

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Ing. Jan Dvořáček

**TESTOVÁNÍ NÁSTROJŮ PRO VÍCEOSÉ OBRÁBĚNÍ NA
OBRÁBĚCÍCH CENTRECH**

**TESTING OF CUTTING TOOLS FOR MULTIAxis MACHINING
AT MACHINING CENTRES**

Zkrácená verze PhD Thesis

Obor: Strojírenská technologie

Školitel: prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.

Oponenti:

Datum obhajoby:

Klíčová slova

testování nástrojů, plánovaný experiment, těžkoobrobitelné materiály, analýza silového zatížení, statistická analýza, opotřebení nástroje, empirický model

Key Words

tool testing, designed experiments, hard to machine materials, force loading analysis, statistical analysis, tool wear, empirical model

Místo uložení originálu disertační práce

Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie obrábění, FSI VUT v Brně

©

ISBN 80-214-

ISSN 1213-4198

OBSAH

ÚVOD.....	5
1 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	6
1.1 Specifické znaky frézování tvarovými nástroji.....	6
1.2 Silové zatížení při frézování	7
1.3 Data silových záznamů a jejich analýza.....	8
2 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE.....	9
3 NÁVRH A POPIS METODIKY MĚŘENÍ	10
3.1 Experimentální zkoušky, metodika měření a jejich charakteristika	10
3.2 Způsob snímání zatížení nástroje, metodika měření	11
4 HLAVNÍ VÝSLEDKY PRÁCE	12
4.1 Testování nástrojů pro rovinné hsc obrábění al slitiny	12
4.2 Testování frézovacích nástrojů pro souvislé víceosé obrábění	13
4.3 Testování nástroje s vbd pro aplikaci obrábění hss oceli.....	14
ZÁVĚRY	15
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	18
CURRICULUM VITAE.....	20
ABSTRAKT	22
SEZNAM PUBLIKACÍ	23

ÚVOD

Obrábění je jednou z nejčastěji používaných metod technologie [1]. S postupnou implementací NC a CNC strojů do strojírenské výroby v posledních desetiletích, docházelo k postupnému snižování výrobních časů, zvyšování reprodukovatelnosti výroby a možnosti alokace výroby součástí komplexních tvarů na jedno pracoviště. Na základě snahy o slučování jednotlivých technologických obráběcích operací postupně vznikala tzv. obráběcí centra, která se postupem let vyvinula ve stroje s vysokou tuhostí, umožňující z velké části nebo zcela obrobit různé tvarově složité součásti při jednom upnutí. Důsledkem toho je možné produkovat součásti komplexních tvarů, jednak za zlomek času, ve kterém bylo možné vyrobit součásti takového charakteru na konvenčních strojích, ale také významných úspor v oblasti výrobních přípravků a nutnosti použití speciálních nástrojů. Se strmým nárůstem výkonu výpočetní techniky během posledních 15-ti let a možnostmi které nabízí, byl zaznamenán i rozvoj řídicích systémů obráběcích strojů a s tím spojených možností samotných CNC strojů[2].

Obecnou snahou je alokace výroby součástí komplexních tvarů na jeden stroj, na kterém je možno provádět různé druhy technologických operací. Pro využití možností OC je tedy nezbytné použití moderních, dostatečně přesných prostředků, vstupujících do procesu obrábění, tj. nástrojů a jejich upínačů, moderních způsobů upínání obrobků, moderních CAM systémů a mnoha dalších, s tím souvisejících [3].

Řezné nástroje představují jedny z prostředků vstupující do procesu obrábění a svými vlastnostmi ovlivňují podstatně charakteristiky výstupu a současně ekonomičnost procesu obrábění. Testování řezných nástrojů je obvyklou metodou zjišťování chování nástrojů a jejich vhodnosti pro dané aplikace během procesu obrábění. Tato metoda je s úspěchem používána v technologii obrábění, ve své podstatě již od počátků lidstva (povážíme-li, že již pravěcí lidé využívali „obrábění“ a prováděli primitivní „testy“ při broušení pazourků a dalších, prostým zkoušením, který materiál dostupný v jejich okolí jim umožňuje vyrobit si potřebný tvar rychleji, efektivněji). Testování řezných nástrojů se postupem času vyvinulo v komplexní proces využívající moderních zařízení, založený na znalostech fyziky, matematiky, elektrotechniky, při současné aplikaci statistiky[4–7]

Je tedy nasnadě provádění testů nástrojů používaných pro obráběcí centra s možností souvislého řízení více os. Tyto nástroje by měly být schopny odolávat zatížení ve více osách, tj. mít dostatečnou tuhost, aby byly schopné odolávat deformaci v průběhu obrábění a tímto způsobem ovlivňovat výslednou přesnost, a současně by měli mít odolnost proti opotřebení z důvodu zajištění vysoké trvanlivosti nástrojů. V posledních letech dochází k implementaci obrábění vysokými rychlostmi, tzv. high speed cutting (dále HSC), high feed cutting (dále HFC), high productive cutting (dále HPC) obrábění do průmyslového odvětví, které klade vysoké nároky na obráběcí stroje, a současně i na řezné nástroje. Nejčastěji využívanými nástroji pro obráběcí centra jsou v dnešní době tvarové nástroje vyrobené ze slinutého karbidu, opatřené povlaky nanesenými technologiemi PVD na bázi AlTiN[7–11]

1 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Mezi významnou a velmi komplexní oblast strojírenství se řadí výroba řezných nástrojů. Řezné nástroje jsou aktivními prvky podílející se významně jednak na kvalitě vyráběných součástí a rovněž i na ekonomičnosti výroby[12]. Vlastnosti řezných nástrojů používaných pro strojní obrábění jsou pevně spjaty s řeznými materiály použitými pro jejich výrobu, přičemž je možné do jisté míry ovlivňovat řezivost daného nástroje různými úpravami geometrie nástroje[13]. V současné době jsou nástroje specializované pro obrábění konkrétních druhů obráběných materiálů (např. určení aplikačních oblastí slinutých karbidů dle ISO 513).

Mezi požadavky kladené na řezné nástroje patří zejména tvrdost za vysokých teplot, pevnost v ohybu, otěruvzdornost a odolnost vůči opotřebení. Mezi další požadavky na řezné nástroje je možné zařadit jejich tuhost – schopnost odolávat silovému zatížení při současném tepelném namáhání, které patří mezi faktory ovlivňující výsledné kvalitativní i kvantitativní parametry vyráběných povrchů[8, 14]. Současný výzkum v oblasti řezných nástrojů se nezaměřuje primárně na objevení nových řezných materiálů, spíše je zaměřen na vývoj materiálů stávajících – např. zvyšování kvality substrátů, zmenšováním karbidických částic atd. [15, 16].

1.1 SPECIFICKÉ ZNAKY FRÉZOVÁNÍ TVAROVÝMI NÁSTROJI

Charakteristickými znaky frézování jsou přerušovaný řez, proměnná tloušťka vznikající třísky a použití vícebřitých nástrojů [10, 16]. Díky uvedeným skutečnostem má řezná síla proměnnou hodnotu a hodnota řezné síly je vztahována k hodnotě průměrného průřezu třísky. V závislosti na strategii frézování je zapojen odpovídající počet zubů. Počet zubů v záběru může být určen dle vztahu [10]:

$$n_z = \frac{2 \cdot z \cdot \arcsin\left(\frac{B}{D}\right)}{360^\circ}$$

Nástroje s VBD jsou používány nejčastěji pro hrubování nebo pro frézování tvarových ploch[6, 22, 23]. Výsledné silové zatížení na břitu nástroje (F) je možné rozložit např. do složek: řezná síla (F_c), kolmá řezná síla (F_{cn}) a pasivní síla (F_p). Tyto síly jsou znázorněny na obr. 1.3.

Dle [19] je možné formulovat parametricky maximální průřez třísky (viz obr. 1.1) A_{Dmax} (pro maximální zatížení), jako:

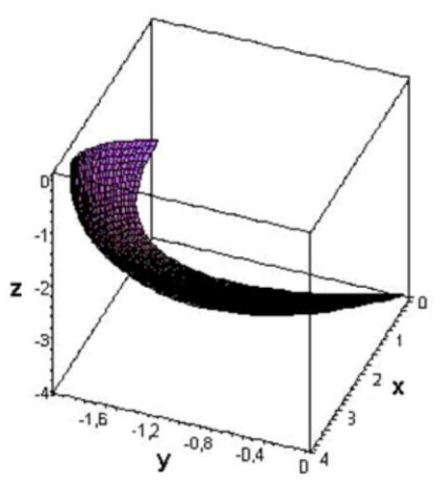
$$A_{Dmax} = \int_{\alpha}^{\beta} h_{max} \cdot \sin(t) \cdot T(t) dt$$

, odpovídající nejvyšší síle pro h_{max} jako funkci úhlů φ and Ψ ve dvou kolmých rovinách:

$$h_{max} = f_z \cdot \sin(\varphi_{max}) \cdot \sin(\psi_{max})$$

, přičemž kvadrát parametru T může být vyjádřen ve formě:

$$T^2(t) = \left(\frac{R}{9} \cdot \sin\left(\frac{1}{9} \cdot t\right) \cdot \sin(t) - R \cdot \cos\left(\frac{1}{9} \cdot t\right) \cdot \cos(t) \right)^2 + \left(\frac{R}{9} \cdot \cos\left(\frac{1}{9} \cdot t\right) \cdot \sin(t) + R \cdot \sin\left(\frac{1}{9} \cdot t\right) \cdot \cos(t) \right)^2 + 64 \cdot \sin^2(t)$$



Obr. 1.1 Výpočetní model průřezu třísky pro VBD kruhového tvaru [19]

Měrná řezná síla k_c je závislá na obráběném materiálu, šířce záběru ostří h a na řezné rychlosti v_c a může být zapsána jako [16]:

$$k_c = \frac{k_{c1}}{h^{mc}}$$

Složky celkového silového zatížení mohou být vyjádřeny dle normy ČSN ISO 3002, v první aproximaci jako poměry řezné síly ($K_{Fp} < 1$, $K_{Fcn} < 1$):

$$F_p = k_{Fp} \cdot F_c$$

$$F_{CN} = k_{F_{CN}} \cdot F_c$$

1.2 SILOVÉ ZATÍŽENÍ PŘI FRÉZOVÁNÍ

Silové zatížení při frézování je třeba brát jako komplexní proces zatěžování řezného nástroje v procesu obrábění. Celková působící síla v procesu obrábění, je dána součtem jednotlivých komponent zatěžujících sil. V souřadném systému dle ČSN 3002 jsou definovány složky sil - řezné (F_c), normálové řezné (F_{CN}) a pasivní (F_p). Při určování velikosti řezných sil je velmi důležité správné určení průřezu třísky, který není při frézování konstantní. Rovněž může být v záběru několik zubů současně a záběr břitů je periodicky přerušovaný [16]. Při výpočtu velikosti řezných sil je vycházeno ze silových poměrů na jednom břitu, nacházejícího se v poloze určené úhlem φ_i .

Síla působící na i -tý zub frézy je tedy dána vztahem:

$$F_{ci} = A_{Di} \cdot k_{ci}$$

, z toho vyplývá měrná řezná síla:

$$k_{ci} = \frac{F_{ci}}{A_{Di}}$$

, následně celková řezná síla je určena vztahem:

$$F_C = \sum_{i=1}^z A_{di} \cdot k_{ci}$$

, kde z je počet zubů v současném záběru, A_{di} je průřez třísky na i -tém zubu a k_{ci} je měrná řezná síla.

1.3 DATA SILOVÝCH ZÁZNAMŮ A JEJICH ANALÝZA

Hlavním nástrojem využitelným pro mnoho vědeckých aplikací je Fourierova transformace. Fourierův integrál je definován pomocí vztahu:

$$H(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t) \cdot e^{j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot t} dt$$

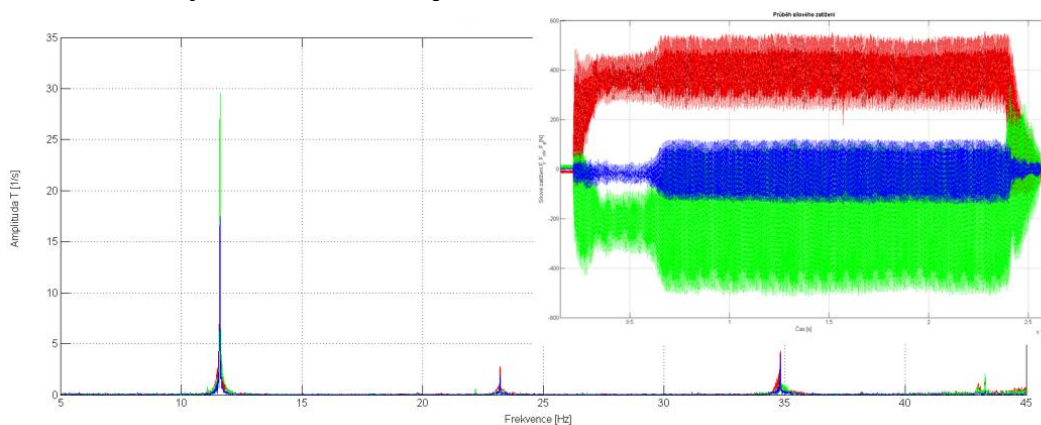
Jedna z možných aplikací Fourierovy transformace v technologii obrábění je zjištění dominantní frekvence z dat získaných pomocí analýzy silového zatížení při frézování. Naměřená data (viz obr. 1.2) jsou zpracována pomocí algoritmu FFT, přičemž se získá frekvenční spektrum, ve kterém by měla být viditelná pouze jedna dominantní frekvence, kterou je frekvence zubová, popřípadě její násobky. V případě zjištěných dalších významných frekvencí je třeba provést analýzu dané frekvence a vypátrat její původ. V mnoha případech, převážně u strojů staršího data výroby, může být pomocí této frekvence například diagnostikován problém v převodovce stroje a může přispět k přesnému zjištění problémového místa (opotřebeného ozubeného kola atd.).

Převodem záznamu silového zatížení do frekvenčního spektra je možné určit, že oblast záznamu obsahuje pouze jednu frekvenci, kterou je frekvence zubová, a její harmonické násobky (viz obr. 1.2). Může být určena dle vztahu:

$$f_z = \frac{n}{60} \cdot z \cdot k$$

, kde n jsou otáčky, z je počet zubů nástroje a k jsou harmonické násobky ($k=1, 2, 3, 4, \dots$).

Z dalších aplikací Fourierovy transformace je možné uvést například analýzu dynamické stability řezného nástroje, obrobku a další.



Obr. 1.2 Příklad rozvoje frekvenčního spektra pro frézování čtyřbřitou stopkovou frézou.

2 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Cílem disertační práce je testování nástrojů pro víceosá obráběcí centra - testování nástrojů určených pro obrábění hliníkových slitin s obsahem křemíku vyšším než osm procent a testování nástrojů s VBD pro obrábění HSS ocelí. Dílčím cílem autora je aplikace a implementace metod plánovaného experimentu v technologii obrábění pro testování řezných nástrojů. K testování nástrojů budou použity prostředky dostupné na Ústavu strojírenské technologie na FSI VUT v Brně, zejména strojní vybavení (obráběcí centrum TAJMAC-ZPS MCV 1210, popř. frézka FV 25CNC), aparatura pro měření silového zatížení KISTLER (dynamometr, specializovaný software Dynoware). Budou taktéž zaznamenávány stavy břitů nástrojů před, v průběhu a po dokončení experimentálních měření pomocí mikroskopu pro dokumentaci a vyhodnocení opotřebení břitů. Rovněž bude využíván software pro zpracování datových souborů se záznamy silového zatížení (Matlab) a bude vytvořen s tím související specializovaný skript pro zpracování velmi rozsáhlých datových souborů, a dále bude využíván software pro statistické zpracování a plánování experimentů (Matlab, Minitab, Statistica). V současné době jsou prováděny testy nástrojů pro různé výrobce. Po dohodě s výrobcí nástrojů budou výsledky zveřejněny v rámci disertační práce či budou poskytnuty nástroje další pro provedení následných testů. Současně probíhá spolupráce s firmami zabývajícími se povlakováním a testování různých druhů povlaků, přičemž je touto cestou spolupracováno i na vývoji povlaků. Kompletní proces testování se bude skládat z následujících kroků:

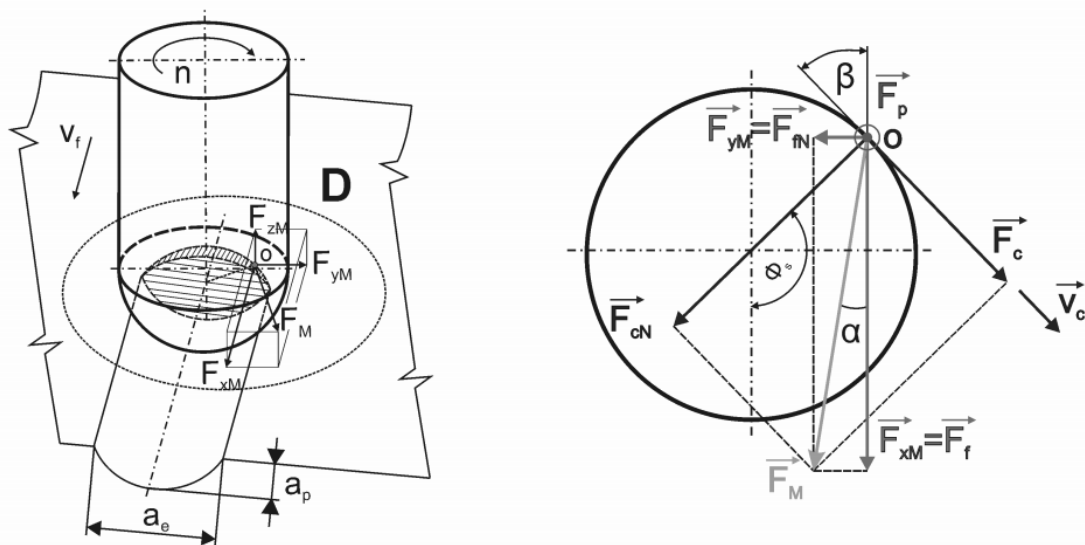
- sestavení plánu experimentu a selekce hlavních ovlivňujících technologických parametrů,
- selekce nástrojů a jednotlivých povlaků,
- analýza substrátu a deponovaných vrstev,
- analýza geometrie, mikrogeometrie vybraných nástrojů,
- dokumentace počátečního stavu břitu nástrojů,
- provedení experimentálních zkoušek v podmínkách reálného obrábění a současně měření progresu silového zatížení v průběhu zkoušek,
- vyhodnocení vybraných parametrů drsnosti povrchu,
- analýza průřezu a stavu třísek,
- vyhodnocení dat získaných pomocí experimentálního měření,
- statistické zpracování, posouzení interakcí, určení hlavních ovlivňujících technologických parametrů,
- formulace závěrů a doporučení pro výrobce.

3 NÁVRH A POPIS METODIKY MĚŘENÍ

3.1 EXPERIMENTÁLNÍ ZKOUŠKY, METODIKA MĚŘENÍ A JEJICH CHARAKTERISTIKA

Měření silového zatížení probíhá v kartézském souřadném systému orientovaném dle dynamometru, který snímá reakce vyvolané odebráním třísky nástrojem v průběhu obrábění. Pro lepší orientaci je vhodné dynamometr sesouhlasit se souřadným systémem obráběcího stroje. Složky takto získaného silového zatížení F_{xM} , F_{yM} a F_{zM} mohou být dále transformovány do jiného souřadného systému. V závislosti na úhlu natočení frézovacího nástroje dochází ke změně silového zatížení z důvodu proměnné tloušťky třísky v průběhu frézování. Jelikož je synchronizace času měření s úhlem natočení frézy velmi obtížná, měření byla vyhodnocována pro maximální hodnotu síly na jednom zubu v záběru, přičemž tato hodnota odpovídá hodnotě maximálního průřezu třísky. Ze souboru naměřených dat vyexportovaných ze softwaru Dynoware ve formátu ASCII je oddělena počáteční a koncová fáze, celý soubor dat s n prvky je rozdělen na j intervalů a v těchto intervalech jsou hledána lokální maxima celkové síly dle vztahu:

$$F_j = \max \left\{ \sqrt{F_{xM}^2 + F_{yM}^2 + F_{zM}^2} \right\} \quad |i \in \langle 1; p \rangle, j \in \langle 1; n/p \rangle|$$



Obr. 3.1 Schematické znázornění silových složek a rozkladu při frézování tvarovým nástrojem.

Hodnoty naměřených silových složek je možné v kartézském souřadném systému popsat jako:

$$(F_{xMi}, F_{yMi}, F_{zMi})$$

, kde $i = \{1, \dots, N\}$.

Výslednici jednotlivých měřených silových komponent je možné určit podle vztahu:

$$F_{M_i} = \sqrt{F_{x_{Mi}}^2 + F_{y_{Mi}}^2 + F_{z_{Mi}}^2}$$

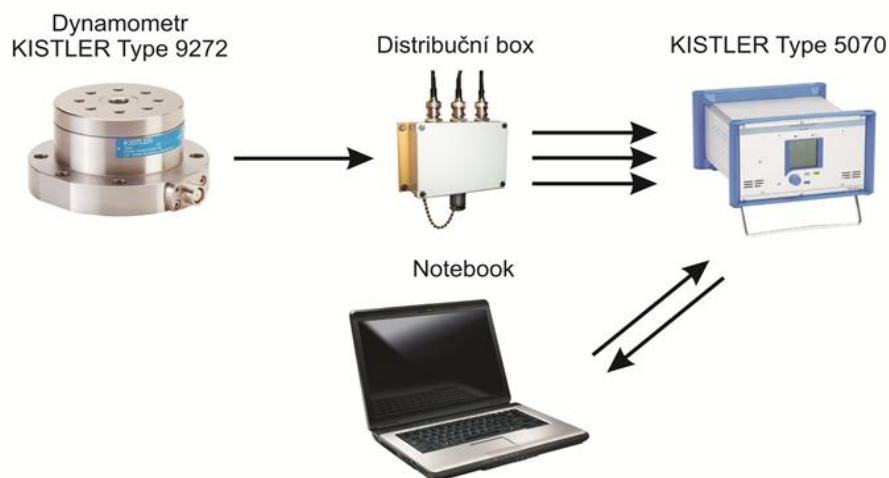
a dále transformovat do jiných souřadnicových soustav, např. do soustavy definované dle normy ČSN ISO 3002 vztahem:

$$F_i = \sqrt{F_{c_i}^2 + F_{c_{Ni}}^2 + F_{p_i}^2}$$

Dle uvedených skutečností byl sestaven specializovaný skript pro zpracování velmi rozsáhlých datových souborů pro filtraci a separaci datových souborů v programu Matlab a data byla „filtrována“. Specializovaný skript pro zpracování rozsáhlých datových souborů byl vytvořen v návaznosti na předchozí uživatelské znalosti autora a na základě dalšího studia literatury o systému Matlab [20, 21]. Filtrovaná data byla dále zpracovávána a statisticky vyhodnocena. Sestavování plánů experimentů za pomoci metod DOE bylo prováděno za pomoci specializovaného programu Minitab, v němž byla rovněž vyhodnocována získaná data.

3.2 ZPŮSOB SNÍMÁNÍ ZATÍŽENÍ NÁSTROJE, METODIKA MĚŘENÍ

Pro měření axiální, radiální a tangenciální síly byl použit piezoelektrický dynamometr KISTLER 9257B s nábojovým zesilovačem 5070A (viz obr. 3.2). Vzorkovací frekvence byla nastavena na 7000Hz, přičemž byla nastavena dlouhá vybíjecí konstanta a dolnoproustný filtr na hladině 50Hz. Pomocí této aparatury bylo možné získat základní zdrojové signály silového zatížení v osách X, Y, Z.



Obr. 3.2 Schematické znázornění měřicí aparatury KISTLER 9257B s nábojovým zesilovačem 5070A.

V průběhu opotřebení frézovacích nástrojů dochází ke změně silových poměrů na břitu nástrojů. Nejvíce patrná je změna silových poměrů u nástrojů se zuby ve šroubovici (za předpokladu sousledného frézování), u kterých je neopotřebovaná fréza v důsledku pozitivních úhlů čela vtahována do řezu a postupně s rozvojem opotřebení dochází u zcela opotřebovaného nástroje k výraznému odtlačování frézy od obrobeného povrchu. Celkové zvýšení řezných sil běžně dosahuje 200%, ve výjimečných případech až 300% [16].

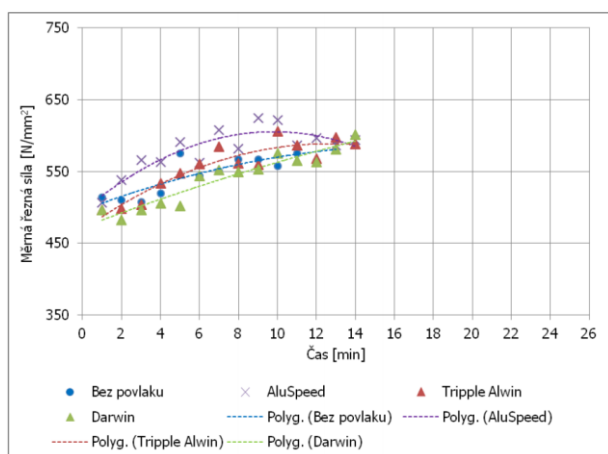
4 HLAVNÍ VÝSLEDKY PRÁCE

K experimentálním zkouškám bylo použito vertikální obráběcí centrum ZPS MCV1210 s řídicím systémem Sinumerik 840D a vertikální frézka FD32V, které jsou součástí strojního vybavení dílen Ústavu strojírenské technologie.

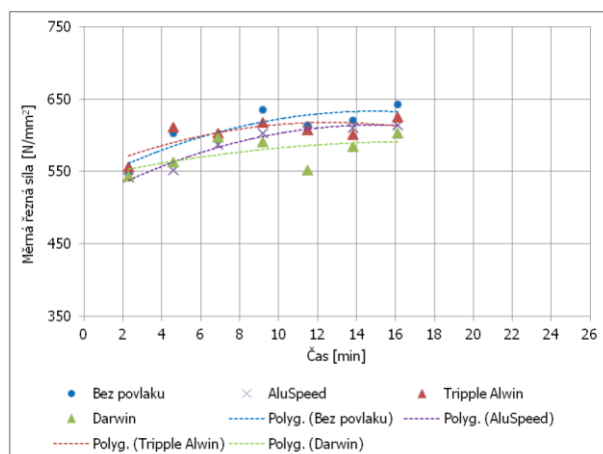
Testované nástroje byly dodány výrobcí rezných nástrojů a výrobcí PVD povlaků pro ověření vlastností povlaků, nástrojové geometrie,

4.1 TESTOVÁNÍ NÁSTROJŮ PRO ROVINNÉ HSC OBRÁBĚNÍ AL SLITINY

Prvotní testování s výchozí geometrií frézovací hlavy prokázalo vysoké zatížení z hlediska měrné řezné síly (obr. 4.1) a VBD vykazovala značné abrazivní opotřebení, přičemž bylo pozorováno přilnutí materiálu v oblasti hřbetní plochy. Z provedených experimentů jednoznačně vyplynula potřeba úpravy geometrie frézovací hlavy a opakování experimentálních zkoušek s upravenou geometrií.

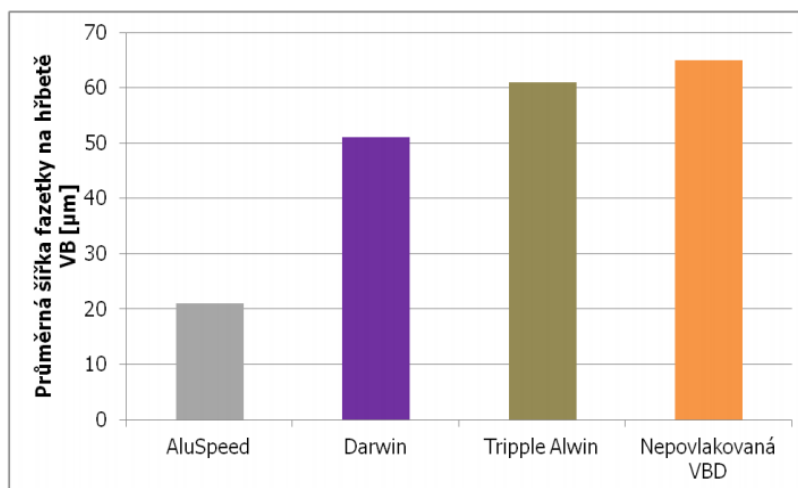


obr. 4.1 Přehled výsledků testované výchozí geometrie frézovací hlavy z hlediska zatížení.



obr. 4.2 Přehled výsledků testované upravené geometrie frézovací hlavy z hlediska zatížení.

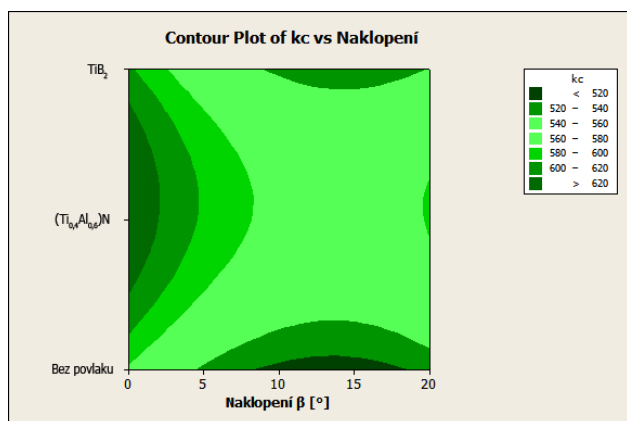
Po provedení úpravy geometrie frézovací hlavy byla pozorována redukce přilnutého materiálu na hřbetu VBD, přičemž v kontaktní oblasti čelo-tríska byl pozorován adhezně přilnutý materiál u obou testovaných geometrií. Na obr. 4.3 je možné pozorovat naměřené hodnoty průměrné šířky fazetky opotřebení na hřbetě VB. Souhrnné znázornění měrného silového zatížení po změně geometrie frézovací hlavy je znázorněno v grafu na obr. 4.2).



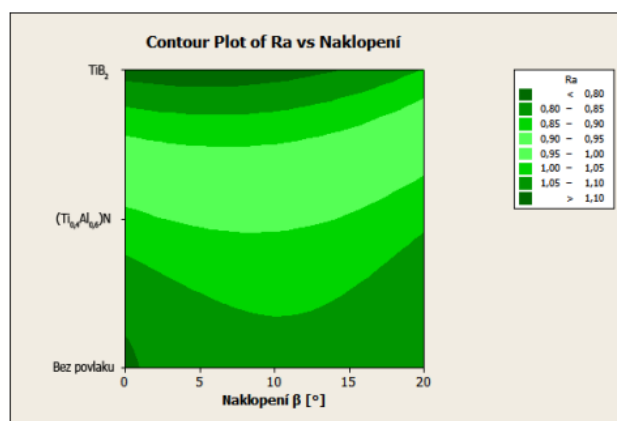
Obr. 4.3 Přehled výsledků testované upravené geometrie frézovací hlavy z hlediska zatížení.

4.2 TESTOVÁNÍ FRÉZOVACÍCH NÁSTROJŮ PRO SOUVISLÉ VÍCEOSÉ OBRÁBĚNÍ

Provedené experimenty prokázaly, že pokud je možné pro dané podmínky obrábění držet stálý odklon nástroje cca 10° , budou dosaženy nejlepší parametry drsnosti povrchu a současně i nejnižší měrné silové zatížení v průběhu obrábění. Tato skutečnost bude mít v důsledku pozitivní vliv i na trvanlivost nástroje. Experimentálně byl zjištěn vliv naklopení i na drsnost povrchu R_a , R_z a byl sestaven empirický model. Výsledek experimentálního testování z hlediska velikosti měrné řezné síly a závislosti drsnosti povrchu je znázorněn na obr. 4.4 a obr. 4.5.

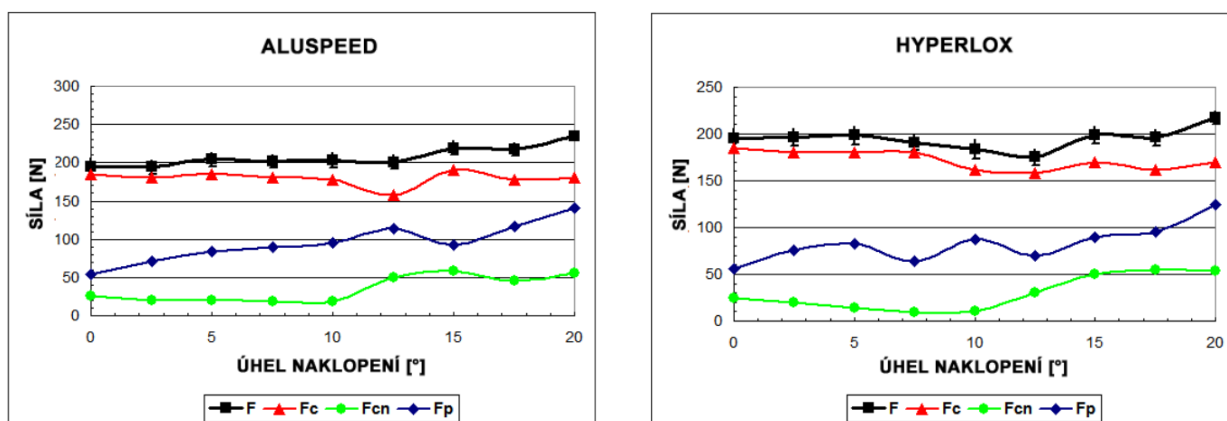


Obr. 4.4 Závislost k_c na úhlu naklopení a použitém druhu povlaku.



Obr. 4.5 Závislost parametru drsnosti R_a na úhlu naklopení a použitém druhu povlaku.

Pro verifikaci přesnosti empirického modelu bylo provedeno početní ověření, přičemž výsledky jsou znázorněny na obr. 4.6.

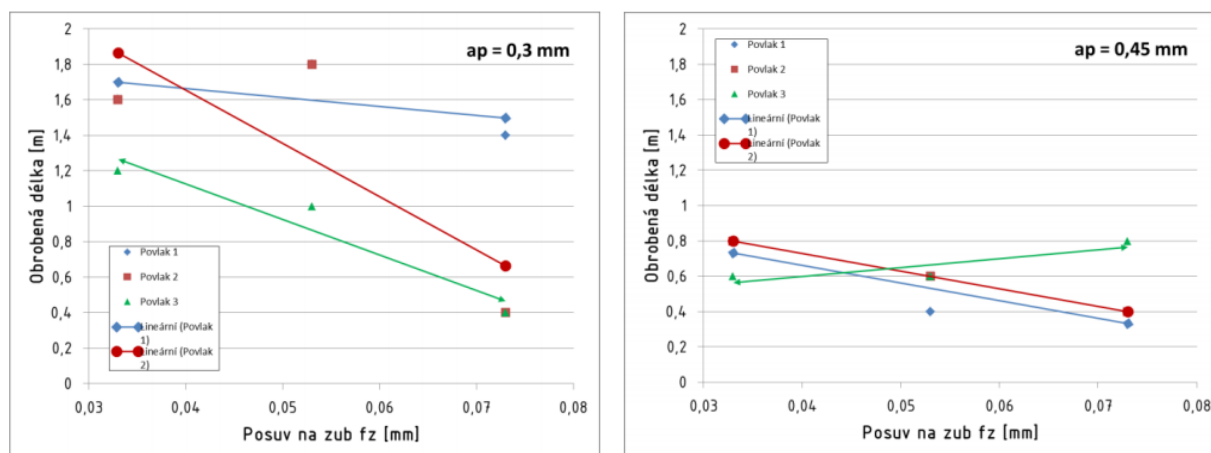


Obr. 4.6 Určená závislost sil pro vybrané posuzované povlaky.

4.3 TESTOVÁNÍ NÁSTROJE S VBD PRO APLIKACI OBRÁBĚNÍ HSS OCELI

Hlavním úkolem experimentálního měření bylo ověření aplikovatelnosti vyměnitelných břitových destiček (dále jen VBD) opatřených povlaky na bázi $\text{Ti}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ pro obrábění nástrojové oceli zušlechťené na horní mez pevnosti a porovnání rozdílnosti jednotlivých modifikací povlaků.

V průběhu experimentů se parametry drsnosti povrchu pohybovali v rozmezí (R_a 0,1 až 0,6 μm) a R_z v rozmezí (0,5 až 2,5 μm). V porovnání s výsledky dosažené v [18, 22, 23] se jedná o významně lepší výsledky. Podobných hodnot bylo dosaženo pro nástroj z CNB18. Trvanlivost nástrojů vztažená na obrobenou délku je znázorněna na obr. 4.7.



Obr. 4.7 Souhrnné zhodnocení pro vybrané podmínky z hlediska obrobené délky.

ZÁVĚRY

Testování frézovací hlavy s VBD pro HSC obrábění Al slitin

Byly provedeny dlouhodobé testy řezivosti vyměnitelných břitových destiček (ADEX 160608FR-FA) ze slinutého karbidu HF7 (WC (93) + Co (7) s průměrnou velikostí karbidických částic $0,8 \mu\text{m}$) od výrobce Pramet Tools, s.r.o, pro dodaný obráběný materiál AlSi9Cu3(Fe), ČSN 42 4339) byl pro všechny VBD zvolena konstantní řezná rychlost ($1100 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$) a posuvová rychlost ($250 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$). Dodaná výchozí frézovací hlava s geometrií lůžka vyměnitelné břitové destičky (radiální úhel čela $\gamma_f = -2^\circ$, axiální úhel čela $\gamma_f = +12^\circ$) způsobovala otěr hřbetní plochy VBD o obráběnou plochu a bylo pozorováno přilnutí obráběného materiálu na hřbetní ploše. Proto byla realizována změna geometrie lůžka čelní frézovací hlavy na hodnoty - radiální úhel čela $\gamma_f = -7^\circ$, axiální úhel čela $\gamma_f = +8^\circ$, která se osvědčila.

Z provedené studie řezivosti uvedených posuzovaných vyměnitelných břitových destiček vyplývají tato shrnutí a závěry:

a) z hlediska opotřebení:

- dominantním vlivem způsobujícím opotřebení při obrábění AlSi9Cu3(Fe) je abrazivní opotřebení,
- na hřbetní ploše VBD po úpravě geometrie lůžka čelní frézovací hlavy nebyl pozorován otěr hřbetní plochy o obráběnou plochu,
- po úpravě geometrie lůžka frézovací hlavy došlo k odstranění otěru hřbetní plochy o obráběnou plochu a redukci vzniku nárůstků (o 40%),
- u všech VBD byl pozorován adhezně přilnutý materiál na čele VBD, a to v kontaktní oblasti rozhraní čelo-tříska, u výchozí i upravené geometrie lůžka čelní frézovací hlavy,
- po šestnácti minutách obrábění vykazoval nejnižší hřbetní opotřebení povlak AluSpeed ($VB = 21 \mu\text{m}$) a nejvyšší povlak Tripple Alwin ($VB = 61 \mu\text{m}$),
- u VBD s povlakem Darwin došlo k odlomení špičky nástroje pro obě posuzované geometrie,

b) z hlediska silového zatížení:

- statisticky významný rozdíl mediánu řezných sil na hladině významnosti $\alpha = 0,05$ mezi všemi posuzovanými povlaky (AluSpeed, Darwin, Tripple Alwin), přičemž nejlepšího výsledku (nejnižšího silového zatížení) pro upravenou geometrii lůžka čelní frézovací hlavy bylo dosaženo s VBD s povlakem AluSpeed,
- úpravou geometrie lůžka čelní frézovací hlavy bylo významně redukováno kolísání silového zatížení (o 15%), potažmo i tvorba nárůstků na hřbetě VBD,

c) z hlediska řezného výkonu:

- pro výchozí geometrii lůžka čelní frézovací hlavy byl nejnižší řezný výkon $2,4 \text{ kW}$ se směrodatnou odchylkou $0,14$ zjištěn pro VBD s povlakem Darwin,

- na intervalu šestnácti minut došlo k nárůstu řezného výkonu o 3% (Tripple Alwin) až 46,5%(Darwin) pro výchozí geometrii lůžka čelní frézovací hlavy, nejvyšší řezný výkon 4,38 kW pro VBD bez povlaku,
- pro upravenou geometrii lůžka čelní frézovací hlavy došlo na intervalu šestnácti minut k nárůstu řezného výkonu o 10,0% (Darwin) až 14,5% (bez povlaku),
- byl pozorován nárůst řezného výkonu od 8% do 12%, přičemž nejnižší řezný výkon byl shodně u povlaku Darwin a u povlaku AluSpeed (medián 3,6 kW).

Testování fréz s kulovým čelem

Obrábění HSS oceli

Testování bylo zaměřeno na ověření aplikovatelnosti VBD pro obrábění HSS oceli zušlechtnuté na horní mez pevnosti. Cílem bylo zejména stanovit závislosti zahrnující vliv povlaku, posuvové rychlosti, a šířky záběru ostří na trvanlivost nástroje, velikost silového zatížení a na drsnost obrobeného povrchu. Experimentální testy byly koncipovány jako dlouhodobé zkoušky. Tvorba a odvod třísek během testování probíhaly bez problémů, provedené analýzy všech nástrojů prokázaly:

- statisticky významný rozdíl mezi neopotřebenými i opotřebenými VBD s povlaky 1, 2, 3 na hladině významnosti $\alpha = 0,05$,
- větší opotřebení nástroje způsobuje vyšší rozptyl hodnot silového zatížení ve všech složkách (do 200%),
- frézováním oceli 19 802.8 ve zušlechtnutém stavu (64 HRC) bylo dosaženo hodnot trvanlivosti nástrojů < 2 m celkové obrobené délky,
- analýza hřbetního opotřebení prokázala vylamování břitu a ulpívání obráběného materiálu na všech hladinách nastavení hodnot posuvu na zub ($f_z = 0,033 - 0,073$ mm) a šířek záběrů ostří ($a_p = 0,3 - 0,6$ mm),
- byly pozorovány nepatrné rozdíly hodnot drsnosti povrchu pro nástroje ze SK pro všechny typy posuzovaných povlaků (v rozsahu $R_a (0,1 - 0,6 \mu\text{m})$, $R_z (0,5 - 2,5 \mu\text{m})$),
- u povlakovaných nástrojů 2, 3 opatřených stejným povlakem (AlTiN) různé tloušťky se projevil opačný efekt tloušťky povlaku – silnější povlak = nižší trvanlivost (Obr. 4.23, Obr. 4.24, Obr. 5.2, Obr. 5.3),
- provedené testy potvrdily dobrou korelaci mezi silovým zatížením a trvanlivostí nástroje – za stejných řezných podmínek znamenalo nižší silové zatížení delší trvanlivost nástroje,
- pro danou aplikaci je striktně doporučeno nepřekračovat délku negativní fazety.

Testování nástrojů pro víceosé obrábění

Testování bylo zaměřeno na zjištění vlivu naklonění nástroje a nástrojového povlaku na parametry drsnosti obrobeného povrchu. Experimentální testy byly koncipovány jako krátkodobé. Tvorba a odvod třísek probíhaly bez problémů, provedené statistické analýzy za stanovených podmínek obrábění prokázaly:

- nejnižších hodnot měrné řezné síly $k_c = 505,25\text{N}$ až $513,89\text{N}$ bylo dosaženo pro naklonění nástroje $\beta = 10^\circ$, naopak nejvyšších hodnot $k_c = 602,2\text{N}$ až $629,0\text{N}$ bylo dosaženo pro naklonění nástroje $\beta = 0^\circ$,
- nejnižších hodnot parametru drsnosti $R_a < 0,8$ a $R_z < 5$ bylo dosaženo pro naklonění nástroje v rozsahu $\beta = 5^\circ$ až 15° pro nástroj s povlakem TiB2,
- nejvyšších hodnot parametru drsnosti $R_a > 1,1$ bylo dosaženo pro naklonění nástroje $\beta = 0^\circ$ pro nástroj bez povlaku,
- nejvyšších hodnot parametru drsnosti $R_z > 7$ bylo dosaženo pro naklonění nástroje v rozsahu $\beta = 20^\circ$,
- povlak na bázi TiB2 je nejvhodnějším povlakem pro danou aplikaci z hlediska dosažené drsnosti povrchu i z hlediska velikosti měrné řezné síly,

Z uvedených skutečností vyplývá, že pokud dovolují podmínky obrábění držet stálý odklon nástroje cca 10° , budou dosaženy nejlepší parametry drsnosti povrchu a současně i nejnižší měrné silové zatížení v průběhu obrábění. Tato skutečnost bude mít v důsledku pozitivní vliv i na trvanlivost nástroje.

Přínosem disertační práce je aplikace metod plánovaného experimentu (DOE) do oblasti testování nástrojů pro obrábění na víceosých obráběcích centrech. Využitím metod plánovaného experimentu bylo dosaženo snížení časové i finanční náročnosti testů. Dále byla úspěšně ověřena aplikovatelnost těchto metod pro tuto oblast experimentování a přitom se podařilo získat potřebné informace o vlastnostech řezných nástrojů potažmo nástrojových povlaků.

Všechny uvedené práce byly prováděny na základě požadavku tří tuzemských podniků (zabývajících se PVD povlakováním, výrobou řezných nástrojů), přičemž výsledky byly aplikovány přímo v praxi. Byly testovány rovněž některé vývojové typy povlaků, přičemž u některých provedené experimentální testy prokázaly nevhodnost sériové produkce.

Výsledky byly prezentovány v rámci prezentací pro jednotlivé výrobce, na národních i mezinárodních konferencích.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

1. AVALLONE, E.A., BAUMEISTER, T. a SADEGH, A.. M. Marks Standard Handbook for Mechanical Engineers. 2007. McGraw-Hill. 1800 s. ISBN 978-0-07142-867-5.
2. BRANDAO, L.C., COELHO, R.T. a RODRIGUES, A.R. Experimental and theoretical study of workpiece temperature when end milling hardened steels using (TiAl)N-coated and PcBN-tipped tools. Journal of materials processing technology. 2005, Vol. 162-163, pp. 696-7010924-0136.
3. MAREK, J. Konstrukce CNC obráběcích strojů 2. MM publishing, 2010. 420 s. ISBN 978-80-254-7980-3.
4. IKUA, Bernard. W., TANAKA, H., OBATA, F. a SAKAMOTO, S. Prediction of cutting forces and machining error in ball end milling of curved surfaces - I theoretical analysis. Materials in engineering. 2001, Vol. 25/4, pp. 266-2730141-6359.
5. KIM, G.M. a CHU, C.N. Cutting force prediction of sculptured surface ball-end milling using Z-map. International journal of machine tools. 2000, Vol. 40/2, pp. 2772910890-6955.
6. LAMIKIZ, A. a LAPEZ DE LACALLE, L.N. Cutting force estimation in sculptured surface milling. International journal of machine tools. 2004, Vol. 44/14, pp. 151115260890-6955.
7. SALGADO, M.. A., LACALLE, L. a Lamikiz, A.. Evaluation of the stiffness chain on the deflection of end-mills under cutting forces. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2005, Vol. 45/6, pp. 727-7390890-6955.
8. BOUZAKIS, K.D., AICHOUH, P. a EFSTATHIOU, K. Determination of the chip geometry, cutting force and roughness in free form surfaces finishing milling, with ball end tools. International journal of machine tools. 2003, Vol. 43/5, pp. 4995140890-6955.
9. NING, Li. a VELDHUIS, Stephen. C. Mechanistic Modeling of Ball End Milling Including Tool Wear. Journal of manufacturing processes. 2006, Vol. 8/11526-6125.
10. SHAW, Milton. C. Metal cutting principles 2nd. New York: Oxford University Press, 2005. 651 s. ISBN 01-951-4206-3.
11. VEPREK, S., MARITZA, J.G. a VEPREK-HEIJMAN, Industrial applications of superhard nanocomposite coatings. Surface and Coatings technology. 2008, Vol. 202, pp. 5063-5073.
12. JUNG, Y., KIM, J. a HWANG, S. Chip load prediction in ball-end milling. Journal of materials processing technology. 2001, Vol. 111/1-3, pp. 250-2550924-0136.
13. ASTAKHOV, V.P. Metal Cutting Mechanics 1st. CRC Press, 1999. ISBN 978-0849318955.

14. ELBESTAWI, M.A., SRIVASTAVA, A.K. a EL-WARDANY, T.I. A Model for Chip Formation During Machining of Hardened Steel. CIRP Annals - Manufacturing Technology. 1996, Vol. 45/1, pp. 71-760007-8506.
15. HUMÁR, A. Materiály pro řezné nástroje MM publishing, 2008. 240 s. ISBN 978-80254-2250-2.
16. PÍŠKA, M. a FOREJT, M. Teorie obrábění tváření a nástroje Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2006. 226 s. ISBN 80-214-2374-9.
17. KORKUT, I. a DONERTAS, M.A. The influence of feed rate and cutting speed on the cutting forces, surface roughness and tool-chip contact length during face milling. Materials and Design. 2005, Vol. 28, pp. 308-312.
18. KOSHY, P., DEWES, R.C. a ASPINWALL, D.K. High speed end milling of hardened AISI D2 tool steel (58 HRC). Journal of materials processing technology. 2002, Vol. 127/20924-0136.
19. PÍŠKA, M. a POLZER, A.. Cutting Performance of Ball Coated Cemented Carbide Cutters for Machining of Forming Tools 2004.
20. ZAPLATÍLEK, Karel. a DONAR, Bohuslav. Matlab tvorba uživatelských aplikací BEN Technická literatura, 2004. 216 s. ISBN 978-80-7300-133-9.
21. ZAPLATÍLEK, Karel. a DONAR, Bohuslav. Matlab začínáme se signály BEN Technická literatura, 2006. 272 s. ISBN 80-7300-200-0.
22. ASLAN, E. Experimental investigation of cutting tool performance in high speed cutting of hardened X210 Cr12 cold-work tool steel (62 HRC). Materials in engineering. 2005, Vol. 26/10261-3069.
23. ELBESTAWI, M.A., CHEN,, BEZCE, a EL-WARDANY, T.I.. High speed Milling of dies and molds in their hardened state. Annals of CIRP. 1997, Vol. 46/1, pp. 57-62.

CURRICULUM VITAE

Osobní údaje

Jméno a příjmení	Ing. Jan Dvořáček
Datum narození	23. 6. 1984
Místo narození	Nové Město na Moravě

Vzdělání:

2009 – dosud	VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Doktorský studijní program Strojírenská technologie, obor Strojírenská technologie
2006 – 2009	VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Magisterský studijní program Strojní inženýrství, obor Strojírenská technologie a průmyslový management
2003 – 2006	VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Bakalářský studijní program Strojírenství, obor Strojírenská technologie

Pracovní zkušenosti:

2013 až dosud	Technolog	Divize letecké techniky, První brněnská strojírna Velká Bíteš, Vlkovská 279, 595 01 Velká Bíteš Ústav strojírenské technologie, FSI VUT v Brně, Technická 2896/2, 616 69 Brno
2010/12 až 2011/05	Technický pracovník	

Vzdělávací kurzy a stáže:

Rok/Doba trvání	Název kurzu/stáže	Certifikát
2011/30. 5 - 1. 6	Metoda konečných prvků	ANO
2011/16. 5 - 20. 5	Kurz základů vědecké práce	ANO
2011/11. 5	Projektové řízení krok za krokem	ANO
2010/1. 9 až 30. 9	Pracovní stáž CemeCon, s.r.o.	NE
2008/06 až 2007/08	Studium v zahraničí – ERASMUS, Technical University of Denmark, Dánsko	ANO

Ostatní znalosti:

Znalost softwaru

Pokročilá	MS Windows, UNIX based systems (Ubuntu, Fedora, atd.), MS Word, Excel, OpenOffice, CorelDraw, ProEngineer, Creo
Středně pokročilá	SolidWorks, Catia, AutoCAD, Adobe Photoshop, GIMP, DraftSight
Základní	HSM Works, SolidCAM, SOLIDEDGE, MEDUSA, MATLAB, Maple, Delphi, PowerMILL, Redakční systém DRUPAL, C++, ANSYS Workbench, Tvorba webu: MM Dreamweaver

<i>Znalost jazyků</i>	Anglický jazyk - komunikativně, slovem i písmem Ruský jazyk – základní znalost
-----------------------	---

Řešení a spoluřešení projektů

2009 až 2012	Projekt OPUS - vzdělanostní síť k výrobním technologiím	vědecko-pedagogický pracovník-inženýr
2011	Analýza rezivosti a opotřebení nástrojů z HSS ocelí s PVD povlaky na bázi (Al, Ti, Cr)N a jejich dynamických vlastností s využitím modální analýzy při čelním frézování	řešitel projektu
2010	Verifikace technologických vlastností povlaků nanášených pomocí PVD	řešitel projektu
	Kongruentní technologie velmi přesného obrábění tvarových ploch	spoluřešitel projektu

ABSTRAKT

Disertační práce je zaměřena na testování nástrojů pro obrábění na pětiosých obráběcích centrech a možností využití metod plánovaného experimentu v této oblasti. V teoretické části je zaměřena pozornost zejména na rozbor specifických oblastí při obrábění nástroji pro víceosé obrábění, včetně analýzy průřezu třísky a specifika testování nástrojů pro vysokorychlostní obrábění s uvažováním problematiky stability řezných nástrojů. Dále je v práci diskutováno silové zatížení řezných nástrojů včetně způsobů měření, pozorované změny zatížení v průběhu rozvoje opotřebení a rozbor analýzy dat. V práci je také obsažen popis plánovaného experimentování a uvažované způsoby jeho využití v oblasti testování řezných nástrojů. Všechny teoretické předpoklady jsou ověřovány v praktické části na počtu rozsáhlých experimentálních zkoušek, zahrnujících mimo jiné hodnocení stavu nástrojů, analýzu vlivu povlaků na řezivost nástroje. Pro jednotlivé podmínky testování jsou vytvořeny specifické metodiky zpracování datových souborů a hodnocení řezivosti testovaných nástrojů. Získané výsledky byly zpracovávány pomocí statistických metod a vyhodnocovány dle metod plánovaného experimentování. V práci je rovněž obsaženo množství analýz opotřebení nástrojů, dokumentovaných pomocí světelné i elektronové mikroskopie.

Abstract

The thesis is focused on testing of the cutting tools for machining on five axis machine tools and possibility of implementation of designed experiments in this area. The theoretical section focuses attention on analysis of specific features during five axis machining, including chip cross section and particularity of tool testing under high speed cutting conditions with consideration of dynamic stability of cutting tools. In the thesis force loading of the tool is discussed as well as its measurement process, considering force development caused by tool wear and data analysis. Description of designed experiment and its application to the area of tool testing is included as well. All theoretical predictions are followed by experimental verifying by extensive number of experimental tests, including evaluation of cutting tool condition, influence of hard coatings on cutting power of the tools, etc. For each of testing conditions are designed specific methods of processing of gathered data as well as evaluation of power of the cutting tools. Gathered data were processed by means of statistical evaluation and by statistical methods of designed experiments. The thesis contains also the extensive number of records and analysis, documented by means of light microscopy as well as electron microscopy.

SEZNAM PUBLIKACÍ

1. DVOŘÁČEK, J.; POLZER, A.; ZOUHAR, J.; SEDLÁK, J.; PÍŠKA, M. On the Application of the PVD Hard Coatings for Ball Milling of Shaped Surfaces. *InternetJournal of Engineering and Technology*, 2010, roč. 1, č. 1, s. 11-18. ISSN: 1338- 2357.
2. DVOŘÁČEK, J.; MATUŠKA, M.; SEDLÁK, J. ON THE APPLICATION OF PVD HARD COATINGS FOR MILLING OF HARDENED STEEL. In *The International Conference NEWTECH 2011 on Advanced Manufacturing Engineering*. 1. Brno: LITERA BRNO, 2011. s. 93-98. ISBN: 978-80-214-4267-2.
3. DVOŘÁČEK, J.; MATUŠKA, M.; BLAŽKOVÁ, V. Aplikace moderních PVD povlaků pro frézování kalených ocelí. In *Vysoce přesné technologie obrábění. Programování moderních CNC strojů*. 1. Brno: LITERA Brno, 2011. s. 5-12. ISBN: 978-80-214-4352-5.
4. PÍŠKA, M.; DVOŘÁČEK, J.; SIZOVA, A.; SEDLÁK, J.; POLZER, A.; FOREJT, M. On the Cutting Performance of Nano-(Ti_xAl_{1-x}) N PVD Coatings. In *Materials Structure & Micromechanics of Fracture (MSMF-6). Key Engineering Materials (web)*. Pavel Šandera. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství: Repropress, Srbská 53, Brno, 2011. s. 395-398. ISBN: 978-80-214-4112- 5. ISSN: 1662- 9795.
5. PÍŠKA, M.; DVOŘÁČEK, J.; SIZOVA, A.; SEDLÁK, J.; POLZER, A.; FOREJT, M. On the Cutting Performance of Nano-(Ti,Al) N PVD Coatings. *Materials Structure & Micromechanics of Fracture (MSMF-6)*. Pavel Šandera. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství: Repropress, Srbská 53, Brno, 2010. s. 118-118. ISBN: 978-80-214-4112-5.
6. JAROŠ, A.; FIALA, Z.; DVOŘÁČEK, J. INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF AlTiCrN COATING FOR DRY MILLING OF CONSTRUCTION STEEL 1. 8159. In *Sborník příspěvků Mezinárodní Masarykovy konference pro doktorandy a mladé vědecké pracovníky 2012*. 1. Hradec Králové: MAGNANIMITAS, 2012. s.3475-3482. ISBN: 978-80-905243-3- 0.
7. FIALA, Z.; JAROŠ, A.; DVOŘÁČEK, J. Influence of a tool wear on sound frequency of milling process. In *Mezinárodní Masarykova konference pro*

- doktorandy a vědecké pracovníky*. 1. Hradec Králové: Magnanimitas, 2012. s. 3483-3489. ISBN: 978-80-905243-3- 0.
8. HORÁČEK, M.; CHARVÁT, O.; PAVELKA, T.; SEDLÁK, J.; MADAJ, M.; NEJEDLÝ, J.; DVOŘÁČEK, J. Medical Implants by Using RP and Investment Casting Technologies. *China Foundry*, 2011, roč. 8, č. 1, s. 107-111. ISSN: 1672- 6421.
 9. SEDLÁK, J.; PTÁČKOVÁ, M.; NEJEDLÝ, J.; MADAJ, M.; DVOŘÁČEK, J.; ZOUHAR, J.; CHARVÁT, O.; PÍŠKA, M. MATERIAL ANALYSIS OF TITANIUM ALLOY PRODUCED BY DIRECT METAL LASER SINTERING. *International Journal of Metalcasting*, 2013, roč. 7, č. 2, s. 43-50. ISSN: 1939- 5981.
 10. SEDLÁK, J.; PÍŠKA, M.; PTÁČKOVÁ, M.; MADAJ, M.; CHARVÁT, O.; DVOŘÁČEK, J.; ZOUHAR, J. PROPERTIES OF THE BIOCOMPATIBLE TiAl6V4 MATERIAL PRODUCED BY DMLS. *International virtual journal for science, technics and innovations for the industry*, 2010, roč. 2010, č. 4- 5, s. 74-77. ISSN: 1313- 0226.
 11. ZEMČÍK, O.; DVOŘÁČEK, J. Rozložení teplotního pole v FDM tiskové hlavě. In *Vysoce přesné technologie obrábění. Programování moderních CNC strojů*. 1. Brno: LITERA Brno, 2011. s. 21-28. ISBN: 978-80-214-4352- 5.
 12. ZEMČÍK, O.; DVOŘÁČEK, J. A Distribution of Temperature Field in the FDM Printhead. In *The International Conference NEWTECH 2011 on Advanced Manufacturing Engineering*. 1. Brno: LITERA Brno, 2011. s. 115-119. ISBN: 978-80-214-4267- 2.
 13. SEDLÁK, J.; DVOŘÁČEK, J.; RUSIŇÁK, M. Hodnocení průběhu silového zatížení při vystružování hlavicí MT3. In *Vysoce přesné technologie obrábění. Programování moderních CNC strojů*. 1. Brno: LITERA Brno, 2011. s. 29-42. ISBN: 978-80-214-4352- 5.
 14. SEDLÁK, J.; DVOŘÁČEK, J.; JOSIEK, R. ANALYSIS OF DEVIATION OF THE PITCH STABILITY IN PRODUCTION OF HYDRAULIC HOSES. In *Sborník příspěvků Mezinárodní Masarykovy konference pro doktorandy a mladé vědecké pracovníky 2012*. 1. Hradec Králové: MAGNANIMITAS, 2012. s. 15-24. ISBN: 978-80-905243-3- 0.

- 15.MADAJ, M.; KODYS, M.; BLAŽKOVÁ, V.; DVOŘÁČEK, J.; PÍŠKA, M.; SEDLÁK, J.; CHARVÁT, O. Skořepinové náhrady kloubů. In *FSI Junior konference 2011*. 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2011. s. 1-6. ISBN: 978-80-214-4359-4.