální shody predikovaných parametrů s realitou by bylo třeba zachytit všechny aspekty vzájemné interakce nástroje, obrobku, stroje, ale i řezného prostředí. To je však prakticky nemožné i proto, že neznáme v potřebném detailu ani skutečné stavy jednotlivých aspektů v daném okamžiku, jako je např. účinek řezného prostředí, stav a reálný tvar břitu řezného nástroje, nehomogenitu složení a mechanických vlastností obráběného materiálu. Modelování a simulace řezného procesu proto vždy bude jistým zjednodušením reálného stavu obrábění a působících jevů.

Pro možnost modelování silových účinků řezného procesu dnes existuje několik zcela odlišných metod a principů, kterými je však dosahováno velmi odlišných výsledků. Některé z těchto metod jsou implementovány do softwarových aplikací, z nichž některé jsou volně použitelné.

Tato disertační práce se zaměřuje na návrh matematického modelu pro predikci silových parametrů řezného procesu při frézování frézovacími hlavami a následnou implementaci navrženého modelu do softwarové aplikace, která pomůže technologům v praxi správně volit vhodné typy nástrojů, operací, strojů a rychle stanovovat hlavní parametry řezného procesu, a která bude oproti již existujícím volně použitelným softwarovým produktům přesnější a univerzálnější.

1.1 Silové účinky při frézování

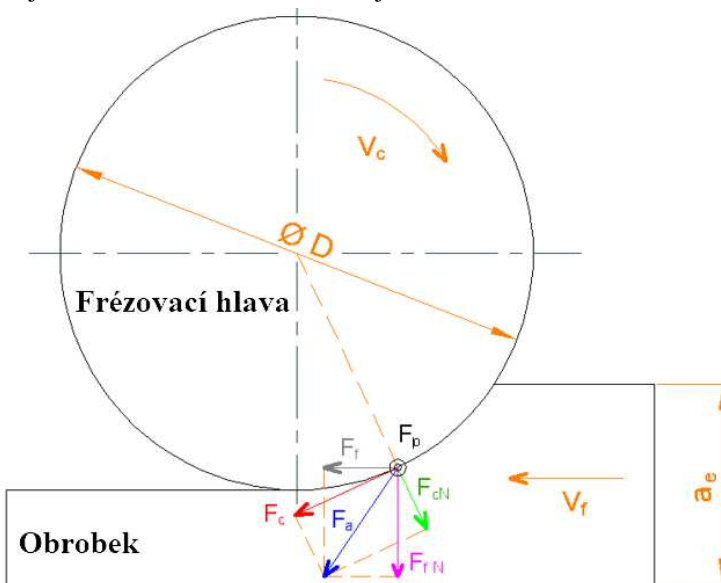
V obráběném materiálu vzniká při vnikání břitu řezného nástroje stav napjatosti, který v mezní situaci způsobuje jeho dělení. To je doprovázeno plastickými i elastickými deformacemi. Kromě těchto deformačních jevů se při dělení materiálu prosazující i silové jevy. Jejich znalost je nutná

k vyváženému řezání, speciálně s ohledem na pozitivní průběh obrábění a stabilitu břitu. Znalost silových účinků je možné využít při:

- využití, dimenzování, volbě či konstrukci obráběcího stroje,
- zajištění energetické účinnosti řezného procesu,
- posuzování tepelných jevů řezného procesu,
- hodnocení trvanlivosti (životnosti) řezného nástroje,
- posouzení celkové ekonomické bilance třískového obrábění,
- zajištění stability řezného procesu. [1]

1.1.1 Silový rozklad na břitu frézovacího nástroje

U frézování frézovací hlavou je silový rozklad v aktuálním okamžiku záběru jednoho břitu frézovacího nástroje znázorněn na Obr. 1.



Obr. 1: Silový při sousledném frézování frézovací hlavou.

Dle ČSN ISO 3002-4, viz reference [2], jsou jednotlivé síly na břitu frézovacího nástroje: řezná síla (F_c), kolmá řezná síla (F_{cN}), síla posuvu (F_f), kolmá síla posuvu (F_{fN}), pasivní síla (F_p), aktivní síla (F_a), síla řezání (F).

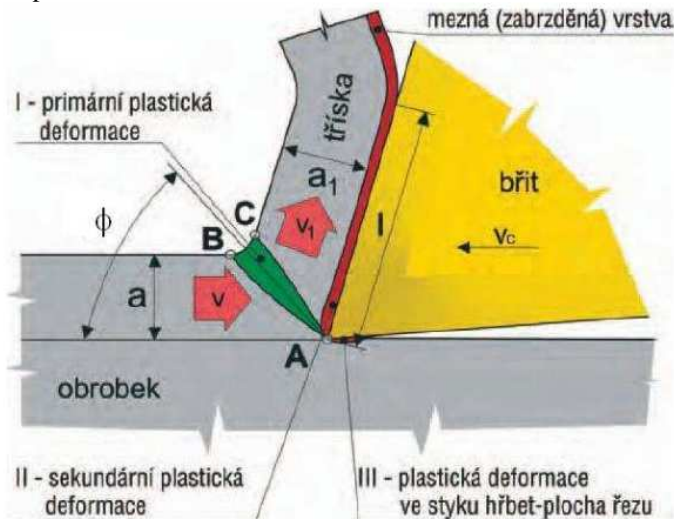
Mezi nejdůležitější síly z výše uvedených patří řezná síla (F_c), což je momentotvorná síla. Tato síla bývá nejčastěji počítaná různými metodikami a principy zmíněnými v kapitole o metodikách modelování a simulace řezného procesu.

Významnou veličinou řezného procesu je síla řezání (F). Tato síla musí překonat řezný odpor, který klade obráběný materiál na břit nástroje. Pokud

tato síla překoná řezný odpor, nastává oddělení třísky od obrobku. Z podmínky rovnováhy plyne, že při určování síly řezání (resp. jejích složek) a řezného odporu (resp. jeho složek) postačí určit pouze jednu z těchto veličin [3].

1.1.2 Oblast primární plastické deformace a její souvislost se silovými jevy při obrábění

Vzniku jednotlivých elementů třísky předchází prvotní plastická deformace, kterou prodělává materiál obrobku v oblasti, která se nazývá oblast primární plastické deformace, viz Obr. 2



Obr. 2: Oblasti plastických deformací [4].

Dle reference [3] má oblast primární plastické deformace úzkou souvislost s řadou jevů při obrábění. Jedním z těchto jevů jsou i silové účinky při obrábění. Obecně lze říci, že při rozšiřování primární plastické deformace narůstá hodnota poměrného kluzu, koeficientu pěchování a měrné řezné síly, která způsobuje rovněž i nárůst řezné síly, řezného výkonu a krouticího momentu. Naopak, při zmenšování oblasti primární plastické deformace dochází k poklesu těchto hodnot.

Oblast primární plastické deformace, a tedy i velikost řezné síly, je ovlivněna řadou parametrů, mezi které patří fyzikální a chemické vlastnosti obráběného materiálu, parametry řezných podmínek, geometrie řezného nástroje a vliv řezného prostředí.

Mezi řezné podmínky, které mají vliv na velikost primární plastické deformace, patří především posuv na zub, respektive tloušťka odřezávané vrstvy a řezná rychlost. Tloušťka odřezávané vrstvy ovlivňuje oblast primární

plastické deformace způsobem, že s jejím poklesem se oblast primární plastické deformace rozšiřuje a natáčí směrem do obráběného materiálu, čímž dochází k nárůstu měrné řezné síly. Řezná rychlost ovlivňuje oblast primární plastické deformace obdobným způsobem jako tloušťka odřezávané vrstvy, tedy s poklesem řezné rychlosti se rozšiřuje oblast primární plastické deformace. Vliv řezné rychlosti však bývá daleko menší než vliv tloušťky odřezávané vrstvy.

Mezi parametry geometrie řezného nástroje, které ovlivňují oblast primární plastické deformace, a tedy i velikost měrné řezné síly, patří: úhel nastavení hlavního ostří, poloměr špičky, úhel čela. Změna oblastí primární plastické deformace se změnou úhlu nastavení hlavního ostří je přímo spojena s tloušťkou odřezávané vrstvy. Se zmenšováním úhlu nastavení se hodnota tloušťky odřezávané vrstvy snižuje, čímž dochází k rozšíření oblasti primární plastické deformace a nárůstu měrné řezné síly. Co se týče poloměru špičky, s jeho zvětšujícím se hodnotou se snižuje hodnota středního úhlu nastavení, a tedy i tloušťky odřezávané vrstvy, což má za následek rozšíření oblasti primární plastické deformace a nárůst měrné řezné síly. Úhel čela má podstatný vliv na změnu primární plastické deformace. Se zmenšujícím se hodnotou úhlu čela se oblast primární plastické deformace natáčí směrem do obrobku a rozšiřuje se, čímž roste měrná řezná síla.

1.2 Měření sil při frézování

Pro sestavení matematického modelu řezné síly nebo jakéhokoliv jiného silového parametru je potřeba provést řadu experimentálních měření. Základní rozdělení metodik měření sil je podle toho, zda výstupem z měření jsou síly (přímé měření sil) nebo jiná veličina, která je pak přepočítávána na řeznou sílu (nepřímé měření sil).

1.2.1 Přímé měření sil při frézování

Přímé měření složek síly řezání je založeno na měření deformací v soustavě stroj-nástroj-obrobek během obrábění. K měření využíváme měřicí přístroj - dynamometr. Ten musí zaručit nezávislost měřené veličiny na provozních vlastnostech měřícího zařízení, a také je od něj požadována schopnost měření sledované veličiny ve zvoleném rozsahu s potřebnou přesností a stálostí naměřených hodnot s časem. Existuje celá řada dynamometrů, rozdělených podle principu snímání měřené síly – mechanické, hydraulické, pneumatické, elektrické. V dnešní době jsou nejrozšířenější elektrické dynamometry. Jejich podstatou je přeměna deformace na elektrickou veličinu snímačem, který představuje mechanicko-elektrický transformátor. Je několik typů elektrických dynamometrů – indukční, kapacitní, piezoelektrické, odporové. Pro měření složek síly řezání při frézování jsou z elektrických dynamometrů nejčastěji používané piezoelektrické dynamometry. [1, 5, 6]

1.2.2 Nepřímé měření sil při frézování

Nepřímé měření sil je založeno na tom, že síla je stanovena prostřednictvím jiné veličiny, která je pak přepočítávána na řeznou sílu (F_c). Při frézování je využívána metodika stanovení řezné síly z výkonu. Pro měření výkonu se používá wattmetrů, které dávají přímý údaj. Dále se používá ampérmetrů a kosinoměru, pomocí nichž se změří proud a napětí a z toho se pak vypočítá výkon součinem změřeného proudu a napětí [7, 8]. Abychom získali řezný výkon (P_c), tedy výkon potřebný k vlastnímu obrábění, je třeba vyhodnotit celkový výkon obráběcího stroje (P) a výkon stroje při chodu naprázdno (P_0). Řezný výkon (P_c) je následně vypočten na základě rozdílu těchto dvou odečtených hodnot výkonů z naměřených dat [5, 6]. Na základě řezného výkonu a řezné rychlosti se následně vypočte řezná síla.

Tato metodika stanovení řezné síly je poměrně jednoduchá a lze jí využít u všech způsobů obrábění. Nevýhodou této metody je malá citlivost a omezená přesnost měření, která je způsobená rozdílnou účinností stroje při zatížení a při chodu naprázdno. [9, 10]

1.3 Metodiky modelování a simulace řezného procesu

Pro možnost modelování a simulace řezného procesu existuje několik metodik a principů. Mezi nejznámější uvedené metodiky patří:

- FEM a materiálové modelování
- Predikce výstupních parametrů pomocí umělé neuronové sítě
- Modelování na základě empirických vztahů
- Modelování na základě měrné řezné síly a plochy odřezávané vrstvy

V první řadě je nutno si uvědomit, že obrábění je složitý proces, který je ovlivněn celou řadou faktorů a je nemožné u jakékoliv metodiky podchytit všechny faktory, které mají na obráběcí proces vliv. Lze říci, že všechny uvedené přístupy jsou ve stávající podobě nevhodné pro potřebu rychlého, efektivního, přesného a univerzálního predikování parametrů řezného procesu při frézování frézovacími hlavami. Využitelné jsou v podstatě jen s velkými omezeními. Aby byla nově navrhovaná metodika predikce silových parametrů řezného procesu dokonalejší v některém z uvedených aspektů, je třeba implementovat do některé z metodik vlastní myšlenky a poznatky tak, aby byla zaručena dostatečná přesnost, univerzálnost, rychlost výpočtů a aplikovatelnost výsledků v praxi, a to s ohledem na co nejmenší podíl potřebných experimentů, jelikož není možné pro každý obráběný materiál provést experimenty se širokou škálou nástrojů s různou geometrií a širokým rozsahem řezných podmínek.

Nejvhodnější metodikou pro predikci silových parametrů řezného procesu při frézování se jeví metodika založená na výpočtu řezné síly pomocí součinu měrné řezné síly a plochy odřezávané vrstvy. Tato metodika je aplikovatelná

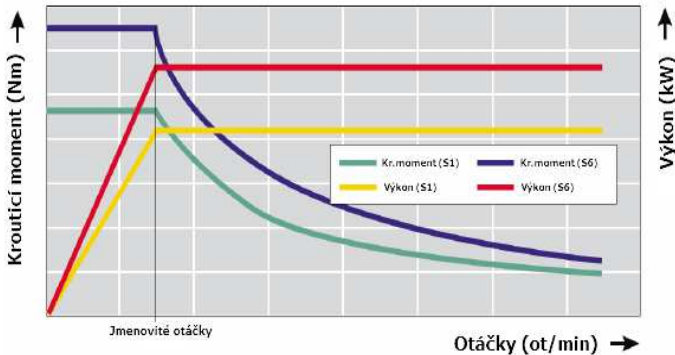
pro technologie obrábění nástrojem s definovanou geometrií břitu, tedy pro frézování, soustružení, vrtání a vyvrtávání.

V praxi tuto metodiku používají ve svých softwarových aplikacích přední světoví výrobci řezných nástrojů, kdy většina z nich je volně dostupná. Uvedené aplikace jsou založeny na matematických modelech, které jsou však velmi zjednodušeny, a tak je při predikci řezných sil při frézování dosahováno značně velkých chyb.

Pro predikci přesnějších hodnot silových parametrů při frézování je tedy nutné navrhnout sofistikovanější matematický model a tento pak ověřit řadou experimentů.

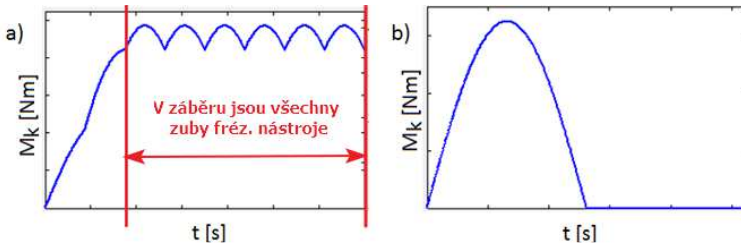
1.4 Predikce zatížení vřetene

Pro možnost posouzení zatížení vřetene potřebujeme do vykreslené momentové a výkonové charakteristiky vřetene stroje, viz Obr. 3, umístit efektivní hodnoty krouticího momentu a výkonu, které je nutno vypočítat.



Obr. 3: Výkonová a momentová charakteristika vřetena [11].

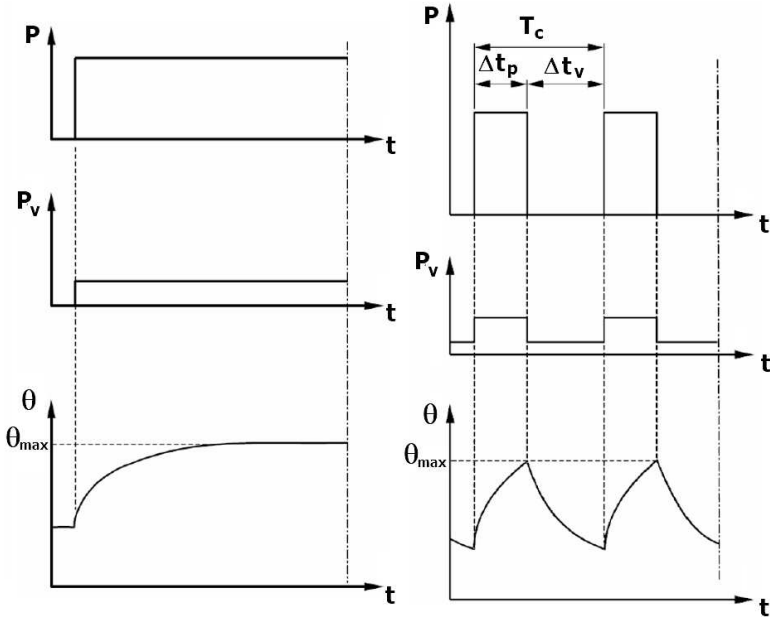
Nejprve je nutné si uvědomit, že z hlediska kontaktu nástroje s obrobkem rozlišujeme u frézování přerušovaný a nepřerušovaný řez, viz Obr. 4. Tyto typy řezů je potřeba nahradit režimy zatížení vřetene, které využívají výrobci vřeten k popisu možností maximálního zatěžování vřetene, a které jsou standardizované dle ČSN EN 60034-1.



Obr. 4: Průběh krouticího momentu v čase jedné otáčky: a) nepřerušovaný, b) přerušovaný řez.

U nepřerušovaného řezu nástroj postupně najíždí do záběru, kroučící moment, potažmo výkon, narůstá z nulové hodnoty až k dosažení plného záběru, přičemž pak kolísá mezi minimální a maximální hodnotou. V tomto případě se jedná o trvalé zatížení s periodicky proměnnou velikostí, které přechází do podoby trvalého zatížení s konstantní hodnotou kroučícího momentu a výkonu. Toto zatížení odpovídá režimu zatížení vřetene S1, viz Obr. 5 vlevo. Efektivní hodnota kroučícího momentu a výkonu je v tomto případě stejná jako střední hodnota kroučícího momentu a výkonu za otáčku.

U přerušovaného řezu je nástroj v záběru, a když je mimo záběr, tak je velikost kroučícího momentu a výkonu nulová. V tomto případě se jedná o přerušované zatížení s konstantní hodnotou kroučícího momentu v době záběru. Toto zatížení odpovídá režimu zatížení vřetene S6, viz Obr. 5 vpravo. Efektivní hodnota kroučícího momentu se určuje pouze pro oblast, kdy je nástroj v záběru. V tomto případě tedy není efektivní hodnota kroučícího momentu stejná jako střední hodnota řezné síly za otáčku, jako v případě trvalého zatížení, ale je stejná jako střední hodnota řezné síly na 1 zub v záběru.



Obr. 5: Režim S1 (vlevo), Režim S6 (vpravo) [12].

P – zatížení, P_v – elektr. ztráty, θ – teplota, θ_{max} – maximální dosažená teplota, t – čas, T_c – doba jednoho cyklu zatížení, Δt_p – doba chodu s konstantním zatížením, Δt_v – doba chodu bez zatížení.

2 Cíle disertační práce

Hlavním cílem disertační práce je vytvoření a ověření matematického modelu pro predikci silových účinků a zatížení vřetene obráběcího stroje při frézování frézovacími hlavami a tvorba softwarové aplikace na základě navrženého modelu, která pomůže technologům v praxi správně volit vhodné typy nástrojů, operací, strojů a rychle stanovovat hlavní parametry řezného procesu, a která bude oproti již existujícím softwarovým produktům přesnější a univerzálnější. Ke splnění hlavního cíle disertační práce je potřeba specifikovat dílčí cíle práce, mezi které patří:

1. Vlastní návrh matematického modelu pro predikci silových parametrů při frézování frézovacími hlavami

Vytvoření matematického modelu pro predikci silových parametrů pro různé strategie frézování frézovacími hlavami (do plného materiálu, čelní symetrické a nesymetrické, boční) aplikovatelný pro různé řezné podmínky a nástroje s různou geometrií, tj. VBD kruhového a nekruhového tvaru (čtvercové, trojúhelníkové), uvažování poloměru špičky u VBD nekruhového tvaru, uvažování úhlu nastavení.

2. Získání materiálových konstant pro navržený matematický model

Návrh metodiky pro získání materiálových konstant nezbytných pro navržený matematický model. Na základě navržené metodiky získat pomocí experimentálních měření materiálové konstanty pro tři vybrané materiály.

3. Ověření navrženého matematického modelu

Ověřit navržený matematický model řezné síly na 1 zub porovnáním vypočtených a experimentálních hodnot řezných sil.

4. Zobecnění navrženého matematického modelu a jeho ověření

Zobecnit navržený matematický model řezné síly tak, aby byl aplikovatelný pro nástroje s různou geometrií (nástroje s různou hodnotou nástrojového ortogonálního úhlu čela). Následně ověřit zobecněný model řezné síly za otáčku pro různý počet zubů v záběru (1 zub a plně osazený nástroj), a to pomocí experimentálních měření.

5. Zpřesnění navrženého matematického modelu o vliv opotřebení

Pro vybraný materiál zpřesnit navržený matematický model řezné síly o vliv opotřebení břitu řezné hrany.

6. Vytvoření softwarové aplikace pro predikci silových parametrů při frézování

Vytvořit softwarovou aplikaci, která bude pomocí implementovaného matematického modelu predikovat silové parametry a zatížení vřetene při frézování.

3 Vlastní zpracování

3.1 Vlastní návrh matematického modelu

3.1.1 Úvod a motivace pro zpřesnění modelu

Základní princip navrženého matematického modelu je výpočet řezné síly (F_c) přes součin měrné řezné síly (k_c) a plochy odřezávané vrstvy (A_D), kde měrná řezná síla je v základním tvaru funkcí tloušťky odřezávané vrstvy (h_D) a plocha odřezávané vrstvy (A_D) je součin tloušťky a šířky odřezávané vrstvy, viz vztah (1).

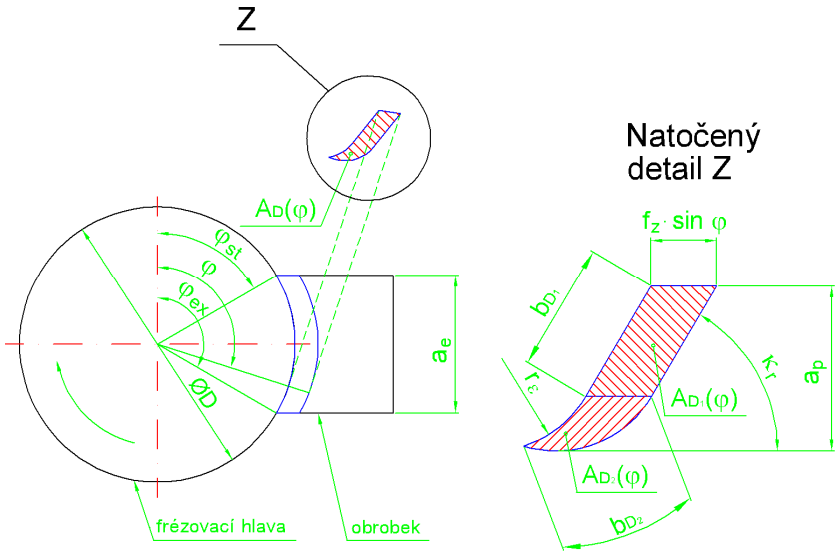
$$\left. \begin{array}{l} k_c = k_{c_{1.1}} \cdot h_D^{-m_c} \\ A_D = h_D \cdot b_D \end{array} \right\} F_c = k_c \cdot A_D = k_{c_{1.1}} \cdot h_D^{1-m_c} \cdot b_D \quad (1)$$

Zpřesnění měrné řezné síly počítané v základním tvaru přes tloušťku odřezávané vrstvy spočíval ve zpřesnění výpočtu uvažováním vlivu řezné rychlosti a ve zpřesnění výpočtu samotné tloušťky odřezávané vrstvy, kde se obvykle v modelech uvažuje jen rovná řezná hrana a zanedbává se působení zaoblené části řezné hrany. Při malých axiálních hloubkách řezu však obrábí převážně nebo jen pouze zaoblená řezná hrana, a tak zde dochází k velké nepřesnosti stanovení hodnoty řezné síly. Zpřesnění plochy odřezávané vrstvy spočíval ve zpřesnění výpočtu tloušťky odřezávané vrstvy, stejně jako v případě zpřesnění měrné řezné síly a ve zpřesnění šířky odřezávané vrstvy, a to uvažováním rovné i zaoblené části břitu řezného nástroje, jak již bylo výše popsáno.

3.1.2 Výpočet šířky a aktuální tloušťky odřezávané vrstvy

Pro výpočet aktuální a střední hodnoty řezné síly bylo nejprve nutné odvodit vztah pro šířku a aktuální tloušťku odřezávané vrstvy s vlivem působení zaoblené i rovné části břitu řezné hrany. Princip výpočtu aktuální hodnoty tloušťky odřezávané vrstvy pro aktuální úhel záběru vychází z podílu aktuální plochy odřezávané vrstvy v určitém úhlu záběru a šířky odřezávané vrstvy, viz vztah (2). Prvním krokem bylo tedy spočítat aktuální plochu odřezávané vrstvy. Pro tyto účely byla plocha odřezávané vrstvy v aktuálním úhlu záběru rozdělena na 2 oblasti, a sice na oblast, kde působí rovná část břitu $A_{D_1}(\varphi)$ a oblast, kde působí zaoblená část břitu $A_{D_2}(\varphi)$, viz Obr. 6. Plocha odřezávané vrstvy pro aktuální úhel záběru je počítána na základě součtu těchto dvou ploch. Šířka odřezávané vrstvy (b_D) se vypočítá součtem šířky rovné (b_{D_1}) a zaoblené části břitu řezné hrany (b_{D_2}).

$$h_D(\varphi) = \frac{A_D(\varphi)}{b_D}, \quad kde \quad \begin{array}{l} A_D(\varphi) = A_{D_1}(\varphi) + A_{D_2}(\varphi) \\ b_D = b_{D_1} + b_{D_2} \end{array} \quad (2)$$



Obr. 6: Plocha odřezávané vrstvy pro aktuální úhel záběru.

3.1.3 Rovná část břitu řezné hrany

U VBD nekruhového tvaru může být axiální hloubka řezu (a_p) nastavena tak, že se obrábí buď pouze zaoblenou částí břitu řezné hrany nebo zaoblenou i rovnou částí břitu řezné hrany. Když je splněna podmínka $a_p \leq R \cdot (1 - \cos \kappa_r)$, tak se obrábí pouze zaoblenou částí břitu řezné hrany. V tomto případě jsou hodnoty plochy odřezávané vrstvy, šířky odřezávané vrstvy a aktuální tloušťky odřezávané vrstvy rovné části břitu řezné hrany rovny hodnotě 0. Když tato podmínka není splněna, tak se obrábí jak zaoblenou, tak i rovnou částí břitu řezné hrany a pro tento případ jsou platné níže uvedené vztahy pro výpočet hodnot plochy odřezávané vrstvy, šířky odřezávané vrstvy a aktuální tloušťky odřezávané vrstvy rovné části břitu řezné hrany, viz (3).

$$h_{D_1}(\varphi) = f_z \cdot \sin \varphi \cdot \sin \kappa_r$$

$$b_{D_1} = \frac{a_p - R \cdot (1 - \cos \kappa_r)}{\sin \kappa_r} \quad (3)$$

$$A_{D_1}(\varphi) = h_{D_1}(\varphi) \cdot b_{D_1} = f_z \cdot \sin \varphi \cdot [a_p - R \cdot (1 - \cos \kappa_r)]$$

3.1.4 Zaoblená část břitu řezné hrany

Zaoblená řezná hrana je na rozdíl od rovné řezné hrany při obrábění vždy v záběru. Na základě Obr. 6 byly odvozeny vztahy (4).

$$h_{D_2}(\varphi, \theta) = f_z \cdot \sin \varphi \cdot \sin \theta$$

$$db_2 = R \cdot d\theta \quad (4)$$

$$dA_2(\varphi, \theta) = f_z \cdot \sin \varphi \cdot R \cdot \sin \theta d\theta$$

Po integrování elementu plochy odřezávané vrstvy a šířky odřezávané vrstvy zaoblené části břitu řezné hrany v mezích počátečního (θ_{st}) a koncového (θ_{ex}) úhlu působení zaoblené části břitu, dostáváme vztahy (5).

$$b_{D_2} = R \cdot (\theta_{ex} - \theta_{st}) \quad (5)$$

$$A_{D_2}(\varphi) = f_z \cdot \sin \varphi \cdot R \cdot (\cos \theta_{st} - \cos \theta_{ex})$$

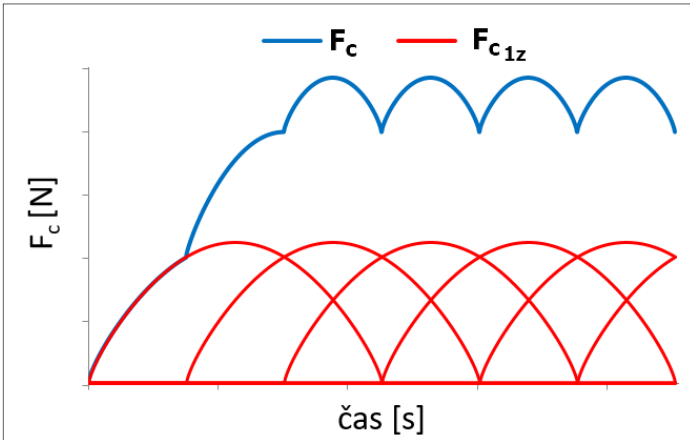
Počáteční (θ_{st}) a koncový (θ_{ex}) úhel působení zaoblené části břitu se vypočítají dle vztahu (6).

$$\theta_{st} = -\arcsin\left(\frac{f_z}{2 \cdot R}\right)$$

$$\theta_{ex} = \begin{cases} \kappa_r \cdot \frac{\pi}{180}, & a_p > R \cdot (1 - \cos \kappa_r) \\ \arccos\left(\frac{R - a_p}{R}\right), & a_p \leq R \cdot (1 - \cos \kappa_r) \end{cases} \quad (6)$$

3.1.5 Výpočet aktuální hodnoty řezné síly

Výpočet aktuální hodnoty řezné síly je důležitý jak z hlediska vykreslení průběhu této síly v určitém intervalu, například v čase jedné otáčky, viz Obr. 7, tak je i základem pro výpočet střední hodnoty této síly, jelikož střední hodnota funkce se počítá na základě integrace funkce aktuální hodnoty řezné síly na 1 zub frézy v mezích počátečního a koncového úhlu záběru.



Obr. 7: Průběh aktuální hodnoty řezné síly (modrá křivka) a řezné síly na 1 zub (červená křivka) v čase jedné otáčky pro frézování pro plného materiálu ($a_c=D$) se třemi zuby v záběru.

Aktuální hodnota měrné řezné síly na 1 zub se pro natočení i -tého zubu s uvažováním vlivu řezné rychlosti vypočítá na základě vztahu (7).

$$k_c(\varphi_i(\varphi)) = k_{c_{1.1}} \cdot h_D(\varphi_i(\varphi))^{-m_c} \cdot \left(\frac{v_c}{v_{c_{def}}}\right)^{-m_{vc}} \quad (7)$$

Aktuální hodnota řezné síly na 1 břit frézovacího nástroje $F_{c_{1Z}}(\varphi)$ se tedy s uvažováním vztahu (7) vypočítá na základě vztahu (8).

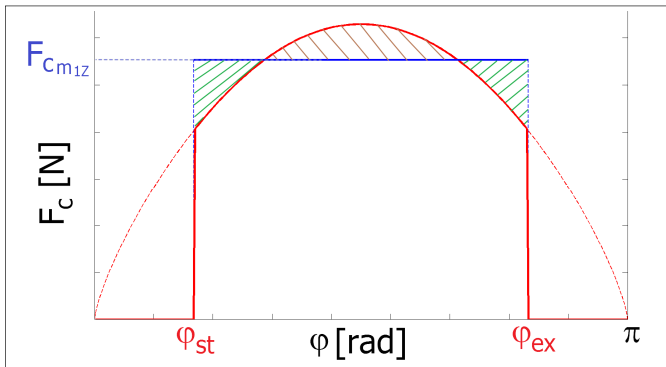
$$F_{c_{1Z}}(\varphi_i(\varphi)) = k_{c_{1.1}} \cdot h_D(\varphi_i(\varphi))^{1-m_c} \cdot \left(\frac{v_c}{v_{c_{def}}}\right)^{-m_{vc}} \cdot b_D \quad (8)$$

3.1.6 Střední hodnota řezné síly za záběr pro 1 zub frézy

Pro výpočet celkové střední hodnoty řezné síly za otáčku pro N zubů v záběru (F_{c_m}) je nejprve nezbytné vypočítat střední hodnotu řezné síly za záběr pro 1 zub frézovacího nástroje ($F_{c_{m_{1Z}}}$). Pro její výpočet budeme vycházet z obecného vztahu pro výpočet střední hodnoty funkce, viz vztah (9) vlevo, který je uveden v referencích [13, 14]. Střední hodnota řezné síly za záběr pro 1 zub frézovacího nástroje ($F_{c_{m_{1Z}}}$) se tedy vypočítá na základě integrace funkce aktuální hodnoty řezné síly na 1 zub frézovacího nástroje $F_{c_{1Z}}(\varphi)$ v mezích počátečního a koncového úhlu záběru, viz vztah (9) vpravo.

$$\bar{f} = \frac{1}{b-a} \int_a^b f(x) dx \rightarrow F_{c_{m_{1Z}}} = \frac{1}{\varphi_{ex} - \varphi_{st}} \int_{\varphi_{st}}^{\varphi_{ex}} F_{c_{1Z}}(\varphi) d\varphi \quad (9)$$

Výše uvedená střední hodnota řezné síly za záběr pro 1 zub frézovacího nástroje je znázorněna na Obr. 8, a to společně s průběhem aktuální hodnoty řezné síly na 1 zub frézovacího nástroje. Tento vztah je obecným vztahem pro výpočet střední hodnoty řezné síly za záběr pro 1 zub frézovacího nástroje a je možné ho použít pro různé modely aktuální hodnoty řezné síly na 1 zub.



Obr. 8: Průběh aktuální hodnoty řezné síly na 1 břit frézovacího nástroje (tučná červená) a střední hodnota řezné síly za záběr pro 1 břit frézovacího nástroje (modrá).

Po dosažení vztahu pro výpočet aktuální hodnoty řezné síly na 1 břit frézovacího nástroje do vztahu pro výpočet střední hodnoty funkce, dostáváme vztah pro výpočet střední hodnoty řezné síly na 1 břit řezného nástroje $F_{c_{m_{1z}}}$.

$$F_{c_{m_{1z}}} = \frac{k_{c_{1.1}} \left(\frac{v_c}{v_{c_{def}}} \right)^{-m_{vc}} b_D}{\varphi_{záb}} \int_{\varphi_{st}}^{\varphi_{ex}} h_D(\varphi)^{1-m_c} d\varphi \quad (10)$$

Integrál $\int_{\varphi_{st}}^{\varphi_{ex}} h_D(\varphi)^{1-m_c} d\varphi$ nemá jednoduché analytické řešení. Řešením je použití software, jako je například Matlab, ve kterém provádím veškeré matematické modelování. Výpočet střední hodnoty řezné síly na 1 zub uvádím v příloze č. 2, kde je skript naprogramovaný v softwaru Matlab.

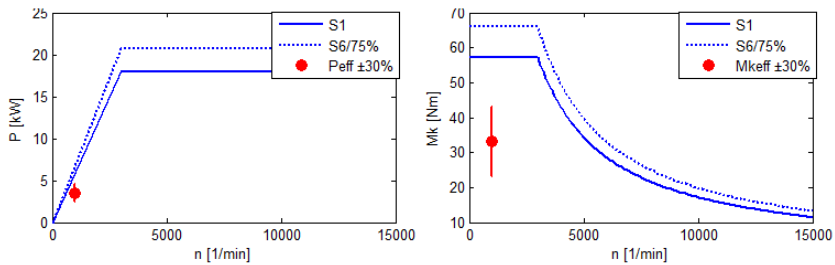
3.1.7 Střední hodnota řezné síly za otáčku pro N zubů v záběru

Výpočet střední hodnoty řezné síly za otáčku pro N zubů v záběru (F_{c_m}) se provede, na základě referencí [15, 16], součinem střední hodnoty řezné síly na 1 zub frézovacího nástroje a počtem zubů v záběru (Z_e), viz vztah (11).

$$F_{c_m} = F_{c_{m_{1z}}} \cdot Z_e \quad kde: Z_e = N \cdot \frac{\varphi_{záb}}{2 \cdot \pi} \quad (11)$$

3.1.8 Výpočet efektivní hodnoty řezné síly

Aby bylo možné predikovat zatížení vřetene, je nutno vypočítat efektivní hodnotu krouticího momentu a výkonu pro aktuální režim zatížení vřetene a tyto hodnoty pak vynést do momentové a výkonové charakteristiky vřetene stroje, viz Obr. 9.



Obr. 9: Vynesení efektivní hodnoty výkonu do výkonové charakteristiky (vlevo); Vynesení efektivní hodnoty krouticího momentu do momentové charakteristiky (vpravo).

Výchozím parametrem pro jejich výpočet je řezná síla. Je tedy nutné zavést tzv. efektivní hodnotu řezné síly, na jejímž základě se budou hodnoty efektivního krouticího momentu a výkonu pro daný režim zatížení vřetene vypočítávat. Výchozím parametrem pro stanovení efektivní hodnoty řezné síly je odvozená rovnice pro výpočet střední hodnoty řezné síly za záběr pro 1 zub

frézovacího nástroje ($F_{c_{m1z}}$). Efektivní hodnotu řezné síly spočítáme na základě koeficientu K , který rozlišuje režim S1 a S6, viz vztah (12).

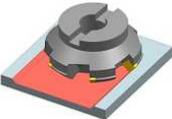
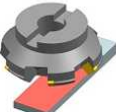
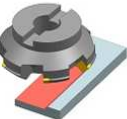
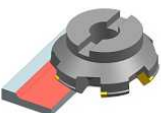
$$F_{c_{ef}} = K \cdot F_{c_{m1z}}, \text{ kde } K = \begin{cases} Z_e & \varphi_z \leq \varphi_{záb} \\ 1 & \varphi_z > \varphi_{záb} \end{cases} \quad (12)$$

Pokud tedy bude úhel mezi břity nástroje (φ_z) větší než úhel záběru, jedná se o režim S6 (přerušovaný řez) a v tomto případě je efektivní hodnota řezné síly rovna střední hodnotě řezné síly za záběr pro 1 zub frézovacího nástroje. Pokud tato podmínka nebude splněna, jedná se o režim S1 (nepřerušovaný řez) a v tomto případě je efektivní hodnota řezné síly rovna střední hodnotě řezné síly za otáčku pro N zubů v záběru.

3.1.9 Výpočet počátečního a koncového úhlu záběru

Počáteční (φ_{st}) a koncový (φ_{ex}) úhel záběru závisí na strategii frézování. Jsou celkem 3 strategie – frézování do plného materiálu, čelní frézování a boční frézování (sousledné a nesousledné). Vztahy pro výpočet počátečního a koncového úhlu záběru jsou pro tyto strategie shrnuty v Tab. 1.

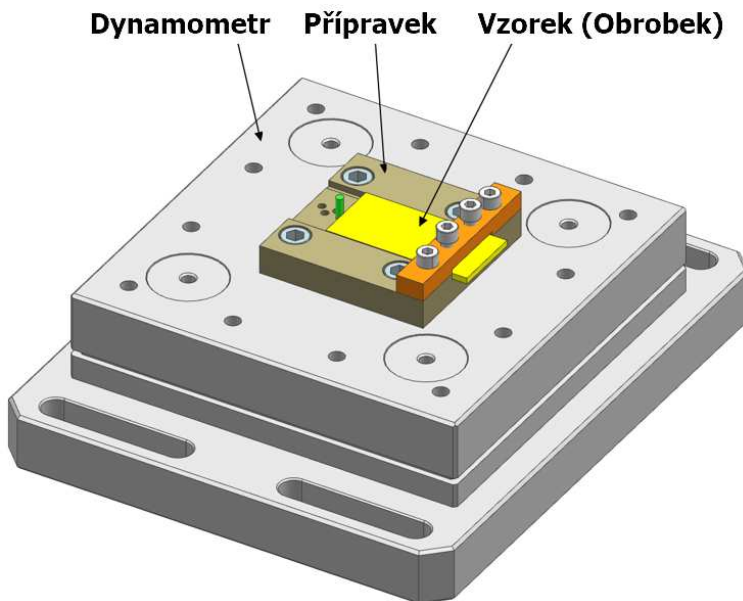
Tab. 1: Vztahy pro výpočet počátečního a koncového úhlu záběru.

Strategie frézování	Počáteční úhel záběru	Koncový úhel záběru
Do plného materiálu 	$\varphi_{st} = 0$	$\varphi_{end} = \pi$
Čelní frézování 	$\varphi_{st} = \arccos\left(\frac{\frac{a_e}{2} + e}{\frac{D}{2}}\right)$	$\varphi_{end} = \pi - \arccos\left(\frac{\frac{a_e}{2} - e}{\frac{D}{2}}\right)$
Boční frézování sousledné 	$\varphi_{st} = \arccos\left(\frac{\frac{a_e}{2} - e}{\frac{D}{2}}\right)$	$\varphi_{end} = \pi$
Boční frézování nesousledné 	$\varphi_{st} = 0$	$\varphi_{end} = \pi - \arccos\left(\frac{a_e - \frac{D}{2}}{\frac{D}{2}}\right)$

3.2 Materiálové konstanty pro vybrané materiály

Pro navržený matematický model v předchozí kapitole bylo nyní nutno získat materiálové konstanty. Vybranými materiály, pro které měly být určeny materiálové konstanty, byly celkem tři: hliníková slitina EN AW 7075, titanová slitina Ti6Al4V a ocel DIN C45.

Pro získání materiálových konstant u těchto tří materiálů obrobku bylo nejprve nutno navrhnout experimenty. Aby bylo možné sestavit matematický model, který by byl aplikovatelný pro nástroje s různou geometrií, respektive s různým poloměrem špičky, bylo přikročeno k frézování obrobku bez vlivu poloměru špičky. Za tím účelem byl navržen vzorek, kterým byla destička obdélníkového průřezu o různých tloušťkách vzorku. Pro realizaci frézování navržených vzorků byl navržen a vyroben přípravek, který byl upnut na dynamometru, viz Obr. 10.

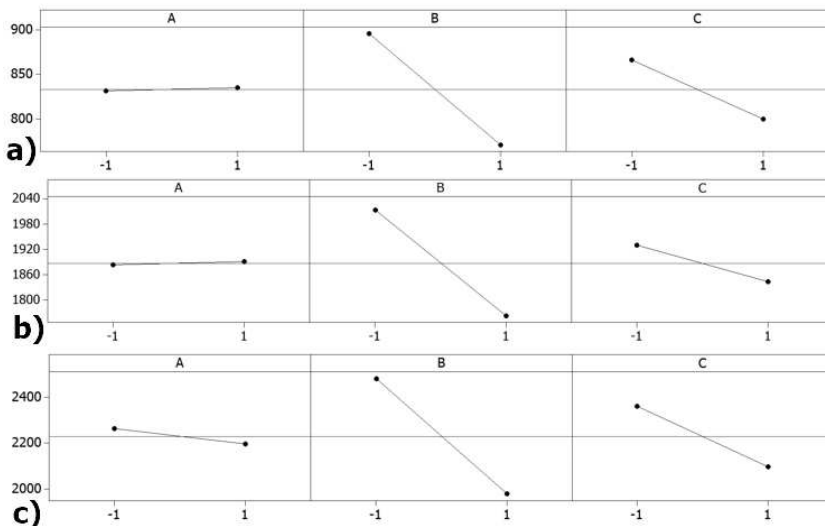


Obr. 10: Navržený přípravek se vzorkem pro realizaci experimentů.

Vyhodnocení experimentů probíhalo v mnou naprogramované softwarové aplikaci vytvořené v softwaru Matlab. Vyhodnoceny byly střední hodnoty řezných sil za záběr ve vybraném intervalu a z těchto hodnot byly vypočteny střední hodnoty měrných řezných sil.

Před samotným získáním materiálových konstant byla nejprve provedena u každého materiálu analýza rozptylu (ANOVA) pro ověření vlivu hlavních faktorů (A, B, C) na změnu velikosti měrné řezné síly. Důraz byl kladen

především na statistickou významnost řezné rychlosti (faktor C) a šířky odřezávané vrstvy (faktor A). U tloušťky odřezávané vrstvy (faktor B) se statistická významnost očekávala. Pro tyto účely byly z centrálního plánu experimentů použity faktoriální body. Na základě analýzy rozptylu pro konkrétní materiál byla dle p-hodnoty určena statistická významnost jednotlivých faktorů pro zvolenou hladinu významnosti, jejíž hodnota byla na základě zkušeností z předchozích let zvolena $\alpha=0.01$. Faktory, jejichž p-hodnota byla větší než tato zvolená hladina významnosti, byly považovány za statisticky nevýznamné. Z analýzy rozptylu se u všech tří zkoumaných materiálů prokázal faktor B (střední tloušťka odřezávané vrstvy) jako statisticky nejvýznamnější faktor. Dále se u všech tří materiálů prokázal faktor C (řezná rychlost) jako druhý statisticky nejvýznamnější faktor. Co se týče statistické významnosti faktoru A (šířka odřezávané vrstvy), prokázal se u všech tří materiálů jako statisticky nevýznamný. Pro doplnění analýzy rozptylu byly pro všechny tři materiály sestrojeny grafy vlivu jednotlivých faktorů jako hlavních efektů na změnu měrné řezné síly, viz Obr. 11.



Obr. 11: Vliv jednotlivých faktorů jako hlavních efektů na změnu měrné řezné síly pro všechny tři zkoumané materiály: a) EN AW 7075, b) Ti6Al4V, c) DIN C45.

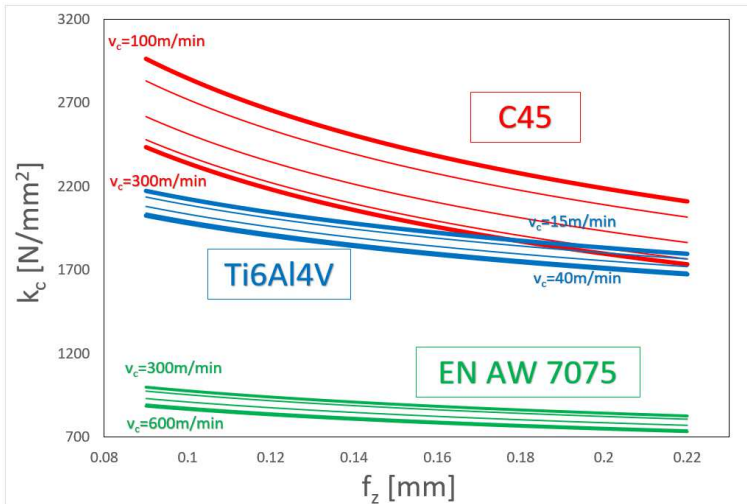
Původně navržený model měrné řezné s vlivem tloušťky odřezávané vrstvy a řezné rychlosti se tedy u všech tří materiálů prokázal jako relevantní a byl tedy následně použit pro získání materiálových konstant, kdy byly pomocí software Minitab zjištěny všechny tři materiálové konstanty pro všechny zkoumané materiály, viz Tab. 2, kde je rovněž zobrazena i řezná rychlost $v_{c_{def}}$.

Tab. 2: Materiálové konstanty pro výpočet měrné řezné síly pro všechny tři materiály.

Materiál	$k_{c1.1} \left[\frac{N}{mm^2} \right]$	$m_c [-]$	$m_{v_c} [-]$	$v_{c_{def}} \left[\frac{m}{min} \right]$
EN AW 7075	558	0.212	0.174	450
Ti6Al4V	1245	0.213	0.072	27.5
C45	1048	0.380	0.179	200

U matematických modelů měrných řezných sil obsahující výše uvedené materiálové konstanty byly zjištěny hodnoty indexu determinace (R^2) a upraveného indexu determinace ($R^2 Adj$). Nejvyšší hodnotu indexu determinace (R^2) a upraveného indexu determinace ($R^2 Adj$) podmiňující míru vysvětlení variability dat daným modelem dosahuje model u materiálu EN AW 7075, dále pak Ti6Al4V a nakonec DIN C45. U všech tří materiálů jsou hodnoty R^2 a $R^2 Adj$ vysoké, a tak lze matematický model pro výpočet měrné řezné síly se získanými materiálovými konstantami považovat za funkční.

Na Obr. 12 je závislost vypočtené měrné řezné síly (k_c) na posuvu na zub (f_z) pro řezné rychlosti v rozsahu, v jakém byly měřeny, tedy: u hliníkové slitiny EN AW 7075 je to v rozsahu 300 až 600 m/min, pro titanovou slitinu Ti6Al4V v rozsahu 15 až 40 m/min a pro ocel DIN C45 v rozsahu 100 až 300 m/min.

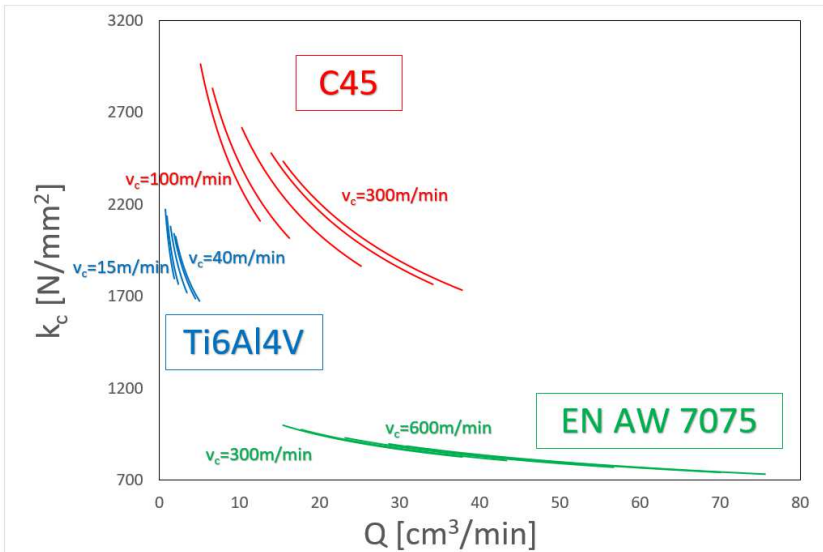


Obr. 12: Závislost měrné řezné síly na posuvu na zub pro všechny tři zkoumané materiály.

Jak je vidět na výše uvedeném obrázku, největší hodnoty měrných řezných sil dosahuje téměř ve všech případech ocel DIN C45. Výjimku tvoří titanová slitina Ti6Al4V při použití řezných rychlostí v rozsahu 15 až 28 m/min při velkých tloušťkách odřezávaného materiálu, kdy jsou hodnoty měrné řezné

síly vyšší, než u oceli DIN C45 při použití velkých řezných rychlostí (271 až 300 m/min). Nejmenší hodnoty měrné řezné síly má hliníková slitina EN AW 7075.

Na Obr. 13 je zobrazena závislost měrné řezné síly (k_c) na úběru materiálu za jednotku času (Q) pro všechny nastavené řezné rychlosti dle plánu experimentů, a to pro všechny tři zkoumané materiály. Jak je vidět na uvedeném obrázku, měrná řezná síla klesá s úběrem materiálu za jednotku času. Dále lze vypožorovat, že s rostoucí řeznou rychlostí klesají jak měrné řezné síly, tak se zvyšuje úběr materiálu za jednotku času. Nejmenší hodnoty úběru materiálu za jednotku času jsou při vysokých hodnotách měrné řezné síly dosahovány u titanové slitiny Ti6Al4V, z čehož nejmenší úběr materiálu a největší měrné řezné síly jsou dosahovány u řezné rychlosti 15 m/min. Naopak největší hodnoty úběru materiálu za jednotku času jsou dosahovány u hliníkové slitiny EN AW 7075, z čehož největší hodnoty úběru materiálu a nejmenší hodnoty měrné řezné síly jsou dosahovány při řezné rychlosti 600 m/min.



Obr. 13: Závislost měrné řezné síly na úběru materiálu za jednotku času pro všechny tři zkoumané materiály.

3.3 Ověření navrženého matematického modelu

3.3.1 Ověření výpočtu řezné síly s uvažováním řezné rychlosti

Tato část se zabývá ověřením středních hodnot řezných sil za záběr pro 1 zub frézovacího nástroje vypočtených na základě navrženého matematického modelu s tím, že ověření bylo provedeno porovnáním vypočtených hodnot

středních sil s hodnotami experimentálně zjištěnými, které byly použity pro získání materiálových konstant u jednotlivých materiálů. Šlo tedy o model bez uvažování poloměru špičky. Hlavním úkolem bylo ověřit vliv řezné rychlosti při výpočtu střední hodnoty řezné síly. Pro tento účel byly uvažovány dva modely – model bez vlivu řezné rychlosti a model s vlivem řezné rychlosti. Tato ověření byla aplikována pro všechny tři materiály, u kterých byly zjištěny materiálové konstanty, tedy pro hliníkovou slitinu EN AW 7075, titanovou slitinu Ti6Al4V a ocel DIN C45.

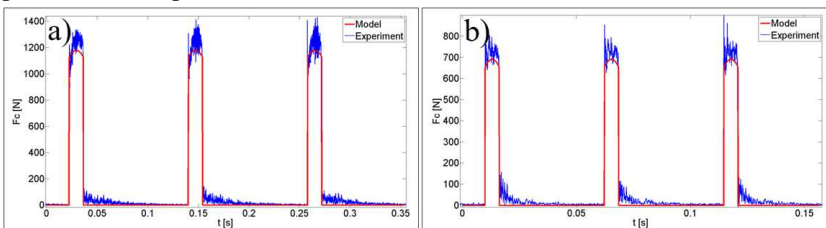
U hliníkové slitiny s označením EN AW 7075 se pohybovala procentuální odchylka modelu bez uvažování řezné rychlosti v rozsahu -5.9 až 7.3 % se střední odchylkou 0.2 % a pro model s uvažováním řezné rychlosti v rozmezí -1.2 až 1.1 % se střední odchylkou 0 %.

U titanové slitiny s označením Ti6Al4V se pohybovala procentuální odchylka modelu bez uvažování řezné rychlosti v rozsahu -4.2 až 4.7 % se střední hodnotou 0.2 % a pro model s uvažováním řezné rychlosti v rozmezí -2.2 až 1.1 % se střední odchylkou 0 %.

U oceli s označením DIN C45 se pohybovala procentuální odchylka modelu bez uvažování řezné rychlosti v rozsahu -10.6 až 13.5 % se střední odchylkou 0.6 % a pro model s uvažováním řezné rychlosti v rozmezí -4.5 až 6.3 % se střední odchylkou -0.1 %.

Těmito ověřeními se u všech tří materiálů potvrdilo, že navržený model s uvažováním řezné rychlosti přesnější. U hliníkové slitiny se rozpětí chyby zmenšilo téměř 6x (z 13.2 % na 2.3 %), u titanové slitiny téměř 3x (z 8.9 % na 3.3 %) a u oceli téměř 2.5x (z 24.1 na 10.8 %).

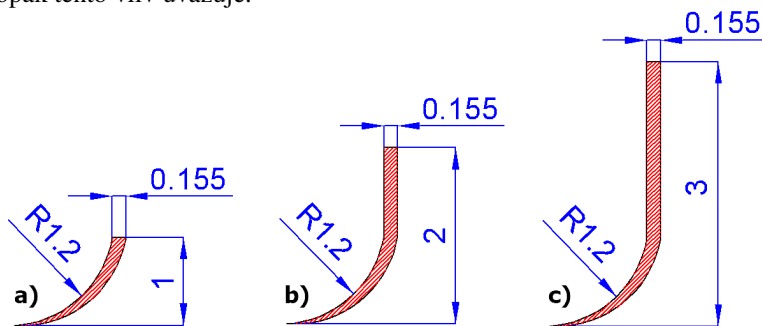
V této části byly také u jednotlivých materiálů ověřeny aktuální hodnoty vypočtených řezných sil, a to porovnáním průběhů řezných sil vypočtených a experimentálně získaných. Příklad těchto ověření je zobrazen na Obr. 14. Na základě těchto porovnaní mohu konstatovat, že průběhy vytvořené na základě vypočtených dat mají pro všechny tři zkoumané materiály dobrou shodu s experimentálně získanými průběhy a lze tedy predikci průběhů řezných sil považovat za úspěšně ověřenou.



Obr. 14: Příklad ověření aktuálních hodnot řezných sil vypočtených na základě navrženého modelu: a) materiál DIN C45, řezné podmínky: $a_p=5\text{mm}$, $a_e=45\text{mm}$, $v_c=200\text{m/min}$, $f_z=0.09\text{mm}$, b) materiál EN AW 7075, $a_p=5\text{mm}$, $a_e=45\text{mm}$, $v_c=450\text{m/min}$, $f_z=0.17\text{mm}$.

3.3.2 Ověření řezné síly s uvažováním řezné rychlosti a polom. špičky

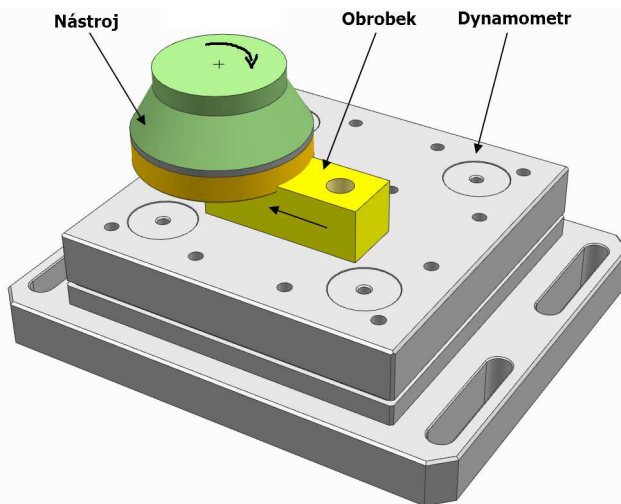
Tato část kapitoly se zabývá ověřením středních hodnot řezné síly za záběr pro 1 zub frézovacího nástroje vypočtených dle navrženého modelu s uvažováním vlivu zaoblené řezné hrany. Ověření bylo provedeno porovnáním vypočtených středních hodnot řezných sil s hodnotami experimentálně zjištěnými, které byly získány experimenty navrženými v této kapitole způsobem, aby se obrábělo buď jen zaoblenou částí břitu řezné hrany (Obr. 15a), nebo jak zaoblenou, tak rovnou částí břitu řezné hrany (Obr. 15bc). Hlavním úkolem bylo tedy ověřit vliv zaoblené části řezné hrany (vliv poloměru špičky) na přesnost výpočtu. Pro tento účel byly uvažovány dva modely – model bez uvažování vlivu zaoblené řezné hrany a model, který naopak tento vliv uvažuje.



Obr. 15: Plocha odřezávané vrstvy v maximálním úhlu záběru ($\varphi_{\max}=90^\circ$) při použití posuvu na zub 0.155 mm a pro axiální hloubky řezu: a) $a_p=1\text{mm}$, b) $a_p=2\text{mm}$, c) $a_p=3\text{mm}$.

Pro tento typ ověření matematického modelu byla vybrána ocel DIN C45. Jedná se o stejný materiál, jaký byl použit pro získání materiálových konstant. V tomto případě však byly ze stejného dílce vyrobeny vzorky jiného tvaru, a sice kvádry o velikosti 120x25x40, 120x35x40 a 120x45x40 mm (délka x šířka x výška), které byly uchyceny dvěma šrouby na dynamometru, viz Obr. 16.

Procentuální odchylka řezné síly experimentálně zjištěné a vypočtené (ΔF_c) se pro model bez uvažování zaoblené části řezné hrany pohybovala v rozsahu 0.9 až 28 % se střední odchylkou 13.3 % a v rozsahu -10.5 až 18.3 % se střední odchylkou 0.4 % pro model s uvažováním zaoblené i rovné části řezné hrany. Analýzou dat bylo dále zjištěno, že u modelu bez uvažování zaoblené části řezné hrany se v rozsahu procentuálních odchylek -5 až 5 % nachází 15 % všech měření a v rozsahu procentuálních odchylek -10 až 10 % se nachází 37 % všech měření. U modelu s uvažováním rovné i zaoblené části řezné hrany se v rozsahu procentuálních odchylek -5 až 5 % nachází 59 % všech měření a v rozsahu procentuálních odchylek -10 až 10 % se nachází 89 % všech měření. Na základě této analýzy lze konstatovat, že navržený matematický s uvažováním zaoblené části řezné hrany je přesnější.

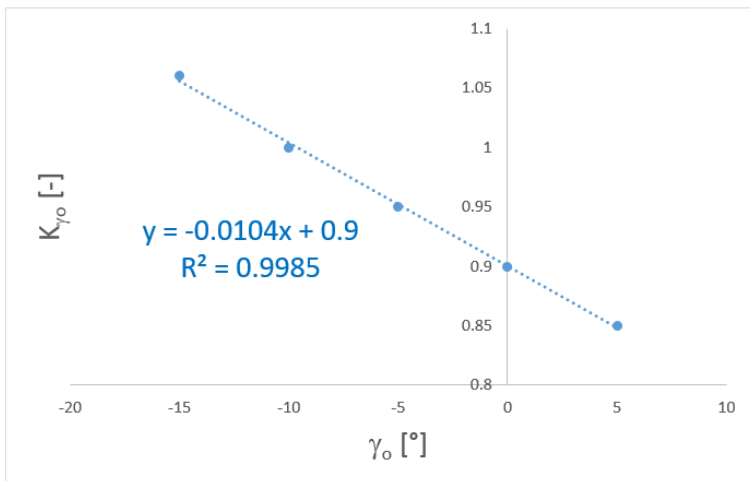


Obr. 16: Navržený obrobek o rozměru 120x45x40 mm upnutý na dynamometru Kistler 9255b.

3.4 Zobecnění navrženého modelu a jeho ověření

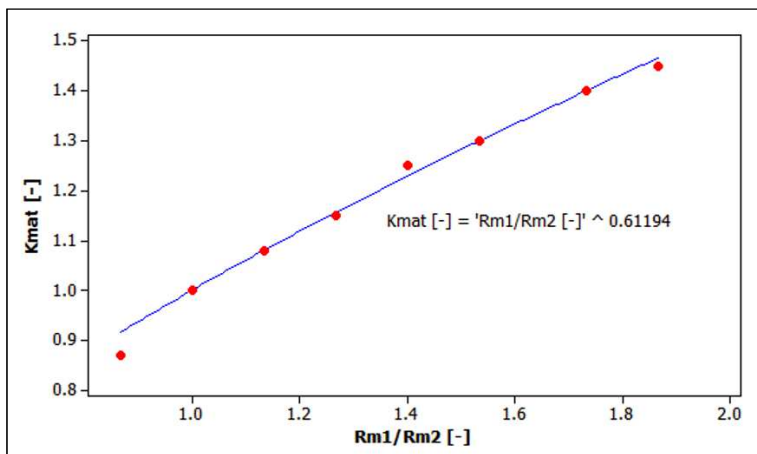
Nástrojový ortogonální úhel čela, dále jen úhel čela, patří mezi faktory, které mají z geometrických charakteristik řezného nástroje velmi podstatný vliv na velikost měrné řezné síly a tedy i velikost ostatních silových parametrů. Jeho vliv je spojen s primární plastickou deformací řezného procesu. Čím pozitivnější je hodnota úhlu čela, tím menší je oblast primární plastické deformace, a tím se snižuje měrná řezná síla. Pokud tedy chceme navržený matematický model aplikovat pro nástroje s jinou geometrií, než jaká byla u nástroje, kterým byly získány materiálové konstanty, je nutno uvažovat tzv. opravný koeficient úhlu čela. V referencích [15–17] jsou uvedeny vztahy opravného koeficientu úhlu čela, ze kterých plyne, že vzroste-li úhel čela o 1° vzhledem k úhlu čela nástroje, který byl použit pro získání materiálových konstant, poklesne měrná řezná síla o 1 až 1.5 % vzhledem k měrné řezné síle vypočtené pro úhel čela nástroje, který byl použit při experimentech pro získání materiálových konstant.

Prvním úkolem bylo nejprve experimentálně ověřit vliv úhlu čela na změnu měrné řezné síly, a to na oceli o mezi pevnosti v tahu 750 MPa. Z hodnot opravných koeficientů úhlů čela, které byly použity z reference [3], byla sestavena závislost opravného koeficientu úhlu čela na úhlu čela, viz Obr. 17, a byl zjištěn vliv úhlu čela. Ze vztahu vyplynulo, že vzroste-li úhel čela o 1° , poklesne měrná řezná síla o 1 %. Potvrdil se tedy vztah prezentovaný ve výše uvedených referencích a pro své účely jsem si upravil výpočet opravného koeficientu úhlu čela, který jsem následně implementoval do vztahu pro výpočet měrné řezné síly s vlivem řezné rychlosti.



Obr. 17: Závislost opravného koeficientu úhlu čela na úhlu čela.

Dále bylo přikročeno k zobecnění navrženého matematického modelu pro ocel o jiné mezi pevnosti. Reference [3, 30] zavádějí tzv. opravný koeficient materiálu obrobku, který přepočítává měrnou řeznou sílu pro ocel o různé mezi pevnosti v tahu. Ve vztahu je však mocninel, který má velké rozpětí (0.3 až 0.7). Proto bylo přistoupeno k získání tohoto mocnitele. Z hodnot opravných koeficientů materiálu obrobku, které byly použity z reference [3], byla sestrojena závislost opravného koeficientu materiálu obrobku na poměru mezi pevnosti v tahu, viz Obr. 18.



Obr. 18: Závislost opravného koeficientu materiálu obrobku na poměru mezi pevnosti v tahu.

Jak je vidět na předchozím obrázku, získané hodnoty opravných koeficientů materiálu obrobku (červené body) byly proloženy mocninnou regresí s indexem determinace 99.02 %. Ze získaného vztahu v mocninném tvaru vyplývá vliv meze pevnosti v tahu na změnu velikosti měrné řezné síly, který je dán hodnotou mocnitele, tedy hodnotou 0.612. Na základě použití vztahu opravného koeficientu materiálu se získanou hodnotou mocnitele můžeme například predikovat, že chceme-li použít pro predikci materiál o mezi pevnosti v tahu o 100 MPa větší než mez pevnosti v tahu materiálu, pro který byly zjištěny materiálové konstanty, můžeme očekávat měrnou řeznou sílu o cca 7 % větší. Analogicky můžeme odhadnout nárůst či pokles pro různé hodnoty meze v tahu.

Ve vlastním návrhu modelu byl pro svou úplnost již zobecněn model pro výpočet střední hodnoty řezné síly za otáčku pro N zubů v záběru (viz kapitola 3.1.7). Tento zobecněný model beroucí nyní v potaz i opravný koeficient úhlu čela bylo nutno ověřit experimentálními měřeními. Pro tyto účely byla frézována ocel s označením DIN C45 o tvrdosti 190 HB, a to dvěma nástroji s různou geometrií.

Nejprve byl ověřován model řezné síly za otáčku pro 1 zub v záběru s uvažováním opravného koeficientu úhlu čela. V tomto případě byly nástroje osazeny pouze jednou VBD. Z analýzy modelů bez uvažování a s uvažováním vlivu úhlu čela vyplynulo, že u nástroje A bychom se nedopustili výrazné chyby, kdybychom zanedbali vliv úhlu čela. U nástroje B byl vliv úhlu čela významný a v tomto případě bychom se dopustili chyby, pokud bychom tento vliv zanedbali.

Dále byl ověřován model řezné síly za otáčku pro N zubů v záběru s uvažováním opravného koeficientu úhlu čela. V tomto případě byly nástroje plně osazeny. Z analýzy modelů bez uvažování a s uvažováním vlivu úhlu čela vyplynulo, že u obou nástrojů bychom se dopustili chyby, pokud bychom s vlivem úhlu čela nepočítali.

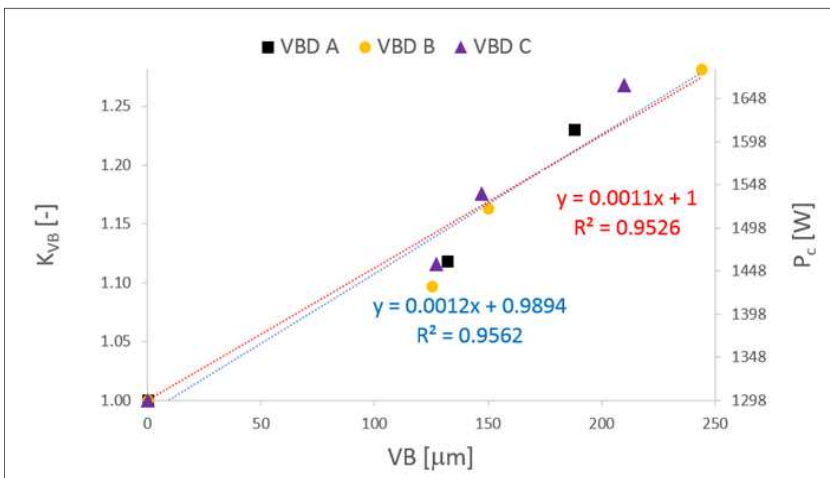
Na závěr této kapitoly je tedy nutno říci, že model byl úspěšně zobecněn a je aplikovatelný pro nástroje s různou geometrií (nejenom různými hodnotami poloměru špičky a úhlu nastavení jako byl model navržen v kapitole 4, ale i s různými hodnotami úhlu čela), tvarem VBD (kruhového a nekruhového tvaru) a různým počtem zubů v záběru.

3.5 Zpřesnění navrženého modelu o vliv opotřebení

Cílem této části bylo zpřesnění navrženého modelu o vliv opotřebení na hřbetě břitu řezného nástroje (VB). Tento vliv výrazně ovlivňující měrnou řeznou sílu je obvykle vyjádřen opravným koeficientem opotřebení (K_{VB}). Tento opravný koeficient bývá v referencích udáván jednou hodnotou nebo rozsahem hodnot pro opotřeбенý stav břitu řezného nástroje (například 1.3 nebo 1.3 až 1.5), nikoliv funkcí vyjadřující závislost opotřebení na měrné řezné

síle. Úkolem této kapitoly bylo tedy pro vybraný materiál sestavit závislost opravného koeficientu opotřebení na opotřebení na hřbetě pro přepočítání měrné řezné síly.

Pro splnění tohoto cíle byl zvolen jeden materiál obrobku, kterým byla ocel s označením DIN C45 a byl použit nástroj osazený jednou VBD. Co se týče VBD, byly použity tři VBD stejného označení s různým povlakem. Pro všechny tři VBD byly změřeny trvanlivosti a opotřebení na hřbetě břitů řezného nástroje a byl sestaven graf závislosti opotřebení hřbetu na čase obrábění. Při několika měřeních opotřebení byly zároveň změřeny proudy a napětí, ze kterých se vypočítal výkon, z jehož průběhu v čase se vyhodnotil řezný výkon. Na základě získaných hodnot řezných výkonů byly vypočteny opravné koeficienty opotřebení pro naměřené hodnoty opotřebení a byl sestaven graf závislosti opravného koeficientu opotřebení a řezného výkonu na opotřebení na hřbetě, viz Obr. 19. Pomocí lineární regrese byl získán matematický model opravného koeficientu opotřebení na opotřebení na hřbetě a tento získaný vztah byl pak následně zakomponován do rovnice pro výpočet měrné řezné síly. Hodnota opravného koeficientu opotřebení narůstá od hodnoty 1 (nová VBD) do hodnoty 1.27, kdy je VBD opotřebovaná. Vzrůst řezného výkonu byl tedy u opotřebované VBD o 27 %. Na závěr této kapitoly byla sestavena závislost měrné řezné síly na posuvu na zub pro tři hodnoty opotřebení na hřbetě, aby bylo vidět, jakým způsobem opotřebení ovlivňuje měrnou řeznou sílu.



Obr. 19: Závislost opravného koeficientu opotřebení na hřbetě břitů řezného nástroje K_{VB} (-) a řezného výkonu P_c (W) na opotřebení na hřbetě břitů řezného nástroje VB (μm).

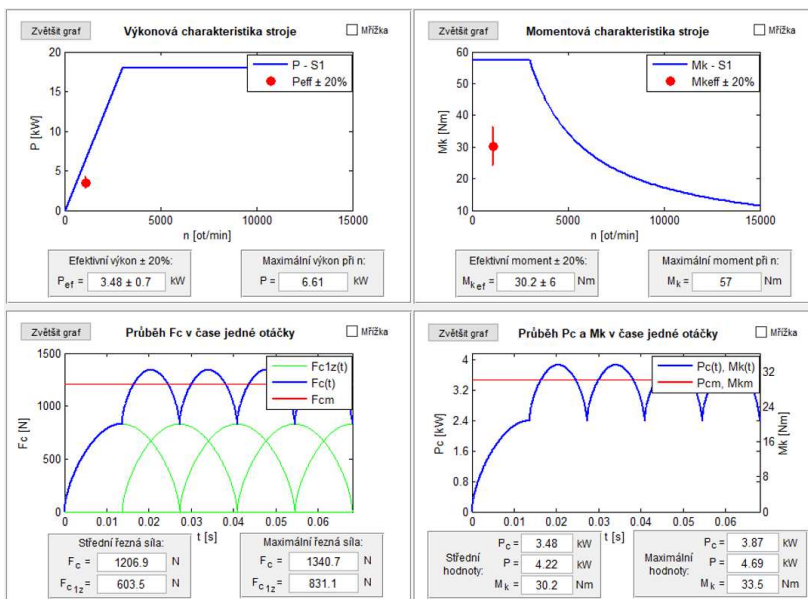
3.6 Návrh softwarové aplikace pro predikci silových parametrů a zatížení vřetene při frézování

3.6.1 Motivace pro návrh vlastní softwarové aplikace

Jak již bylo řečeno v cílech disertační práce, hlavním cílem této disertační práce je návrh a ověření matematického modelu pro predikci silových účinků a zatížení vřetene při frézování frézovacími hlavami a následné vytvoření softwarové aplikace na základě navrženého modelu, která pomůže technologům v praxi správně volit vhodné typy nástrojů, operací, strojů a rychle stanovovat hlavní parametry řezného procesu, a která bude oproti již existujícím softwarovým produktům přesnější a univerzálnější.

3.6.2 Návrh softwarové aplikace

Na základě navrženého a ověřeného matematického modelu a získaných materiálových konstant byla vytvořena softwarová aplikace pro predikci silových parametrů řezného procesu při čelním frézování frézovacími hlavami. Hlavní okno vytvořené softwarové aplikace je rozděleno do dvou částí. V první části na levé straně jsou zobrazeny vstupní parametry potřebné pro výpočet a v pravé části jsou výstupní parametry. Ty jsou zobrazeny na Obr. 20.



Obr. 20: Část hlavního okna navržené softwarové aplikace, kde jsou výstupní parametry.

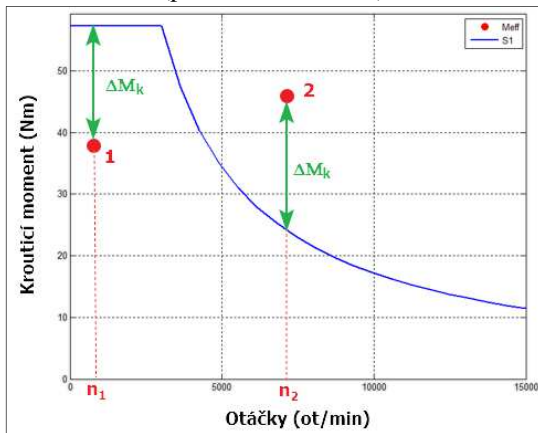
Mezi vstupní parametry navržené aplikace patří parametry: stroje, respektive sestavy stroje, nástroje, materiálu obrobku a řezných podmínek.

Mezi výstupní parametry patří aktuální, střední a maximální hodnoty řezné síly, řezného výkonu a krouticího momentu. Dále mezi výstupní parametry aplikace patří efektivní hodnoty výkonu a krouticího momentu, které jsou zobrazeny ve vykreslených charakteristikách zvoleného stroje společně s odchylkou $\pm 20\%$. Posledními výstupní parametry aplikace jsou maximální hodnoty výkonu a krouticího momentu při zvolených otáčkách. Tyto hodnoty jsou počítány pro aktuální režim (S1 nebo S6) a v případě režimu S6 je počítáno i zatížení vřetene (například: 50 % u frézování 1 břitem do plného materiálu, 25 % u frézování 1 břitem s poměrem $a_p/D=0.5$). Podmínkou je, že efektivní hodnota výkonu a krouticího momentu musí být menší než maximální hodnota výkonu a krouticího momentu při zvolených otáčkách.

3.6.3 Predikce zatížení vřetene

Pro možnost posouzení zatížení vřetene potřebujeme do momentové a výkonové charakteristiky vřetene stroje umístit vypočtené efektivní hodnoty krouticího momentu a výkonu. Tyto hodnoty jsou počítány na základě efektivní hodnoty řezné síly, jejíž vztah je uveden v kapitole 3.1.8. Jak již bylo uvedeno výše, charakteristiky vřetene stroje jsou společně s efektivními hodnotami součástí navržené softwarové aplikace.

Pro režim S1 (nepřerušovaný řez) uvádím pro názornost momentovou charakteristiku vřetene stroje MCFV 5050 LN s vykreslením dvou efektivních hodnot krouticích momentů (při otáčkách n_1 a n_2).



Obr. 21: Umístění dvou různých efektivních hodnot krouticích momentů do momentové charakteristiky vřetene stroje MCFV 5050 LN – Režim S1.

První efektivní hodnota krouticího momentu spadá do oblasti konstantního krouticího momentu (proměnného výkonu) a je pod křivkou momentové charakteristiky. V tomto případě můžeme zvýšit řezné podmínky, aniž by se zastavilo vřeteno stroje. Druhý bod je v oblasti proměnného krouticího

momentu (konstantního výkonu) a je nad křivkou momentové charakteristiky. V tomto případě musíme naopak snížit řezné podmínky (snížení otáček, popřípadě axiální hloubky řezu či posuvu na zub, popřípadě jejich kombinace), abychom se dostali s bodem pod křivku momentové charakteristiky, jinak by došlo k zastavení vřetene. Efektivní hodnota krouticího momentu (a výkonu) nesmí překročit maximální hodnotu krouticího momentu (a výkonu) při zvolených otáčkách.

3.6.4 V čem je navržená softwarová aplikace přesnější a univerzálnější

Navržená softwarová aplikace je přesnější, oproti běžně dostupným softwarovým aplikacím v:

- přesném určení materiálových konstant pro konkrétní materiály, a to pro EN AW 7075, Ti6Al4V, DIN C45,
- přesném určení střední hodnoty řezné síly pomocí integrace aktuální hodnoty řezné síly v mezích počátečního a koncového úhlu záběru,
- přesném určení aktuální hodnoty řezné síly dosazením aktuální hodnoty měrné řezné síly, na rozdíl například od některých aplikací, kde je výpočet aktuální hodnoty řezné síly dosazením střední hodnoty měrné řezné síly, což z matematického hlediska není korektní (viz odvození aktuální a střední hodnoty řezné síly),
- uvažování poloměru špičky u nekruhového tvaru VBD (čtvercové, trojúhelníkové),
- uvažování vlivu řezné rychlosti,
- uvažování ověřeného vztahu pro vliv úhlu čela u oceli,
- uvažování opravného koeficientu materiálu obrobku,
- uvažování vlivu opotřebení řezné hrany.

Další vlastní přidaná hodnota je navíc predikce zatížení vřetene výpočtem efektivních hodnot výkonů a krouticích momentů a maximálních hodnot výkonů a momentů při zvolených otáčkách pro konkrétní režim stroje s vypočteným stupněm zatížení vřetene. Díky této funkcionalitě můžeme z hlediska produktivity stroj plně vytižít.

Pokud jde o univerzálnost navržené softwarové aplikace, tato aplikace umožňuje, na rozdíl od různých zdarma dostupných aplikací, ukládat všechny položky a mít své vlastní databáze strojů, nástrojů a materiálů.

4 Závěry a diskuze

4.1 Shrnutí výsledků práce

Předložená disertační práce se zabývá predikcí silových parametrů řezného procesu při frézování frézovacími hlavami a návrhem softwarové aplikace pro predikci těchto vypočtených parametrů. Shrnutí výsledků je pro přehlednost rozděleno do jednotlivých částí podle stanovených dílčích cílů.

4.1.1 Vlastní návrh matematické modelu pro predikci silových parametrů řezného procesu

Jeden z hlavních cílů této disertační práce byl vlastní návrh matematického modelu pro predikci silových parametrů aplikovatelný pro různé strategie frézování, různé řezné podmínky a přenositelný pro nástroje s různou geometrií, tj. VBD kruhového a nekruhového tvaru (čtvercové, obdélníkové, trojúhelníkové), různé hodnoty poloměru špičky, úhlu nastavení hlavního ostří.

Na základě mnou provedené rešerše, kde byly shrnuty nejčastěji používané metodiky a přístupy, jsem zvolil metodiku založenou na výpočtu řezné síly prostřednictvím součinu měrné řezné síly a plochy odřezávané vrstvy, kde měrná řezná síla je v základním tvaru pouze funkcí tloušťky odřezávané vrstvy a plocha odřezávané vrstvy je součin tloušťky a šířky odřezávané vrstvy, které bývají počítány bez vlivu zaoblené řezné hrany.

Zpřesnění navrženého modelu v této fázi spočívá v přesnějším výpočtu měrné řezné síly, a to uvažováním vlivu řezné rychlosti a ve výpočtu samotné tloušťky odřezávané vrstvy, kde se uvažuje i vliv zaoblené řezné hrany. Dále zpřesnění spočívá v přesnějším výpočtu plochy odřezávané vrstvy, a to zpřesněním tloušťky a šířky odřezávané vrstvy, kde je v obou případech uvažován i vliv zaoblené řezné hrany.

Na základě výše uvedených zpřesnění byly odvozeny vztahy pro výpočet aktuální hodnoty řezné síly na 1 zub řezného nástroje i aktuální hodnota celkové řezné síly pro různý počet zubů řezného nástroje. Dále byl odvozen vztah pro výpočet střední hodnoty řezné síly za záběr pro 1 zub frézovacího nástroje, který byl základem pro výpočet střední hodnoty řezné síly za otáčku pro N zubů v záběru. Tato hodnota bývá používána pro výpočet střední hodnoty řezného výkonu, výkonu obráběcího stroje a krouticího momentu na vřeteni obráběcího stroje. Vypočtená hodnota řezného výkonu ze střední hodnoty řezné síly za otáčku pro N zubů v záběru je také důležitá pro výpočet energetické náročnosti řezného procesu.

Pro predikci zatížení vřetene, kdy je zapotřebí vykreslit do momentové a výkonové charakteristiky vřetene stroje efektivní hodnotu krouticího momentu a výkonu, byla zavedena efektivní hodnota řezné síly, na jejímž základě se tyto hodnoty vypočítají. Výchozím parametrem pro výpočet efektivní hodnoty

řezné síly je odvozená rovnice pro výpočet střední hodnoty řezné síly za záběr pro 1 zub frézovacího nástroje společně s koeficientem K , kterým se rozlišuje režim zatížení S1 a S6, a to na základě úhlu mezi břity nástroje a úhlu záběru.

4.1.2 Získání materiálových konstant pro navržený model

Dalším dílčím cílem bylo získat pro navržený matematický model měrné řezné síly materiálové konstanty. Pro splnění tohoto cíle byly zvoleny tři typy materiálů – ocel DIN C45 a materiály používané často v leteckém a automobilovém průmyslu: hliníková slitina EN AW 7075, titanová slitina Ti6Al4V.

Plánování experimentů proběhlo na základě centrálního kompozitního plánu, a to pro tři faktory (axiální hloubka řezu, posuv na zub, řezná rychlost) se čtyřmi středovými body, což odpovídalo 18ti experimentům pro 1 materiál s tím, že každý experiment měl 3 opakování. Pro naplánované experimenty byla navržena metodika frézování nástrojem osazeným jednou VBD, a to bez vlivu zaoblené řezné hrany, aby byl materiál obráběn pouze rovnou řeznou hranou, což vedlo k relativně přesnému stanovení měrné řezné síly podílem vyhodnocené střední hodnoty řezné síly a plochy odřezávané vrstvy, která byla díky této navržené metodice snadno spočítatelná. Pro tuto navrženou metodiku frézování byl vyroben přípravek pro upnutí obráběného materiálu, který byl upnut na dynamometru, a který zajišťoval dobrou manipulaci s obrobkem po každém měření.

Vyhodnocení středních hodnot řezných sil pro realizované experimenty probíhalo v mnou vytvořené softwarové aplikaci naprogramované v softwaru Matlab, a to na základě výpočtového algoritmu, který je popsán ve vlastním řešení disertační práce v kapitole o získání materiálových konstant.

Před samotným získáním materiálových konstant byla nejprve provedena u každého materiálu analýza rozptylu pro ověření vlivu hlavních faktorů (b_D , h_{D_m} , v_c) na změnu velikosti měrné řezné síly. Důraz byl kladen především na statistickou významnost řezné rychlosti a šířky odřezávané vrstvy. U tloušťky odřezávané vrstvy se statistická významnost očekávala. Pro tyto účely byly z centrálního plánu experimentů použity faktoriální body. Na základě analýzy rozptylu pro konkrétní materiál byla dle p-hodnoty určena statistická významnost jednotlivých faktorů pro zvolenou hodnotu hladiny významnosti, která byla na základě zkušeností z předchozích let zvolena s hodnotou $\alpha=0.01$. Faktory, jejichž p-hodnota byla větší než tato zvolená hladina významnosti, byly považovány za statisticky nevýznamné. Z analýzy rozptylu se u všech tří zkoumaných materiálů prokázala střední tloušťka odřezávané vrstvy (h_{D_m}) jako statisticky nejvýznamnější faktor. Dále se u všech tří materiálů prokázala řezná rychlost (v_c) jako druhý statisticky nejvýznamnější faktor. Co se týče šířky odřezávané vrstvy (b_D), prokázala se u všech tří materiálů jako statisticky

nevýznamný faktor, jak se očekávalo. Původně navržený model měrné řezné síly s vlivem tloušťky odřezávané vrstvy a řezné rychlosti se tedy u všech tří materiálů prokázal jako relevantní a byl tedy následně použit pro získání materiálových konstant.

Po statistické analýze vlivu jednotlivých faktorů na velikost měrné řezné síly následovalo zjištění materiálových konstant pro všechny tři zkoumané materiály. To bylo provedeno v softwaru Minitab. Vyhodnoceny byly pro každý materiál tři materiálové konstanty: $k_{c_{1,1}}$ (měrná řezná síla pro plochu odřezávané vrstvy 1 mm²), m_c (konstanta určující vliv tloušťky odřezávané vrstvy na změnu měrné řezné síly, m_{v_c} (konstanta určující vliv řezné rychlosti na změnu měrné řezné síly).

Po zjištění výše uvedených materiálových konstant jsem provedl výpočty měrných řezných sil a stanovil indexy determinace (R^2) a upravené indexy determinace (R^2 Adj) pro všechny tři materiály. Oba tyto indexy byly pro všechny tři zkoumané materiály vysoké (R^2 , R^2 Adj > 94 %), a tak lze matematický model pro výpočet měrné řezné síly s uvedenými materiálovými konstantami považovat za funkční.

4.1.3 Ověření navrženého matematického modelu

Dalším stanoveným cílem této disertační práce bylo ověření navrženého matematického modelu pro výpočet střední hodnoty řezné síly za záběr pro 1 zub frézovacího nástroje, která je základem pro výpočet střední hodnoty řezné síly za otáčku pro N zubů v záběru i pro výpočet efektivní hodnoty řezné síly. Ověření bylo provedeno porovnáním hodnot řezných sil vypočtených pomocí navrženého modelu s hodnotami experimentálně zjištěnými.

Nejprve bylo přikročeno k ověření středních a aktuálních hodnot řezných sil vypočtených na základě navrženého modelu, a to jejich porovnáním s experimentálně zjištěnými hodnotami, ze kterých se vycházelo při získávání materiálových konstant. Šlo tedy o model bez uvažování poloměru špičky. Hlavním úkolem této části bylo ověřit vliv řezné rychlosti při výpočtu střední hodnoty řezné síly. Pro tento účel byly uvažovány dva modely – model bez vlivu řezné rychlosti a model s vlivem řezné rychlosti. Tato ověření byla aplikována pro všechny tři materiály z kapitoly 5, u kterých byly zjištěny materiálové konstanty, tedy pro hliníkovou slitinu EN AW 7075, titanovou slitinu Ti6Al4V a ocel DIN C45. Analýza dat potvrdila u všech tří zkoumaných materiálů, že navržený matematický model střední hodnoty řezné síly s uvažováním řezné rychlosti byl přesnější a měl daleko menší rozpětí procentuální odchylky. Co se týče ověření aktuálních hodnot řezných sil, to bylo provedeno porovnáním průběhů řezných sil vypočtených s experimentálně získanými průběhy. Porovnání průběhů řezných sil v čase je pro všechny tři materiály v přílohách č. 6 až 8. Na základě těchto porovnání

mohu konstatovat, že průběhy vytvořené na základě navrženého matematického modelu mají pro všechny tři zkoumané materiály dobrou shodu s experimentálně získanými průběhy a lze tedy predikci průběhů řezných sil považovat za úspěšně ověřenou.

Dále bylo přikročeno k ověření středních hodnot řezných sil na 1 zub frézovacího nástroje vypočtených dle navrženého modelu s uvažováním vlivu poloměru špičky. Ověření bylo provedeno porovnáním vypočtených středních hodnot řezných sil s hodnotami experimentálně zjištěnými, které byly získány nově navrženými experimenty způsobem, aby se obrábělo buď jen zaoblenou částí břitu řezné hrany, nebo jak zaoblenou, tak rovnou částí břitu řezné hrany. Hlavním úkolem této části tedy bylo ověřit vliv poloměru špičky na přesnost výpočtu. Pro tento účel byly uvažovány dva modely – model bez uvažování vlivu zaoblené řezné hrany a model, který naopak tento vliv uvažuje. Pro tento typ ověření matematického modelu byla vybrána ocel DIN C45. Jedná se o stejný materiál, jaký byl použit pro získání materiálových konstant. V tomto případě však byly ze stejného polotovaru vyrobeny vzorky jiného tvaru. Měření probíhala na stejném stroji a s použitím stejného nástroje jako u experimentů při frézování oceli DIN C45 při získávání materiálových konstant (viz kapitola 5). Rozdíl byl však v tom, že v tomto případě se obrábělo zaoblenou i rovnou částí břitu řezné hrany. Analýzou dat bylo zjištěno, že u modelu bez uvažování zaoblené části řezné hrany se v rozsahu procentuálních odchylek -5 až 5 % nachází 15 % všech měření a v rozsahu procentuálních odchylek -10 až 10 % se nachází 37 % všech měření. U modelu s uvažováním rovné i zaoblené části řezné hrany se v rozsahu procentuálních odchylek -5 až 5 % nachází 59 % všech měření a v rozsahu procentuálních odchylek -10 až 10 % se nachází 89 % všech měření. Na základě této analýzy lze konstatovat, že navržený matematický s uvažováním zaoblené části řezné hrany je přesnější.

4.1.4 Zobecnění navrženého modelu s následným ověřením

Dalším dílčím cílem této disertační práce bylo zobecnění navrženého modelu a následné ověření takto zobecněného modelu.

Nejprve byl model zobecněn tak, aby byl aplikovatelný pro nástroje s různou geometrií. Navržený matematický model je použitelný i bez zobecnění pro nástroje s různou geometrií (VBD kruhového i nekruhového tvaru, různé hodnoty úhlu nastavení hlavního ostří, různé hodnoty poloměru špičky), avšak toto zobecnění modelu spočívalo v implementaci vlivu úhlu čela, který má z geometrických charakteristik významný vliv na změnu měrné řezné síly. Nejprve byl tedy u oceli o mezi pevnosti v tahu 750 MPa ověřen vliv úhlu čela na změnu měrné řezné síly z experimentálně získaných hodnot opravných koeficientů úhlu čela získaných pro jednotlivé úhly čela. Z těchto hodnot byla sestavena závislost opravného koeficientu úhlu čela na úhlu čela

a lineární regresí byl získán vztah, ze kterého vyplynulo, že změní-li se úhel čela o 1° , změní se opravný koeficient úhlu čela, potažmo měrná řezná síla, o 1 %. Tento vztah opravného koeficientu byl následně implementován do vztahu pro výpočet měrné řezné síly.

Dalším zobecněním navrženého matematického modelu bylo kvůli jeho aplikaci pro ocel o různé mezi pevnosti v tahu. Pro tyto účely se zavádí tzv. opravný koeficient materiálu obrobku, který přepočítává měrnou řeznou sílu pro ocel o různé mezi pevnosti v tahu. Jelikož je v tomto vztahu mocninel, který má velké rozpětí, bylo přistoupeno k jeho získání. Z experimentálně získaných hodnot opravných koeficientů materiálu obrobku byla sestrojena závislost opravného koeficientu materiálu obrobku na poměru mezi pevnosti v tahu. Získané hodnoty opravných koeficientů materiálu obrobku byly proloženy mocninou regresí a byla získána hodnota mocnitele, tj. 0.612. Na základě použití vztahu opravného koeficientu materiálu obrobku se získanou hodnotou mocnitele můžeme například predikovat, že chceme-li například použít pro predikci materiál o mezi pevnosti v tahu o 100 MPa větší než mez pevnosti v tahu materiálu, pro který byly zjištěny materiálové konstanty, můžeme očekávat měrnou řeznou sílu (potažmo řeznou sílu) o cca 7 % větší.

Následně bylo nutné ověřit takto zobecněný model. Pro tyto účely byly provedeny 2 typy ověření. Pro tyto účely byla frézována ocel s označením C45 o tvrdosti 190 ± 10 HB, a to dvěma nástroji s různou geometrií.

Po navržení zobecněného modelu bylo nutno tento model ověřit. Pro tento účel byly vybrány 2 nástroje. Nejprve byl ověřován model řezné síly za otáčku pro 1 zub v záběru s uvažováním opravného koeficientu úhlu čela. V tomto případě byly nástroje osazeny pouze jednou vyměnitelnou břitovou destičkou a byly měřeny síly pomocí stacionárního dynamometru. Porovnány byly střední hodnoty řezných sil experimentálně zjištěných s hodnotami vypočtenými, a to na základě dvou modelů – modelu bez uvažování úhlu čela a modelu s vlivem úhlu čela, tedy zobecněného modelu. Z analýzy těchto dvou modelů vyplynulo, že u nástroje A bychom se nedopustili výrazné chyby, kdybychom zanedbali vliv úhlu čela. U nástroje B byl vliv úhlu čela významný a v tomto případě bychom se dopustili chyby, pokud bychom tento vliv zanedbali.

Dále byl ověřován model řezné síly za otáčku pro N zubů v záběru s uvažováním opravného koeficientu úhlu čela. V tomto případě byly oba nástroje plně osazeny. V tomto případě byly měřeny výkony a porovnány byly střední hodnoty řezných výkonů, a to experimentálně zjištěných a vypočtených ze střední hodnoty řezné síly za otáčku pro N zubů v záběru. Stejně jako v předchozím případě, byly i v tomto případě uvažovány dva modely – model bez uvažování úhlu čela a model s vlivem úhlu čela. Z analýzy modelů bez uvažování a s uvažováním vlivu úhlu čela vyplynulo, že u obou nástrojů bychom se dopustili chyby, pokud bychom s vlivem úhlu čela nepočítali.

4.1.5 Zpřesnění navrženého modelu o vliv opotřebení

Dalším krokem této disertační práce bylo zpřesnění navrženého modelu o vliv opotřebení na hřbetě břitu řezného nástroje. Úvodem je nutné říci, že materiálové konstanty pro výpočet měrné řezné síly jsou získávány při použití nové neopotřebené VBD. Čím více se však břit VBD opotřebovává, tím více roste měrná řezná síla.

Pro potvrzení této hypotézy jsem zvolil pouze jeden materiál, kterým byla ocel DIN C45 s naměřenou tvrdostí 200 HB a byl použit nástroj osazený jednou VBD. Co se týče VBD, byly použity tři VBD stejného označení s různým povlakem. Pro všechny tři VBD byly změřeny trvanlivosti a opotřebení na hřbetě břitu řezného nástroje a byl sestrojen graf závislosti opotřebení hřbetu na čase obrábění.

Při několika měřeních opotřebení byly zároveň změřeny i výkony, ze kterých byly následně vyhodnoceny řezné výkony. Na základě vyhodnocených řezných výkonů byly vypočteny opravné koeficienty opotřebení pro naměřené hodnoty opotřebení a byl sestrojen graf závislosti opravného koeficientu opotřebení a řezného výkonu na opotřebení na hřbetě VB (μm). Pomocí lineární regrese byl stanoven matematický model opravného koeficientu opotřebení na opotřebení na hřbetě a tento byl pak následně zakomponován do vztahu pro výpočet měrné řezné síly. Hodnota opravného koeficientu opotřebení narůstá od hodnoty 1 (nová VBD) do hodnoty 1.27, kdy je VBD opotřebená, což předpokládanou hypotézu potvrzuje. Vzrůst řezného výkonu byl tedy u opotřebené VBD o 27 %.

4.1.6 Vytvoření softwarové aplikace pro predikci silových parametrů a zatížení vřetene

Posledním částí této práce bylo na základě navrženého modelu vytvořit softwarovou aplikaci, která by pomohla technologům v praxi volit vhodné typy nástrojů, operací, strojů a rychle stanovovat hlavní parametry řezného procesu, a která by byla oproti již existujícím softwarovým produktům přesnější a univerzálnější.

Navržená softwarová aplikace je přesnější, oproti běžným zdarma dostupným softwarovým aplikacím v:

- přesném určení materiálových konstant pro konkrétní materiály, a to pro EN AW 7075, Ti6Al4V, DIN C45,
- přesném určení střední hodnoty řezné síly pomocí integrace aktuální hodnoty řezné síly v mezích počátečního a koncového úhlu záběru,
- přesném určení aktuální hodnoty řezné síly dosazením aktuální hodnoty měrné řezné síly, na rozdíl například od některých aplikací, kde je výpočet aktuální hodnoty řezné síly dosazením střední hodnoty měrné

řezné síly, což z matematického hlediska není korektní (viz odvození aktuální a střední hodnoty řezné síly),

- uvažování poloměru špičky u nekruhového tvaru VBD (čtvercové, trojúhelníkové),
- uvažování vlivu řezné rychlosti,
- uvažování ověřeného vztahu pro vliv úhlu čela u oceli,
- uvažování opravného koeficientu materiálu obrobku,
- uvažování vlivu opotřeбенí řezné hrany.

Další vlastní přidaná hodnota je navíc predikce zatížení vřetene výpočtem efektivních hodnot výkonů a krouticích momentů a maximálních hodnot výkonů a momentů při zvolených otáčkách pro konkrétní režim stroje s vypočteným stupněm zatížení vřetene. Díky této funkcionalitě můžeme z hlediska produktivity stroj plně vytížit.

Pokud jde o univerzálnost navržené softwarové aplikace, tato aplikace umožňuje, na rozdíl od různých běžně dostupných aplikací, ukládat všechny položky a mít své vlastní databáze strojů, nástrojů a materiálů.

4.2 Splnění cílů disertační práce

Výsledky disertační práce naplnily všechny zadané cíle, stanovené na základě poznatků a zkušeností získaných během výzkumu dané problematiky, a lze je shrnout do následujících bodů.

1. Byl navržen matematický model pro predikci aktuálních a středních hodnot řezné síly, pomocí kterého lze vypočítat i další silové parametry, jako je řezný výkon, příkon obráběcího stroje, krouticí moment. Navržený model byl oproti modelům uvedeným v rešeršní části zpřesněn o vliv řezné rychlosti a uvažování zaoblené řezné hrany. Tento model je aplikovatelný pro VBD kruhového i nekruhového tvaru. U VBD nekruhového tvaru bere model v potaz obrábění buď pouze zaoblenou řeznou hranou, nebo zaoblenou i rovnou řeznou hranou. Tento model byl následně zobecněn způsobem, aby byla vypočtena střední hodnota řezné síly za otáčku pro N zubů v záběru. Dále byl pro možnost predikce zatížení vřetene sestaven model pro výpočet efektivní hodnoty řezné síly, pomocí níž se následně vypočte efektivní hodnota krouticího momentu a výkonu.
2. Pro navržený model byly experimentálně zjištěny materiálové konstanty pro tři vybrané materiály – hliníkovou slitinu EN AW 7075, titanovou slitinu Ti6Al4V a nelegovanou ocel DIN C45. Pro tento účel byla navržena metodika, aby byl materiál frézován pouze rovnou řeznou hranou, a to kvůli přesnému stanovení měrné řezné síly a následnému zjištění materiálových konstant. Aby se toho docílilo, byl navrhnut a vyroben přípravek pro snadné manipulování s obrobkem po každém měření. Zjištěné materiálové konstanty jsou aplikovatelné pro různé typy frézovacích nástrojů (čelní válcová fréza, kotoučová fréza, ježková fréza).

3. Pro možnost posouzení shody navrženého modelu s experimentálními hodnotami byl model ověřen. Výsledkem ověření je, že model s uvažováním vlivu řezné rychlosti a vlivu zaoblení řezné hrany predikuje přesnější hodnoty.
4. Navržený matematický model byl zobecněn o uvažování vlivu úhlu čela, který má z geometrických charakteristik nemalý vliv na měrnou řeznou sílu. Dále byl matematický model zobecněn o uvažování vlivu meze pevnosti v tahu, který charakterizuje mechanické vlastnosti materiálu. Zobecněný matematický model střední hodnoty řezné síly za otáčku pro N zubů v záběru s uvažováním vlivu úhlu čela byl ověřen experimentálními měřeními.
5. Navržený matematický model byl zpřesněn o vliv opotřebení na hřbetě břitu řezného nástroje. Pro materiál DIN C45 byla sestrojena lineární závislost opravného koeficientu opotřebení na opotřebení na hřbetě a získaný vztah byl následně implementován do navrženého matematického modelu.
6. V programu Matlab byla vytvořena softwarová aplikace pro predikci silových parametrů a zatížení vřetene při frézování frézovacími hlavami, která je oproti jiným zdarma dostupným softwarovým aplikacím přesnější a univerzálnější.

4.3 Teoretický přínos disertační práce

Teoretické přínosy této disertační práce lze shrnout do následujících bodů:

- vytvoření nového funkčního matematického modelu pro predikci aktuálních, středních a maximálních hodnot silových parametrů (řezné síly, řezného výkonu, výkonu stroje a krouticího momentu) při frézování frézovacími hlavami pro různé strategie frézování s vlivem řezné rychlosti a pro VBD kruhového i nekruhového tvaru s tím, že u VBD nekruhového tvaru se uvažuje vliv poloměru špičky,
- vytvoření nové metodiky pro získání materiálových konstant při frézování,
- zpřesnění navrženého modelu o vliv opotřebení na hřbetě břitu řezného nástroje,
- vytvoření zobecněného modelu s uvažováním vlivu nástrojového ortogonálního úhlu čela a meze pevnosti v tahu,
- vytvoření softwarové aplikace, která umí predikovat nejenom silové parametry, ale i zatížení vřetene pro konkrétní režim zatížení.

4.4 Přínos disertační práce pro praxi

Pro predikci silových parametrů řezného procesu při frézování byl navržený zobecněný matematický model implementován do vytvořené

softwarové aplikace, která by měla technologům v praxi pomoci volit vhodné typy nástrojů, operací, strojů a rychle stanovovat hlavní parametry řezného procesu.

Pomocí navržené metodiky určování materiálových konstant a navrženého plánu experimentů lze jednoduše pomocí softwaru Minitab získat materiálové konstanty pro libovolný materiál, které lze pak následně implementovat do vytvořené softwarové aplikace a predikovat tak silové parametry pro dílce z materiálů, které se v dané společnosti často obrábí.

K použití navržené softwarové aplikace není nutná speciální znalost výpočtu silových parametrů, a tak je aplikace v praxi snadno použitelná i lidmi se středoškolským vzděláním.

Díky navržené predikci zatížení vřetene se s pomocí softwarové aplikace mohou z hlediska maximální produktivity navrhnout řezné podmínky tak, abychom stroj plně vytížili. Díky střední hodnotě řezného výkonu lze navíc sledovat i energetickou náročnost řezného procesu, která je důležitým parametrem pro hodnocení řezného procesu z ekonomického hlediska.

4.5 Doporučení dalšího výzkumu studované problematiky

Výzkum problematiky silových účinků při frézování není k dnešnímu dni uzavřen.

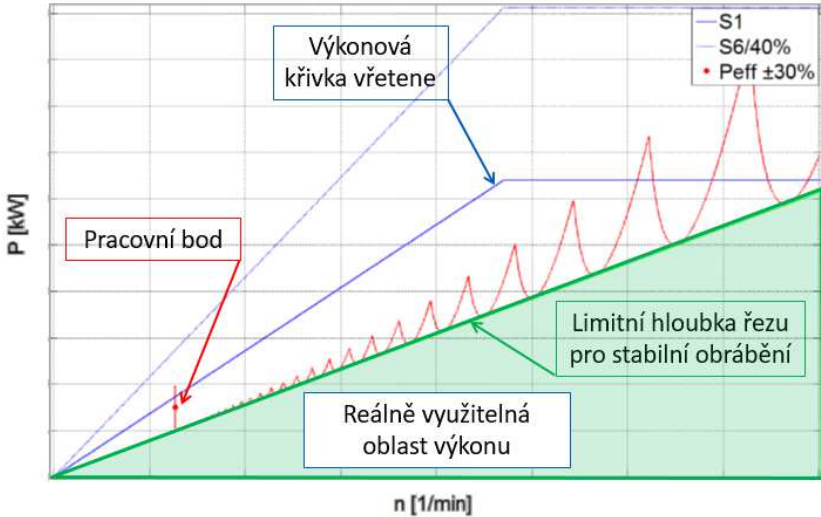
Další výzkum je možné směřovat na návrh matematického modelu při použití jiných frézovacích nástrojů, jako například kotoučové frézy, ježkové frézy, čelní válcové frézy, ověření vypočtených hodnot pomocí navrženého modelu na základě experimentálních měření a následnou implementaci matematického modelu pro jednotlivé nástroje do již vytvořené softwarové aplikace.

V této práci byla mimo jiné řešena i problematika vlivu opotřebení na hřbetě břitu řezného nástroje na měrnou řeznou sílu u frézování oceli DIN C45 a na základě experimentálních dat byl sestaven matematický model opravného koeficientu opotřebení pro přepočet měrné řezné síly. Další výzkum může být směřován na návrh opravného koeficientu opotřebení také pro jiné materiály.

V této práci byla také řešena i problematika vlivu meze pevnosti v tahu na měrnou řeznou sílu u frézování oceli DIN C45 a na základě experimentálních dat byl sestaven matematický model opravného koeficientu materiálu obrobku pro přepočet měrné řezné síly. Další výzkum může být směřován na návrh opravného koeficientu materiálu obrobku také pro jiné materiály.

Jako další vývoj softwarové aplikace se jeví implementace dynamických vlastností soustavy stroj-nástroj, a to určením reálně využitelné oblasti výkonu (krouticího momentu) limitní hloubkou řezu pro stabilní obrábění, viz Obr. 22. Efektivní výkon (krouticí moment) může být totiž v oblasti pod křivkou výkonové (momentové) charakteristiky vřetene stroje pro daný režim zatížení,

avšak může být nad oblastí, kdy už obrábění nebude stabilní, jak je vidět na níže uvedeném obrázku.



Obr. 22: Výkonová charakteristika vřetene stroje s umístěním efektivního výkonu (Pracovní bod) a s oblastí výkonu ohraničenou limitní hloubkou řezu pro stabilní obrábění.

Pro vyhodnocení stability obrábění je třeba znát frekvenční přenosové funkce (FRF) soustavy stroj - nástroj. FRF této soustavy lze získat experimentálně. Pro implementaci do tohoto softwaru se jeví vhodné použití kombinace experimentálně určených FRF na stroji a FRF vypočtených pomocí modelu nástroje z MKP.

Seznam použité literatury v tezích

- [1] BRYCHTA, Jan, Robert ČEP a Marek SADÍLEK. *Nové směry v progresivním obrábění*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2007. ISBN 978-80-248-1505-3.
- [2] ČSN ISO 3002-4. *Rezné nástroje. Základné veličiny pri rezaní a brúsení. Část 4: Sily, práca a výkon*. Nové Zámky: Český normalizační institut. 1994.
- [3] MÁDL, Jan. *Teorie obrábění*. Praha: ČVUT v Praze, Fakulta strojní, 1989. ISBN neuvedeno.
- [4] VOSTŘEL, Josef. *Technologické, ekonomické a ekologické aspekty obrábění za sucha*. Brno, 2009. Diplomová práce. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Miroslav Píška, CSc.
- [5] MÁDL, Jan. *Experimentální metody v teorii obrábění*. Praha: ČVUT v Praze, Fakulta strojní, 1988.
- [6] MÁDL, Jan a Vilém SCHUBERT. *Základy experimentálních metod a optimalizace v teorii obrábění*. Praha: ČVUT v Praze, Fakulta strojní, 1978.
- [7] VANUŠ, Jan, Roman HRBÁČ a Tomáš MLČÁK. *Elektrotechnika - Teorie*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2013. ISBN 978-80-248-3049-0.
- [8] UHLÍŘ, Ivan. *Elektrotechnika*. Praha: ČVUT v Praze, Fakulta strojní, 1992. ISBN 80-01-00882-7.
- [9] ČEP, Robert a Jana PETRŮ. *Experimentální metody v obrábění – učební texty*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2011.
- [10] NESLUŠAN, Miroslav, Stanislav TUREK, Jozef BRYCHTA, Robert ČEP a Marián TABAČEK. *Experimentálne metódy v trieskovom obrábaní*. Žilina: Žilinská univerzita v Žiline 2007, 2007. ISBN 978-80-8070-711-8.
- [11] KUBEČEK, Pavel. *Vývoj a verifikace části aplikace pro určování silového zatížení stroje při obrábění*. Praha, 2013. Diplomová práce. ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav výrobních strojů a zařízení. Vedoucí diplomové práce: Ing. Pavel Zeman, Ph.D.
- [12] ČSN EN 60034-1 ed. 2. *Točivé elektrické stroje - Část 1: jmenovité údaje a vlastnosti*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví (ÚNMZ). 2011.
- [13] KOPÁČEK, Jiří. *Matematická analýza nejen pro fyziky (I)*. Praha: Vydavatelství Matematicko-fyzikální fakulty Univerzity Karlovy v Praze, 2004. ISBN 80-86732-25-8.

- [14] KOLÁŘ, Petr. *Elektronická učebnice matematických metod fyziky* [online]. Praha: Matematicko-fyzikální fakulta Univerzity Karlovy, Katedra didaktiky fyziky, 2016. Dostupné z: https://kdf.mff.cuni.cz/vyuka/matematicke_metody/Ucebnice_2.pdf
- [15] DEGNER, Werner, Hans LUTZE a Erhard SMEJKAL. *Spanende Formung: Theorie, Berechnung, Richtwerte*. 17. vyd. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2015. ISBN 978-3-446-44544-4.
- [16] TSCHATSCH, Heinz. *Applied Machining Technology*. Berlín, Německo: Springer, 2009. ISBN 978-3-642-01006-4.
- [17] GAZDA, Jaromír. *Teorie obrábění. Řezné síly při obrábění*. Liberec: VŠST Liberec, 1993. ISBN 80-7083-110-3.

Seznam autorových publikací

Článek v periodiku (2):

- [18] KOVALČÍK, J., ZEMAN, P., HOLEŠOVSKÝ, F., MÁDL, J., KUČEROVÁ, L. *Cutting force modelling with effects of cutting tool geometry and tool wear in milling of DIN C45 steel*. MM Science Journal. March 2019. ISSN 1805-0476. DOI: 10.17973/MMSJ.2020_03_2019124. (SCOPUS)
- [19] ZEMAN, P., KOVALČÍK, J., VRABEC, M. *Principles of Cutting Process Modelling and New Algorithm Proposal*. Manufacturing Technology: Journal for Science, Research and Production. 2014, vol. 14(4), s. 658-664. ISSN 1213-2489. (SCOPUS)

Stat' ve sborníku (2):

- [20] KOVALČÍK, J., VRABEC, M., ZEMAN, P. *Software application proposal for predictability of cutting force effects based on a specific cutting force*. STČ 2014, Sborník konference. Duben 2014, ČVUT v Praze. ISBN 978-80-01-05484-0.
- [21] KOVALČÍK, J., VRABEC, M., ZEMAN, P. *Cutting force effects modelling for milling technology and spindle load prediction*. STČ 2015, Sborník konference. Duben 2015, ČVUT v Praze. ISBN 978-80-01-05727-8.

Výzkumná zpráva (26):

- [22] BRAJER, J., KOVALČÍK, J., MÁČA, O., MALÝ, J., MAŠEK, P., ZEMAN, P. *Problematika obrábění těžkoobrobitelných, kompozitních, případně dalších materiálů a návrh způsobu hodnocení produktivity a hospodárnosti obrábění*. Praha, 2012. Výzkumná zpráva č. V-12-037. ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav výrobních strojů a zařízení.

- [23] KOVALČÍK, J. ZEMAN, P. *Vývoj software pro podporu návrhu technologie obrábění a jejího hodnocení – část 1*. Praha, 2013. Výzkumná zpráva č. V-13-048. ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav výrobních strojů a zařízení.
- [24] KOVALČÍK, J. HOLKUP, T., VYROUBAL, J., SMOLÍK, J. *Ecodesign OS - predikce obráběcích sil a výkonů*. Praha, 2013. Výzkumná zpráva č. V-13-049. ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav výrobních strojů a zařízení.
- [25] KOVALČÍK, J. ZEMAN, P. *Vývoj software pro podporu návrhu technologie obrábění a jejího hodnocení – část 2*. Praha, 2014. Výzkumná zpráva č. V-14-048. ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav výrobních strojů a zařízení.
- [26] KOVALČÍK, J. ZEMAN, P. *Software pro modelování silových účinků při obrábění – část 1*. Praha, 2014. Výzkumná zpráva č. V-14-049. ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav výrobních strojů a zařízení.
- [27] ZEMAN, P., KOVALČÍK, J., KULÍŠEK, V., MALÝ, J. *Software User's Manual for Software application to calculate torque and cutting force in milling and technical training in dynamometer application*. Praha, 2014. Výzkumná zpráva č. VZP-14-SMV15-KISTLER. ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav výrobních strojů a zařízení.
- [28] SOBOLA, J., KUPKA, P., JONÁŠ, R., SULITKA, M., ZAVÁZAL, T., LYSÁK, P., ZEMAN, P., KOVALČÍK, J. *Zpráva o řešení projektu Integrace, stavebnicovost a rekonfigurovatelnost strojů konsorcia TOS NOVA v roce 2014*. Praha, 2014. Výzkumná zpráva č. V-14-067. ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav výrobních strojů a zařízení.
- [29] KOVALČÍK, J. ZEMAN, P. *Vývoj software pro podporu návrhu technologie obrábění a jejího hodnocení – část 3*. Praha, 2015. Výzkumná zpráva č. V-15-038. ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav výrobních strojů a zařízení.
- [30] KOVALČÍK, J. ZEMAN, P. *Software pro modelování silových účinků při obrábění – část 2*. Praha, 2015. Výzkumná zpráva č. V-15-041. ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav výrobních strojů a zařízení.
- [31] ZEMAN, P., MAŠEK, P., KOVALČÍK, J., SMOLÍK, J., HLA VATÝ, V. *DV#2 (2015) - Vytvořený návrh technologie obrábění a jejího hodnocení pro kompozitní materiály*. Praha, 2015. Výzkumná zpráva č. V-15-050. ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav výrobních strojů a zařízení.
- [32] KOVALČÍK, J. ZEMAN, P. *Měření výkonu obrábění pro zakázku COFMOW v TOS Kuřim*. Praha, 2015. Výzkumná zpráva č. V-15-059. ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav výrobních strojů a zařízení.

- [33] SUŠEŇ, J., SULITKA, M., JANOTA, M., CHVOJKA, P., LYSÁK, P., KOVALČÍK, J., SMOLÍK, J. *DV#1(2015-1) Optimalizace upínání obrobků pro zvýšení dynamiky a výkonnosti obrábění*. Praha, 2015. Výzkumná zpráva č. V-15-061. ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav výrobních strojů a zařízení.
- [34] MALÝ, J., KOVALČÍK, J. VYROUBAL, J. *Návrh řezných nástrojů a výpočet silového zatížení při vrtacím a závitovacím procesu*. ČVUT Praha. 2016. TA ČR. Výzkumná zpráva č. V-16-014.
- [35] ZEMAN, P., MAŠEK, P., KOVALČÍK, J., KEKULA, J., PEŠICE, M., SMOLÍK, J., SOBOLA, J., HLAVATÝ, V. *CK-SVT WP02 - Shrnující zpráva za rok 2016*. Praha, 2016. Výzkumná zpráva č. V-16-030. ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav výrobních strojů a zařízení.
- [36] KOVALČÍK, J. ZEMAN, P. *Software pro modelování silových účinků při obrábění – část 3*. Praha, 2016. Výzkumná zpráva č. V-16-043. ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav výrobních strojů a zařízení.
- [37] VAVRUŠKA, P., MALÝ, J., KOVALČÍK, J., MACHALA, Z. *Vývoj a testování nástrojů pro efektivní obrábění dílců z niklových slitin*. Praha, 2017. Výzkumná zpráva č. V-17-029. ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav výrobních strojů a zařízení.
- [38] KOVALČÍK, J. ZEMAN, P. *Software pro modelování silových účinků při obrábění – část 4*. Praha, 2017. Výzkumná zpráva č. V-17-045. ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav výrobních strojů a zařízení.
- [39] HEINRICH, P., HAVLÍK, L., STRNAD, T., LIBOVICKÝ, L., SMOLÍK, J., DIVIŠ, I., FORNŮSEK, T., KOVALČÍK, J. *Nelaserová technologie pro aditivní a hybridní výrobu z kovu - řešení v roce 2017*. Praha, 2017. Výzkumná zpráva č. V-17-085. ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav výrobních strojů a zařízení.
- [40] ZEMAN, P., MAŠEK, P., KOVALČÍK, J., KEKULA, J., STEJSKAL, M., JANOTA, M., SMOLÍK, J. *CK-SVT WP02 – Shrnující zpráva za rok 2018*. Praha, 2018. Výzkumná zpráva č. V-18-030. ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav výrobních strojů a zařízení.
- [41] KOVALČÍK, J., ZEMAN, P. *Software pro modelování silových účinků při obrábění – část 5*. Praha, 2018. Výzkumná zpráva č. V-18-031. ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav výrobních strojů a zařízení.
- [42] HEINRICH, P., HAVLÍK, L., STRNAD, T., LIBOVICKÝ, L., SMOLÍK, J., DIVIŠ, I., FORNŮSEK, T., KOVALČÍK, J. *Nelaserová technologie pro aditivní a hybridní výrobu z kovu - řešení v roce 2018*. Praha, 2018. Výzkumná zpráva č. V-18-032. ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav výrobních strojů a zařízení.
- [43] MATYSKA, V., KOPAL, M., VYROUBAL, J., KOLÁŘ, M., MACHYL, J., JANOTA, M., KOVALČÍK, J., a jiní. *Zpráva o řešení projektu FV10743 Maximalizace energetické účinnosti strojů*

- KOVOSVIT MAS a.s. za rok 2018. Praha, 2018. Výzkumná zpráva č. V-18-043. ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav výrobních strojů a zařízení.
- [44] ZEMAN, P., MAŠEK, P., KOVALČÍK, J., KEKULA, J., MALÝ, J., PEŠICE, M. *CK-SVT WP02 – Shrnující zpráva za rok 2019*. Praha, 2019. Výzkumná zpráva č. V-19-047. ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav výrobních strojů a zařízení.
- [45] KOVALČÍK, J., ZEMAN, P. *WP02 – Dokončení vývoje software pro modelování silových účinků při obrábění*. Praha, 2019. Výzkumná zpráva č. V-19-048. ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav výrobních strojů a zařízení.
- [46] ZEMAN, P., STEJSKAL, M., ŠVÉDA, J., KOVALČÍK, J., CHLÁDEK, Š., NOVOTNÝ, L., MALÝ, J., FORNŮSEK, T., DIVIŠ, I., SMOLÍK, J. *Zpráva o průběhu řešení dílčího projektu č. 29 „Efektivní výrobní procesy“ v roce 2019*. Praha, 2019. Výzkumná zpráva č. V-19-077. ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav výrobních strojů a zařízení.
- [47] FORNŮSEK, T., KOVALČÍK, J., KOUBEK, J., DIVIŠ, I., SMOLÍK, J. *Zpráva o průběhu řešení projektu v roce 2019*. Laserová technologie pro aditivní a hybridní výrobu z kovů. Praha, 2019. Výzkumná zpráva č. V-19-099. ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav výrobních strojů a zařízení.

Ověřená technologie (2):

- [48] ZEMAN, P., KOVALČÍK, J., PEŠICE, M., SMOLÍK, J. *WP02 – Ověřená technologie - TOS Varnsdorf-2019 Produktivita: „Produktivní obrábění na stroji WHT110C“*. Ověřená technologie. Výzkumná zpráva č. V-19-041. ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav výrobních strojů a zařízení.
- [49] ZEMAN, P., STEJSKAL, M., JANOTA, M., ŠIMŮNEK, A., ČERVENKA, J., KOVALČÍK, J. *WP02 - Ověřená technologie - Škoda Machine Tool-2019 Produktivita: „Přesné vyvrtáváním vnitřních průměrů pinoly obráběcího stroje“*. Ověřená technologie. Výzkumná zpráva č. V-19-021. ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav výrobních strojů a zařízení.