VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice PhD Thesis, sv. 440

ISSN 1213-4198

Ing. Aleš Polzer

Monolitní frézovací nástroje pro efektivní obrábění kovových materiálů bez použití chlazení

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta strojního inženýrství
Ústav strojírenské technologie

Ing. Aleš Polzer

MONOLITNÍ FRÉZOVACÍ NÁSTROJE PRO EFEKTIVNÍ OBRÁBĚNÍ KOVOVÝCH MATERIÁLŮ BEZ POUŽITÍ CHLAZENÍ

WHOLE-CARBIDE CUTTERS FOR EFFECTIVE DRY MILLING OF METAL MATERIALS

Zkrácená verze Ph.D. Thesis

Obor:	Technologie obrábění
Školitel:	Doc. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Oponenti:	Prof. Ing. Alexander Janáč, CSc. Doc. Ing. Lubomír Javorek, CSc. Doc. Dr. Ing. Ivan Mrkvica
Datum obhajoby:	27. 9. 2007

KLÍČOVÁ SLOVA
frézování; monolitní nástroje; silová analýza; PVD;

KEY WORDS
milling; solid carbide tools; force analysis; PVD;

MÍSTO ULOŽENÍ DISERTAČNÍ PRÁCE
Knihovna FSI VUT v Brně

© Aleš Polzer, 2008
ISBN 978-80-214-3562-9
ISSN 1213-4198

OBSAH

1 Úvod 5
2 Přehled o současném stavu problematiky 6
2.1 Možnosti zvyšování řezivosti monolitních nástrojů povlakováním 6
2.2 Technologie úprav nástrojů před povlakováním 7
2.3 Metody testování velmi tvrdých povlaků řezných nástrojů 7
3 Cíle disertační práce 9
4 Výsledky disertační práce 11
4.1 Studie elastické deformace monolitních fréz s rovným čelem 11
4.2 Fyzikální model zatížení řezného nástroje 11
4.3 Testování monolitních frézovacích nástrojů řeznou zkouškou 12
4.3.1 Řezné vlastnosti čelních monolitních fréz ϕ6 mm povlakovaných PVD metodami 13
4.3.2 Řezné vlastnosti monolitních fréz s kulovým čelem ϕ16 mm povlakovaných PVD metodami 14
4.4 Elektronová fázová a strukturní analýza břitů řezných nástrojů po obrábění 15
4.4.1 Analýza monolitních stopkových fréz ϕ6 mm 16
4.4.2 Analýza monolitních stopkových fréz s kulovým břitem ϕ16 mm 16
5 Diskuse dosažených výsledků 17
6 Závěr 20
Seznam použité literatury 23
Seznam vlastních prací vztahujících se k tématu disertační práce 25
Seznam použitých symbolů a zkratek 27
Autorovo CV 29
Abstract 30

1 ÚVOD

Obrábění kovů není žádnou novou vědou. Hrálo v dějinách lidstva vždy významnou roli a výroba součástí technologiemi třískového obrábění je nepostradatelná i v dnešní době. Tato předkládaná práce navazuje na dlouholetý výzkum[10,19,20,21], realizovaný na FSI, VUT v Brně, ÚST – Odboru technologie obrábění, a zabývá se povlakovanými monolitními frézovacími nástroji, jejichž uplatnění v poslední době neustále stoupá[5,12].

Frézy ze slinutých karbidů jsou v praxi zpravidla aplikovány při obrábění tvarových forem z kovových i nekovových materiálů bez použití chlazení. Snaha odebírat frézováním více materiálu rychleji a přitom dosáhnout stejné nebo vyšší kvality obrobeného povrchu vede k nezbytnému srovnávání schopností řezných nástrojů dodávaných různými domácími i zahraničními firmami. Vysoká konkurence vede rovněž výrobce nástrojů ke sledování vlastní produkce a ke snaze dosáhnout např. delší životnosti nástroje při jeho nasazení do výrobního procesu.

Rozbor současného stavu problematiky umožní začlenit monolitní frézy mezi ostatní typy řezných materiálů. Zachycení aktuálního výrobního trendu, např. zmenšování zrna karbidu wolframu[13] (dále jen WC), umožňuje předpokládat další vývoj. Bez vhodně navržených experimentálních zkoušek lze však jen obtížně zhodnotit vlivy nově vyvinutých modifikací např. mikrostruktury, geometrie nebo změn technologického postupu výroby monolitních frézovacích nástrojů. Shrnutí a rozbor jednotlivých zkoušek dílčích nebo komplexních vlastností fréz umožní zvolit metodiku vhodnou pro objektivní posuzování efektivnosti obrábění.

Dlouholetý vývoj v oblasti nástrojů pro třískové obrábění vede ke zvyšování řezných vlastností aplikací vrstev tvrdých otěruvzdorných vrstev (dále jen TOV) na základní tělesa nástrojů. Postupně vyvinuté metody povlakování a různé druhy povlaků umožnily prodloužení jejich životnosti. Ukazuje se však, že možnosti těchto tvrdých vrstev ještě nejsou zdaleka vyčerpány.

Aplikací např. dlouhodobé řezné zkoušky na běžně užívané i nově vyvíjené PVD povlaky je možno kvantifikovat rozdíly v silovém zatížení řezného nástroje v průběhu frézování po dobu celé jeho životnosti. Analytickou elektronovou mikroskopií pak lze zobrazit detailní rozdíly v mikrogeometrii těchto nástrojů.

Měřením dílčích vlastností zpravidla rovinných zkušebních vzorků (mikrotvrdost, tloušťka, adheze, atd.) v průběhu vývoje nového řezného nástroje nebo jeho povlaku lze jen usuzovat na výsledné zlepšení řezného nástroje. Pečlivý rozbor nedostatků prototypového monolitního frézovacího nástroje však umožní další fázi zvyšování jeho kvality (životnosti).

V této disertační práci je dále mimo specifických praktických měření věnována pozornost rozvoji teoretických poznatků z technologie obrábění frézováním, které umožní zpřesnit predikční (výpočtové) metody zatížení soustavy stroj-nástroj-obrobek. Pozornost je věnována i integritě obrobeného povrchu a využití specializovaného softwaru pro automatizaci zpracování datových souborů zaznamenaných v průběhu řezných zkoušek.

2 PŘEHLED O SOUČASNÉM STAVU PROBLEMATIKY

Výběr vhodného řezného nástroje pro efektivní obrábění kovových materiálů má v dnešní době zásadní vliv. Podstatný rozdíl je především při volbě nástrojů z rychlořezné oceli (dále jen HSS) nebo slinutého karbidu (dále jen SK), přičemž nesmíme opomenout ani možnost nasazení cermetů, diamantu nebo kubického nitridu boru (dále jen KNB). Mezi hlavní rozdíly patří odolnost zmíněných materiálů vůči vysokým teplotám, chemickým procesům a abrazivnímu otěru.

Sortiment nejčastěji aplikovaných řezných nástrojů ze slinutých karbidů při produktivním obrábění frézováním je v dnešní době velmi široký a vlastnosti jednotlivých typů SK jsou značně rozdílné. Tomuto faktoru je nutno přizpůsobit technologie výroby nástrojů, jejich mechanické úpravy, průběh cyklu povlakování a případně i fáze čištění nástroje před povlakováním.

Hlavním problémem dnešní doby tedy není intenzivní hledání absolutně nových, dosud nepoužívaných řezných materiálů, ale spíše zdokonalování technologie výroby, které povede ke zlepšení jejich mechanických a řezných vlastností[12]. Velmi důležité je proto optimální využití již známých materiálů a velmi přesné vymezením oblastí jejich aplikace.

Monolitní frézy (řezné nástroje ze SK) patří mezi významné nástroje pro obrábění forem, tvarových ploch a ploch se zvýšenými nároky na přesnost obrábění. Celosvětový výzkum v této oblasti je dlouhodobě soustředěn na zmenšování zrnitosti nástrojů ze SK pod 0,4 μm a optimalizaci mikrogeometrie a makrogeometrie řezných nástrojů. Zmenšování jednotlivých zrn má za následek změnu poměru plochy zrn k jejich objemu a materiály s jemným zrnem vykazují obecně vyšší tvrdost, lomovou houževnatost i pevnost v ohybu, což se výrazně projeví na zvýšení řezivosti a trvanlivosti nástrojů. Moderní technologie práškové metalurgie umožňují vyrobit slinuté karbidy se zrny nanometrických rozměrů.

2.1 MOŽNOSTI ZVYŠOVÁNÍ ŘEZIVOSTI MONOLITNÍCH NÁSTROJŮ POVLAKOVÁNÍM

Základním řezným materiálem pro obrábění ocelí pomocí nástrojů s definovanou geometrií břitu jsou v dnešní době povlakované slinuté karbidy[5,12] se zvýšenou tvrdostí a odolností proti oxidaci za zvýšených teplot řezání. Vzhledem k jejich schopnosti obrábět vyššími řeznými i posuvovými rychlostmi bez použití chladicích a mazacích emulzí jsou rovněž nástroji velmi ekologickými. Jejich nevýhodou je však vyšší pořizovací hodnota a vyšší nároky na přebrušování.

Průběžně se rozšiřují aplikace nanášení tvrdých a otěruvzdorných povlaků užitím metod PVD, CVD a dalších[4,6,22]. Výzkumné práce se zabývají nejen stanovením jejich optimálních tlouštěk[27], ale i účinky různých předúprav povrchu[26] ve vztahu ke krystalové orientaci SK, způsobem jeho mechanického opracování, orientaci epitaxní vrstvy povlaku, napjatostí v jednotlivých krystalografických rovinách[15], včetně určení těchto vlivů na prodloužení trvanlivosti břitů nebo zvýšení jejich

výkonnosti. Moderní směr studia těchto vrstev na bázi nanokrystalických kompozitů představuje samostatnou kapitolu nejen v tvorbě speciálních velmi tvrdých a otěruvzdorných řezných materiálů, ale i v dalších technických oblastech jejich využití[19].

2.2 TECHNOLOGIE ÚPRAV NÁSTROJŮ PŘED POVLAKOVÁNÍM

Při posuzování řezivosti nástrojů se často soustřeďuje pozornost pouze na nejzákladnější parametry, kterými jsou např. materiál řezného nástroje, druh PVD povlaku, metoda povlakování (PVD, CVD, atd.) a podmínky obrábění. Opomíjeny však zůstávají různé mezioperační úpravy polotovarů, případně další vedlejší vlivy technologií výroby nástrojů.

Mikroúpravy břitů řezných nástrojů

- broušení řezného nástroje
- omílání v granulátech s brusnou pastou
- leštění použitím abrazivních tkanin
- lapování
- magnetfinish
- využití laseru
- kartáčování
- proudové čištění

Čištění nástrojů před povlakováním

- odmaštění
- pískování
- mokré čištění
- čištění nástrojů v povlakovací komoře

2.3 METODY TESTOVÁNÍ VELMI TVRDÝCH POVLAKŮ ŘEZNÝCH NÁSTROJŮ

V současné době je již použití tvrdých otěruvzdorných vrstev na produktivních řezných nástrojích téměř samozřejmostí. Vzhledem k velkému množství druhů nabízených PVD povlaků, jejich neustálému zdokonalování a specializaci na konkrétní řezné aplikace, je nezbytné rozvíjet i metody kontroly (testování) vlastností důležitých pro jejich efektivní použití. Testování kvality řezných nástrojů lze provádět řadou metod, které se zaměřují na dílčí vlastnosti, např. adhezi, tloušťku povlaku, nebo hodnotí vlastnosti řezných nástrojů komplexně (např. řezivost, trvanlivost).

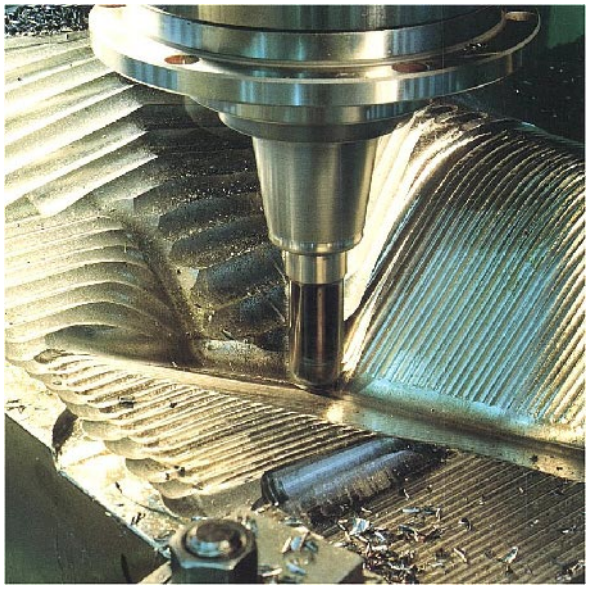
Přehled metod testování řezných nástrojů

1. Konvenční zkoušky tvrdých povlaků
   - měření tloušťky povlaků (Kalotest)
   - měření adheze (scratchtest)
   - měření drsnosti povrchu povlaků
   - měření tvrdosti a mikrotvrdosti povlaků
2. Analytické metody
3. Dynamické zkoušky
4. Tribologické zkoušky
5. Erozní zkoušky
6. Integrovaná technologicko-ekonomická analýza výsledků obrábění nástrojů s tvrdými otěruvzdornými povlaky
7. Zkoušky chemických vlastností
   - odolnost vůči oxidaci
   - tepelná stabilita
8. Řezné zkoušky
   - laboratorní řezné zkoušky standardizované dle ISO 3685, ČSN ISO 8688 (měření lineárních rozměrů opotřebovaných ploch na čele a hřbetu),
   - laboratorní řezné zkoušky smluvní
   - provozní řezné zkoušky

3 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Na základě rozboru současného stavu problematiky monolitních frézovacích nástrojů určených pro obrábění kovových i nekovových materiálů bez použití chlazení se autor této disertační práce zaměřil na několik vzájemně souvisejících oblastí. Charakteristika jednotlivých oblastí je shrnuta do následujících odstavců, které jsou dále řešeny v navazujících kapitolách.

Ke značnému rozvoji monolitních frézovacích nástrojů a obecně nástrojů ze SK přispěl i vývoj CNC strojů a CAD/CAM technologií. Pro frézování tvarových forem jsou velmi často využívány nástroje ze SK. Při zpravidla tříosém hrubování frézováním je kladen značný důraz na efektivní odebrání nadbytečného materiálu obrobku. Preferována bývá tuhost soustavy stroj-nástroj-obrobek. Zde jsou mnohdy upřednostňovány monolitní nástroje s rovným čelem a jedním břitem přes osu rotace (pro možnost axiálního zanoření nástroje do obrobku). Nárůst aplikací pětiosého frézování tvarových ploch (hrubování i dokončování) však mnohdy vyžaduje nástroje s kulovým čelem. Zušlechtěný materiál forem, komplikované tvary obrobků, přerušovaný řez i časté požadavky značného vyložení nástroje splňují monolitní frézy s kulovým čelem (obr. 1) a positivní geometrií čela[14]. Tyto nástroje z pohledu vlastního mechanismu tvorby třísky a silového namáhání při procesu obrábění představují poměrně málo probádanou oblast.



Obr. 1 Obrábění tvarových ploch stopkovou frézou s kulovým čelem

Analýza a znalost fyzikálního modelu zatížení a deformace výše zmiňovaných nástrojů může být výchozím podkladem pro zkoumání vlivu změny polohy nástroje vůči normále obrobené plochy u velmi přesných metod obrábění, které dnes nahrazují například broušení. Deformace nástroje při obrábění má tak významný vliv na rozměrovou, tvarovou a mikrogeometrickou přesnost obrobku.

Dosavadní zkušenosti s testováním povlakovaných řezných nástrojů ukázaly, že zkoušky dílčích vlastností vzorků nezahrnují vždy problémy tvarově složitých řezných nástrojů, např. měnící se tloušťku povlaku na řezném nástroji se zuby ve šroubovici nebo kvalitu povlakování řezné hrany. Naměření silových veličin při reálných podmínkách obrábění a vzájemné porovnání jednotlivých testovaných nástrojů sice poukazuje na kvalitu/nekvalitu nástrojů, ale ještě nezodpovídá otázku: „Proč k těmto značným rozdílům v trvanlivostech nástrojů dochází?“

Zachycení odlišností (anomálií) mezi používanými SK řezných nástrojů je významným, avšak ne jediným ukazatelem kvality nástrojů. Například zvolená technologie povlakování může mít na výsledné řezné vlastnosti monolitních frézovacích nástrojů rovněž značný vliv. Ukazuje se jako vhodné provádět AEM a REM snímkování morfologie opotřebených ploch nástrojů, včetně realizace kontrolní fázové analýzy. Tato získaná data mohou odpovědět na otázky, jak řezné vlastnosti nástrojů vylepšit nebo kde došlo při technologii povlakování k chybě.

Autor touto disertační prací chce přispět k detailnějšímu poznání řezných vlastností monolitních frézovacích nástrojů. Poukáže na některé nedostatky (konkretizuje) a navrhne možná zdokonalení. Celá práce tak rozšíří povědomí technologů o monolitních řezných nástrojích pro třískové obrábění bez použití řezné kapaliny. Dále nabídne metodiku, která výrobcům řezných nástrojů (firmám vyrábějící nástroje ze SK i firmám, které se specializují na jejich povlakování) umožní kontrolu kvality vlastní produkce i srovnání s konkurencí. Níže charakterizovaná metodika testování a analýzy monolitních frézovacích nástrojů budou rovněž aplikovatelné při optimalizaci řezných podmínek.

Za předpokládané cíle disertační práce je možno považovat

- vytvoření fyzikálního modelu zatížení řezného nástroje a rozbor záznamu silového zatížení;
- zaznamenání silových složek vybraných druhů povlakovaných monolitních fréz při obrábění bez použití chlazení;
- statistické zpracování a vyhodnocení hodnot silových složek zatížení fréz, stanovení trvanlivostí řezných nástrojů a porovnání výsledků s dalšími prováděnými metodami testování (analyzování) nástrojů;
- ověření metody testování řezných monolitních fréz pomocí komplexní analýzy dlouhodobých řezných zkoušek;
- analýzu povlakovaných monolitních fréz prováděnou pomocí elektronové mikroskopie.

4 VÝSLEDKY DISERTAČNÍ PRÁCE

Vzhledem k neustálému vývoji monolitních frézovacích nástrojů umožňujících efektivně obrábět tvarové plochy je nutné zaměřit se na rozvoj metodiky hodnocení a kvantifikaci rozdílů v nástrojových materiálech SK a tvrdých otěruvzdorných vrstvách. V letech 2001–2007 se autor této disertační práce podílel na měření a hodnocení vlastností nových i vyvíjených monolitních fréz, chráněných PVD povlaky typu TiN, (Ti,Al)N, (Ti,C)N a (Al,Ti)N naší i zahraniční produkce, určených zejména pro efektivní frézování zušlechtěných ocelí za sucha. Získané poznatky jsou shrnuty do následujících kapitol.

4.1 STUDIE ELASTICKÉ DEFORMACE MONOLITNÍCH FRÉZ S ROVNÝM ČELEM

Studiem elastické deformace řezných nástrojů lze posoudit důležitost vlivu velikosti průhybu (rovnice 1 a 3) a zkroucení (rovnice 2 a 4) válcové frézy na řezný proces. Velikost této deformace je závislá nejen na rozměrech nástroje, ale také na jeho materiálových vlastnostech. Deformace nástroje obsahuje energie napjatosti složeného namáhání, zahrnující zejména ohyb, smyk a krut a jejich derivace podle působící síly (momentu) ve tvaru:

$$y_F = \frac{\partial W}{\partial F} = \frac{1}{E}.\int_{(l)} \frac{M_y(x)}{J_y(x)}.\frac{\partial M_y(x)}{\partial F}.dx + \frac{\beta}{6}.\int_{(l)} \frac{T_z(x)}{G(x)}.\frac{\partial T_z(x)}{\partial F}.dx + \frac{1}{G}.\int_{(l)} \frac{M_k(x)}{J_p(x)}.\frac{\partial M_k(x)}{\partial F}.dx \qquad (1)$$

$$\varphi_M = \frac{\partial W}{\partial M} = \frac{1}{E}.\int_{(l)} \frac{M_y(x)}{J_y(x)}.\frac{\partial M_y(x)}{\partial M}.dx + \frac{\beta}{6}\int_{(l)} \frac{T_z(x)}{G(x)}.\frac{\partial T_z(x)}{\partial M}.dx + \frac{1}{G}.\int_{(l)} \frac{M_k(x)}{J_p(x)}.\frac{\partial M_k(x)}{\partial M}.dx \qquad (2)$$

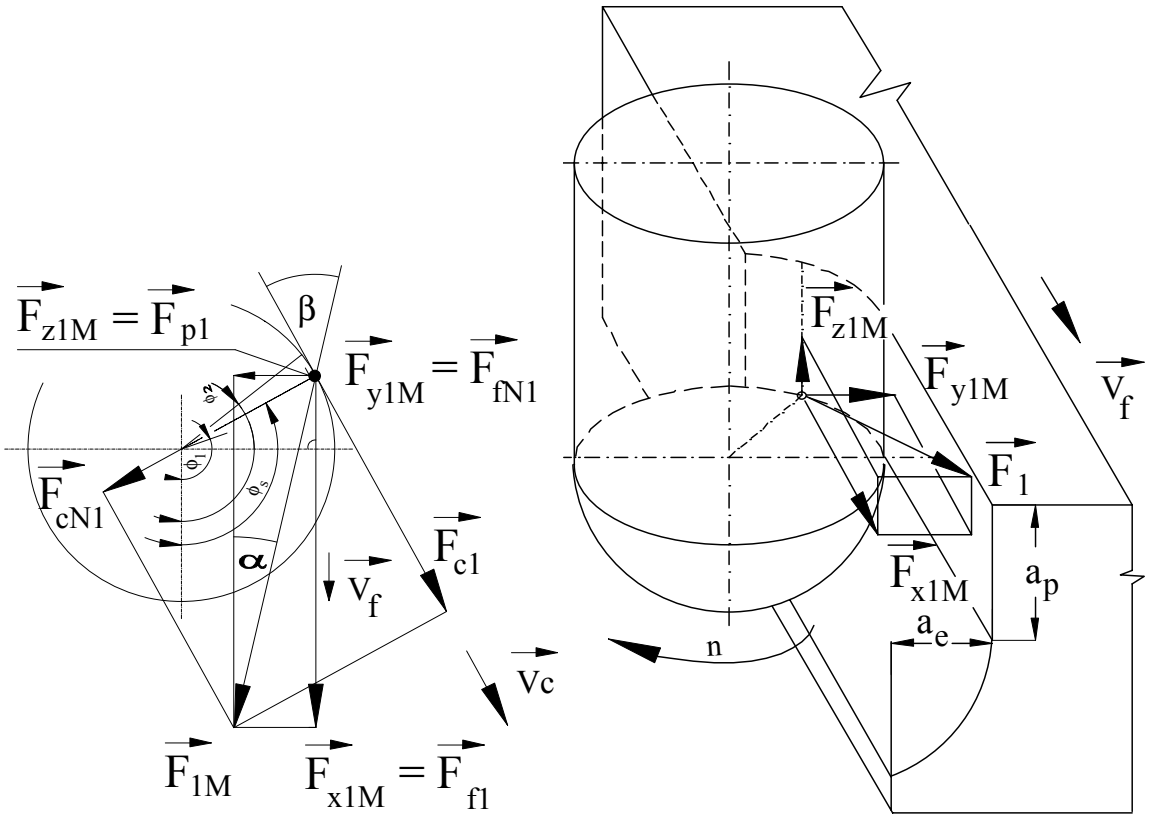
Vyjádření rovnic 3.1 a 3.2 po matematické transformaci:

- průhyb $$y(x) = \frac{F}{6 \cdot E \cdot J} \cdot \left(2 \cdot l^3 - 3 \cdot l^2 \cdot x + x^3\right) \qquad (3)$$

- úhel pootočení $$\varphi(x) = -\frac{F}{2 \cdot E \cdot J} \cdot \left(l^2 - x^2\right) \qquad (4)$$

4.2 FYZIKÁLNÍ MODEL ZATÍŽENÍ ŘEZNÉHO NÁSTROJE

Obrábění frézováním běžně probíhá řeznými nástroji se zuby ve šroubovici. Nástroj se při oddělování třísky otáčí kolem své osy a navíc posouvá proti obrobku. Směr působení i velikost řezné síly se tedy neustále mění[29]. Snímač řezných sil (dynamometr) však detekuje změny velikosti silových složek v neměnných směrech kartézského souřadného systému. Souřadný systém dynamometru obsahuje složky F_x, F_y a F_z, které jsou pro měření sesouhlaseny s hlavními pohyby (osami) obráběcího stroje F_{x1M}, F_{y1M} a F_{z1M}.



Obr. 2 Fyzikální model silového zatížení stopkové frézy s kulovým čelem

Velikosti jednotlivých měřených složek F_{x1}, F_{y1} a F_{z1} (obr. 2) jsou určující např. pro dimenzování posuvových mechanismů strojů. Silovou výslednici F_1 ze získaných složek však lze dále přetransformovat např. do souřadného systému definovaného dle ČSN ISO 3002. Sílu F_1 lze rozložit na složky F_{c1}, F_{c1N} a F_{p1}, které jsou důležité např. při určování řezných výkonů nástrojů a pohonů vřeteníků. Transformováním silové výslednice F_1 do dalšího souřadného systému, který zahrnuje uvažovaný bod ostří, ortogonální rovinu hlavního břitu a složky F_{v1}, F_{h1} a F_{tr1}, lze hodnotit aktuální stav nástroje a posuzovat intenzitu rozvoje předpokládaného opotřebení.

4.3 TESTOVÁNÍ MONOLITNÍCH FRÉZOVACÍCH NÁSTROJŮ ŘEZNOU ZKOUŠKOU

Metodika testování monolitních frézovacích nástrojů řeznou zkouškou zajišťuje vysokou přesnost získávaných dat díky např. citlivosti a tuhosti měřicích aparatur KISTLER. Zkouška umožňuje opakovatelnost měření na shodných typech vzorků (pro statistické zpracování naměřených dat) a při zachování podmínek experimentu lze vzájemně porovnávat např. vlivy jednotlivých vývojových změn řezných nástrojů na trvanlivost.

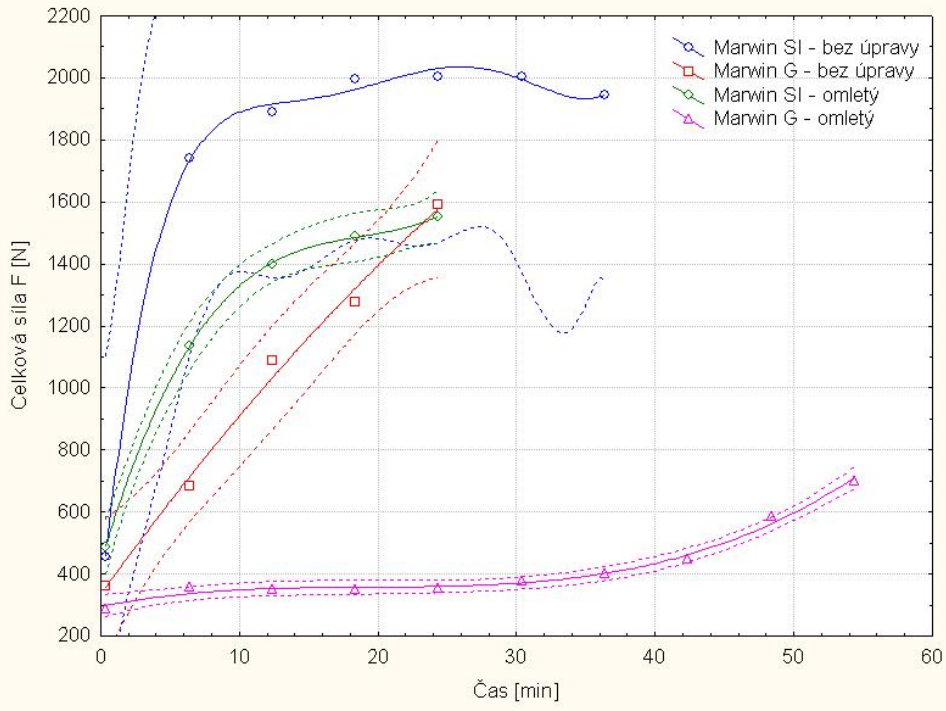
4.3.1 Řezné vlastnosti čelních monolitních fréz ϕ6 mm povlakovaných PVD metodami

Pro realizaci první experimentální zkoušky byly zvoleny monolitní čelní stopkové frézy ϕ6 mm s úhlem sklonu šroubovice ≈30°, výrobní označení EM2 6060–20 firmy Pramet Tools, s.r.o, výrobní šarže 0406214. Tyto frézy byly před PVD povlakováním vrstvami MARWIN G a MARWIN SI rozděleny do dvou skupin a pouze nástroje jedné skupiny byly dále mechanicky upravovány.

Povlak MARWIN G je na bázi nanovrstvé gradientní TOV. Je založen na (Ti,Al)N, tedy nevytváří nanokrystalický kompozit. Směrem od podkladu k povrchu postupně roste obsah Al a naopak klesá obsah Ti. V průřezu se střídají všechna složení povlaku, od téměř nulového obsahu Al na podkladu až po 80 % obsah Al na povrchu. Celková tloušťka povlaku je 1,75 µm a drsnost R_a = 0,11 µm.

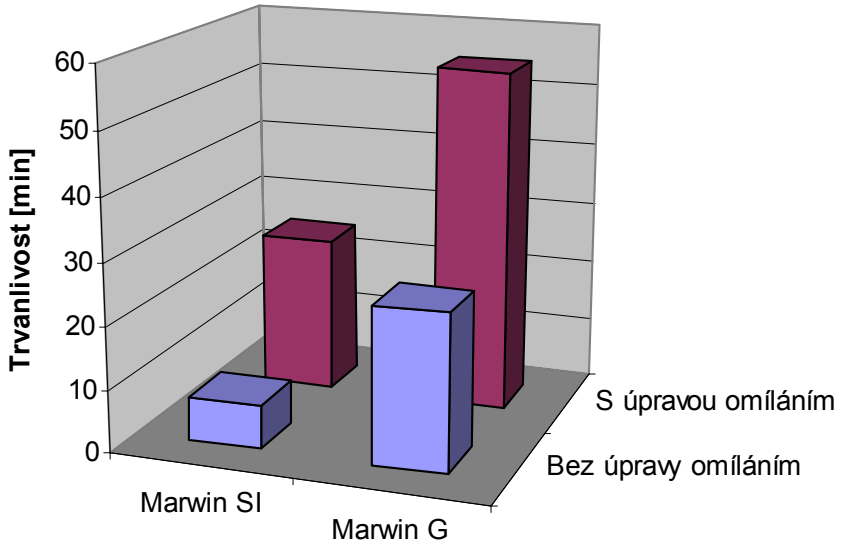
Povlak MARWIN SI je na bázi nanokrystalického kompozitu. Dle analýz XRD a HRTEM se ukazuje, že se jedná o nanokrystaly (Ti,Al)N o velikosti 3–5 µm rovnoměrně rozptýlené v amorfní matrici Si_3N_4. Tloušťka kontrolně měřená na plochých vzorcích byla 2,1 µm, drsnost povlaku R_a = 0,11 µm. Řazení jednotlivých vrstev bylo v pořadí od podkladu: adhezní vrstva TiN o tloušťce cca 0,2 µm – monovrstva (Ti,Al,Si)N (s maximální tvrdostí) o tloušťce 1,3–1,5 µm – monovrstva (Al,Si,Ti)N se zvýšenou odolností proti oxidaci o tloušťce cca 0,5 µm.

Grafické vyjádření bodových odhadů středních hodnot (z upravených datových souborů) jednotlivých analyzovaných nástrojů jsou na obr. 3. Statistickou analýzou[8,9,18] byl nalezen vhodný tvar pro aproximaci středních hodnot celkových sil *F* jako funkce času *t*.



Obr. 3 Průběhy celkových sil v závislosti na čase při nesousledném frézování monolitními nástroji ϕ6 mm

Výsledné grafické vyjádření hodnot trvanlivostí monolitních fréz při obrábění řeznými podmínkami a s rozdílnými typy povlaků i rozdílnými mikroúpravami před povlakováním je pro zvolené kritérium silového zatížení F = 1750 N uvedeno na obr. 4.



Obr. 4 Hodnoty trvanlivostí nástrojů pro smluvní kritérium F = 1750 N

4.3.2 Řezné vlastnosti monolitních fréz s kulovým čelem ϕ16 mm povlakovaných PVD metodami

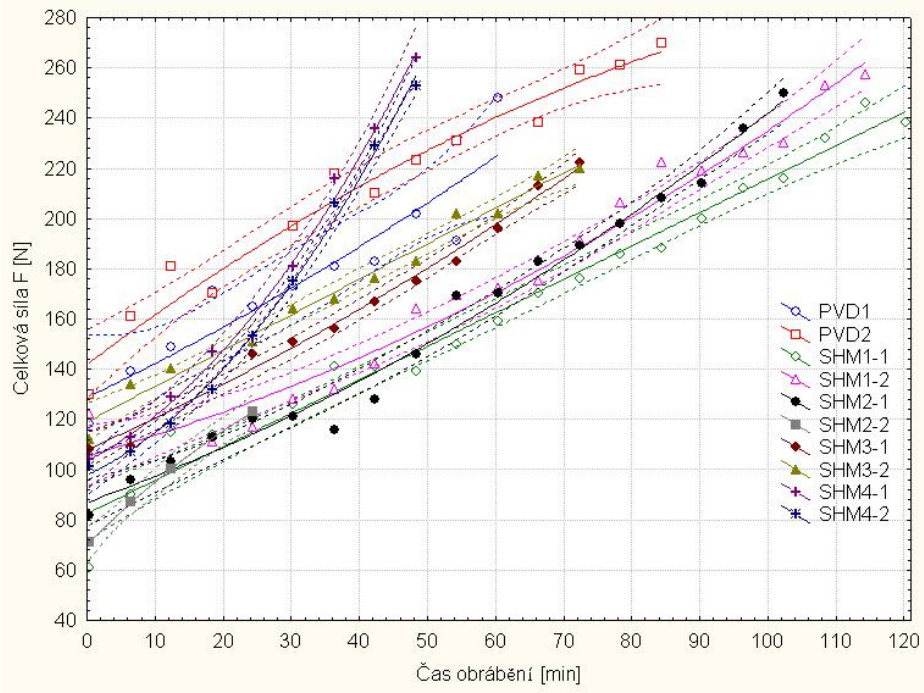
Druhý zde zpracovaný praktický experiment je zaměřen na testování řezných vlastností povlakovaných monolitních fréz s kulovým čelem, zachycení jejich rozdílů v mikrostruktuře i makrostruktuře a detailní analýzy umožňující jednotlivé typy nástrojů vzájemně porovnat, což vede k návrhu změn. Aplikace těchto změn je vhodná pro další zlepšení řezných vlastností nástrojů.

Pro tuto experimentální část práce byly zvoleny monolitní frézy:
D16x40-100/R8, FW412.16.100.16, výrobce Škoda Auto, a.s. (Tool - Výroba nářadí, Mladá Boleslav), v celkovém počtu 10 kusů. Slinuté karbidy kvality K10 obsahovaly submikrometrická zrna pod 0,5 μm a byly povlakovány vrstvami:

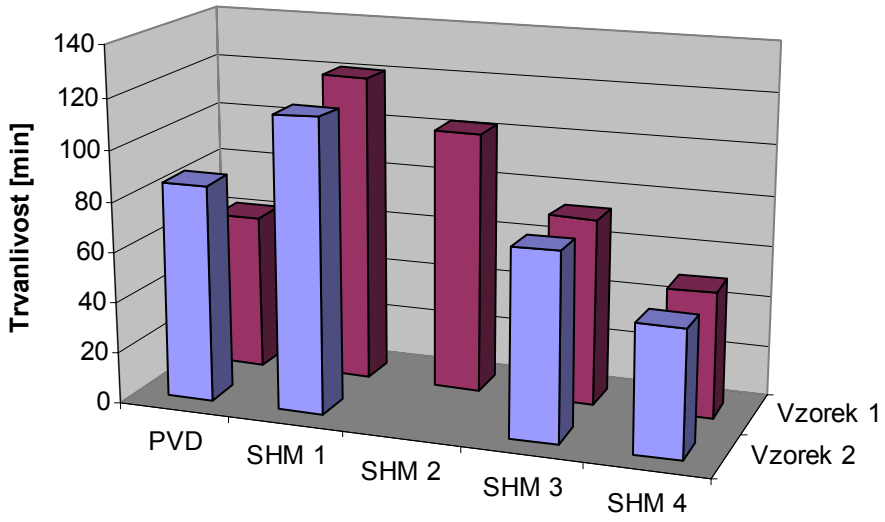
- PVD – ALNI;
- SHM 1 – G-(Al,Ti)N, gradientní, nanostrukturní;
- SHM 2 – MARWIN SI, (Ti,Al,Si)N, standardní, jednovrtvá;
- SHM 3 – MARWIN MT, (Ti,Al,Si)N, vícevrstvá;
- SHM 3 – M-(Ti,Al)N, vícevrstvá.

Analýza silového zatížení nástrojů prokázala pozvolný rozvoj opotřebení převážně hřbetních ploch fréz, přičemž celková síla (střední hodnota) pro celou trvanlivost nástrojů ležela v intervalu 71–270 N. Nástroje označené SHM 1 a SHM 2 vykazovaly výrazně delší trvanlivost ve srovnání s referenčními nástroji označenými jako PVD 1 a PVD 2. Oproti tomu nástroj označený SHM 3 neprokázal významné

prodloužení trvanlivosti a frézy s označením SHM 4 měly dokonce nižší trvanlivost (obr. 5 a 6).



Obr. 5 Průběhy celkové síly v závislosti na čase při nesousledném frézování pro všechny testované nástroje



Obr. 6 Grafické vyjádření dosažených hodnot trvanlivostí monolitních fréz při dosažení některého ze stanovených kritérií

4.4 ELEKTRONOVÁ FÁZOVÁ A STRUKTURNÍ ANALÝZA BŘITŮ ŘEZNÝCH NÁSTROJŮ PO OBRÁBĚNÍ

V dnešní době již zpravidla nestačí pouhé zaznamenání podmínek zkoušek, průběhů vybraných veličin opotřebení a jejich porovnání, ale je nutné najít příčiny lepší nebo horší řezivosti nástrojů a správně orientovat další vývoj[20]. Významné informace v této oblasti může poskytnout elektronová mikroskopie.

4.4.1 Analýza monolitních stopkových fréz ϕ6 mm

Fotografie a analýzy morfologie monolitních fréz zhotovené pomocí analytické elektronové mikroskopie poukazují na charakter břitů nástrojů. Prováděny jsou celkové pohledy na zub řezného nástroje, přičemž zvláště kontrastní je jejich zobrazení pomocí zpětně rozptýlených elektronů. BSE výrazněji odlišuje části povrchu řezného nástroje s naneseným povlakem od částí, kde nedošlo k vytvoření povlaku nebo kde byl povlak vlivem obrábění opotřebován.

Nedostatečné krytí řezného břitu povlakem na částech nástrojů, které se přímo nepodílely na procesu obrábění, lze dále dokumentovat na detailních fotografiích. Jedná se o nástroje bez úpravy břitů omíláním (MARWIN SI a MARWIN G).

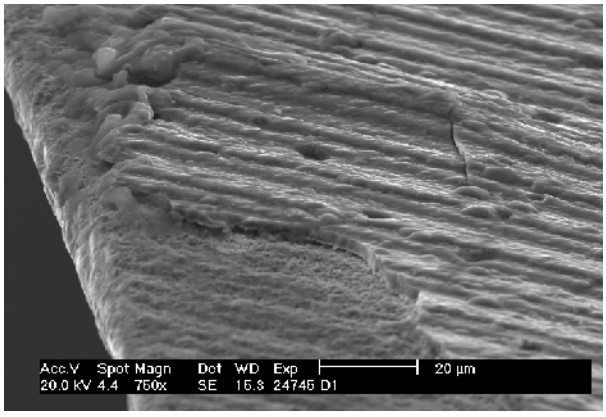
Optimální krytí břitu řezného nástroje vykazují monolitní frézy opatřené povlakem MARWIN G s úpravou břitu. Povlak díky vhodně zvolené úrovni předcházejícího omílání kryje břit rovnoměrně.

V jemnozrnné mikrostruktuře základního materiálu SK všech sledovaných vývojových monolitních fréz (jsou z jedné výrobní šarže) lze pozorovat karbidy o velikosti 1,6–1,8 μm. EDS analýzou byly dále prováděny kontroly chemického složení povlaků a základního materiálu břitů fréz.

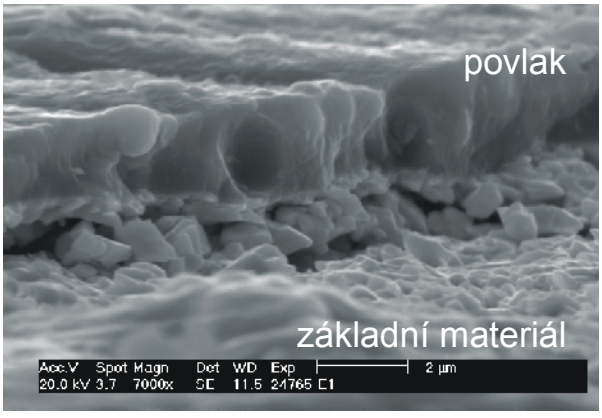
4.4.2 Analýza monolitních stopkových fréz s kulovým břitem ϕ16 mm

Monolitní stopkové frézy s kulovým břitem ϕ16 mm byly rovněž podrobeny kontrole prostřednictvím AEM, přičemž byly prokázány nedostatky např. typu makročástice v základním materiálu řezného nástroje. U monolitních fréz s označením SHM 3 byly pozorovány stopy v povlaku po mechanicky odstraněných makročásticích kartáčováním. V některých případech došlo i k obnažení SK, což může být způsobeno nedostatečnou adhezí povlaku k nástroji.

Zvolená intenzita a délka iontového čištění může mít v některých případech za následek snížení množství kobaltového pojiva v povrchové vrstvě. Následkem toho dochází k uvolňování zrn základního materiálu řezného nástroje, což bylo pozorováno u testovaných vzorků č. 1 i 2 – SHM 4 (obr. 7, 8).



Obr. 7 Dekoheze povlaku (Ti, Al, Si)N



Obr. 8 Detail dekoheze povlaku (Ti, Al, Si)N v místě absence pojiva

5 DISKUSE DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ

Již úvodní kapitoly této disertační práce poukazují na podíl řezných nástrojů ze SK, které jsou v celosvětovém měřítku používány pro obrábění[11]. Při snaze zvýšit produktivitu obrábění je pozornost zaměřena na zmenšování zrna tvrdých strukturních složek[13], z čehož vychází volba řezných nástrojů pro experimentální zkoušky. Uváděné analýzy realizované prostřednictvím elektronového mikroskopu však ukazují, že tyto jemnozrnné materiály monolitních frézovacích nástrojů mnohdy obsahují i makročástice WC o 100–200 % větší.

Jednou z technologických úprav řezných nástrojů, vedoucí ke zvýšení jejich trvanlivosti při obrábění, jsou aplikace tvrdých otěruvzdorných vrstev[3,23,28], které lze nanášet metodami CVD, PVD a jejich modifikacemi[12,32]. Mezi základní fyzikální vlastnosti povlaků patří tvrdost, tloušťka, drsnost, adheze a kluzné vlastnosti. Nejdůležitějšími chemickými vlastnostmi jsou odolnost vůči oxidaci, chemická a tepelná stabilita[25]. Pro měření všech těchto jednotlivých vlastností existují metody, které jsou v disertační práci charakterizovány a na základě analýzy jejich možností je pro komplexní testování povlakovaných monolitních fréz navržena metodika laboratorní řezné zkoušky smluvní. Jednotlivé dílčí metody měření vlastností povlaků jsou však rovněž využívány např. pro kontrolu technologického procesu povlakování nebo při hledání korelace s trvanlivostí řezného nástroje při obrábění. Složitost nalezení této korelace mezi laboratorními zkouškami jednotlivých vlastností povlaků a aplikačními vlastnostmi potvrzují i odborné články[17] věnující pozornost povlakům na řezných nástrojích.

Rozdíly mezi laboratorním měřením dílčích vlastností povlaků na rovinných zkušebních vzorcích a měřením shodných vlastností na frézovacích nástrojích byly prokázány. Z toho vychází i myšlenka návrhu experimentálního zařízení pro měření adheze povlaků k základnímu materiálu na hřbetních fazetách frézovacích nástrojů s břity ve šroubovici. Korelace výsledků scratchtestů a řezných zkoušek však prokazuje, že adheze nezbytná pro obrábění musí být vyšší než 40–50 N. Zvyšování adheze v intervalu 80–100 N však již na trvanlivost řezných nástrojů neprokazuje vliv.

Při snaze o zvýšení produktivity obrábění (zpravidla hrubování) je zapotřebí zmínit se i o makrogeometrii řezného nástroje. Aplikovaná úprava monolitních fréz omíláním v granulátech s brusnou pastou před procesem povlakování vede k zaoblení ostří, ke zlepšení adheze PVD vrstvy a ke zvýšení životnosti nástrojů, což potvrzují výsledky řezných zkoušek i elektronová analýza. Odborné články věnující pozornost mechanickým úpravám nástrojů[24] závěry těchto analýz rovněž potvrzují.

Maximalizováním objemu drážek řezných nástrojů dochází ke snadnějšímu odvodu třísek z místa řezu. To zajišťují stopkové frézy s menším počtem drážek, např. dvoubřité (aplikované v první experimentální části této disertační práce). Stopkové frézy čtyřbřité (aplikované v druhé experimentální části) se však svým průřezem více blíží realizovanému výpočtu teoretického modelu válcového nosníku. Znalost tuhosti nástrojů je důležitá především z důvodů bezpečnosti práce, přesnosti vyráběných součástí a výsledné drsnosti obrobeného povrchu[31]. Aplikace nástrojů

z HSS tedy může svým až o 30 % větším průhybem vzhledem ke shodnému typu nástroje ze SK způsobit např. odchylku od požadovaného tvaru výrobku. Navržený matematický model (je součástí disertační práce) výpočtu maximálního průřezu třísky se může zdát výrazně komplikovanější než užívaný model nahrazující cykloidy kružnicemi[2,29], umožňuje však stanovit tloušťku třísky přesněji, čímž doplňuje užívané výpočtové vztahy.

Aplikace řezných kapalin je obecně doporučována především pro chladicí, mazací a čisticí účinek[1]. Vhodné jsou řezné oleje i emulze, přičemž je zapotřebí použít mohutného proudu směřovaného přímo na ostří, aby se zabránilo nevhodnému střídavému ochlazování, které vede ke vzniku mikrotrhlin a praskání nástroje ze SK. Prodloužení životnosti řezného nástroje tedy na intenzitě proudění řezné kapaliny není přímo úměrné a v některých specifických případech může dokonce na řezný proces působit negativně[30]. Volba vhodného řezného prostředí pro daný způsob obrábění musí zajistit jakost obrobeného povrchu, vhodný průběh rozvoje silového zatížení nástroje při obrábění či typ utvářené třísky[16]. Obrábění zcela bez použití řezné kapaliny, které je realizováno v experimentální části této disertační práce, vykázalo životnost povlakovaného monolitního frézovacího nástroje více než 115 min. za daných podmínek obrábění (podmínky testování odpovídaly nasazení tohoto typu nástroje v praxi).

Volba řezných podmínek je v praxi zpravidla založena na doporučeních výrobce katalogem řezných nástrojů. Ve výše uvedených experimentech jsou však shrnuty testy fréz s vývojovými typy povlaků a např. s aplikací mechanické úpravy omíláním před povlakováním. Stanovení hodnot řezných podmínek pro řezné zkoušky proto muselo vycházet z předpokladů, z několika let (r. 2001–2007) studia literatury a praktických experimentů, při kterých autor této práce postupně získával zkušenosti.

Realizovaná měření řeznou zkouškou umožňují opakovatelnost experimentů a podávají dostatečně přesné informace o rozvoji silového zatížení povlakovaných monolitních frézovacích nástrojů v průběhu celé jejich životnosti[20]. Pro záznam sledované veličiny není nutné přerušit obrábění, jako je tomu při měření ploch opotřebení podle normy[7]. Automatické monitorování relativních přírůstků celkových sil u frézování nebo sledování axiální (posuvové) složky u soustružnických nástrojů[10] je možno využít i pro bezobslužná pracoviště, vybavená integrovaným snímačem sil nebo výkonu obrábění. Popisovaná metodika testování dále umožní výrobcům řezných nástrojů dostatečně přesně porovnat jednotlivé výrobky a může být úspěšně aplikována i při stanovování hodnot doporučených řezných podmínek a času doporučované trvanlivosti fréz. Charakterizovaná metodika analýzy nástrojů nahrazuje některé metody výpočtové a je ověřována při spolupráci v oblasti vývoje a testování řezných nástrojů s firmami:

- SHM, s.r.o.;
- LISS, a.s.;
- S&K Tools, spol. s r.o.;
- CzechCoating, s.r.o.;

- Pramet Tools, s.r.o.;
- Pivot, a.s.;
- PVD tech, spol. s r.o.;
- ZPS – FRÉZOVACÍ NÁSTROJE, a.s., Zlín.

Datové soubory získané řeznou zkouškou je možno analyzovat v mnoha statistických softwarech. Přímý výpočet základních údajů popisné statistiky by však mohl vést i ke zpracovávání hodnot, které nejsou zaznamenány v průběhu odebírání třísek řezným nástrojem. Aplikace vytvořeného specializovaného programu Filtr (který je přílohou disertační práce) usnadnila a výrazně urychlila proces zpracování datových souborů pro import do softwaru Statistica 6.0, kde již bylo možno hodnoty silových složek (silové výslednice) statisticky zpracovávat a analyzovat. Vhodnost např. uváděných regresních funkcí je posuzována z různých hledisek, mezi něž lze řadit i hledisko, zda tvar funkce vyhovuje představě o charakteru zkoumaného vztahu[9].

Realizovaná obrazová analýza frézovacích nástrojů po řezných zkouškách prostřednictvím stereomikroskopu umožňuje hodnotit stav opotřebení nástroje po obrábění. Nezachycuje však detaily, které bylo vhodnější analyzovat pomocí elektronové mikroskopie. Zde se ukázaly některé významné nedostatky, které vedly ke snížení trvanlivosti testovaných monolitních frézovacích nástrojů. Nyní je zaměřena pozornost na odstranění těchto zjištěných nedostatků.

6 ZÁVĚR

Dílčí závěry teoretických studií i praktických experimentů uváděné v disertační práci byly publikovány formou příspěvků na národních i mezinárodních vědeckých konferencích i formou doktorandské grantové soutěže. Výsledky výzkumu monolitních fréz s kulovým čelem byly rovněž úspěšně aplikovány v praxi při výběrovém řízení pro firmu Škoda Auto, a.s., pro výrobu ohýbacích nástrojů.

Realizované teoretické studie vedly k závěrům:

- Z kvantifikace rozdílů v deformaci HSS a SK nástrojů je patrný nelineární průhyb frézy ze SK, který činil v délce 50 mm přibližně 30 % hodnot vůči HSS.
- Vytvořený matematický model a kvantifikace maximální plochy průřezu třísky vznikající při obrábění frézou s kulovým čelem lze aplikovat pro široký rozsah technologických podmínek obrábění. Umožňuje přesněji stanovit hodnoty, které mají vliv na velikost měrné řezné síly a kontaktní tlaky. Tato data mohou dále sloužit k napjatostně deformační analýze záběru břitu nástroje nebo zatížení obrobku.

Experimentální řezné zkoušky povlakovaných monolitních frézovacích nástrojů ϕ6 mm s mechanickou úpravou omíláním a bez této úpravy prokázaly:

- Omílání je vhodnou mechanickou úpravou před povlakováním monolitních frézovacích nástrojů z hlediska kvality, reprodukovatelnosti i ceny. Jeho úspěšná aplikace je však závislá i na detailech jako je doba rotace nástrojů proti břitům a doba rotace po břitech.
- Zaoblením hran při omílání se úspěšně eliminují vady vzniklé při broušení a zlepšuje se adheze povlaku na břitech.
- U testovaných fréz vedla mechanická úprava omíláním ke stabilizaci řezného procesu, snížení velikosti celkových řezných sil i k prodloužení životnosti řezných nástrojů.
- Nejlepších výsledků bylo dosaženo pro PVD povlak MARWIN G 0506-0518 s úpravou omíláním v granulátech, který za daných podmínek obrábění umožnil bezpečně a stabilně frézovat více než 40 min (měření ukončeno po cca 58 minutách).
- Vzhledem k tomu, že z dané skupiny vývojových vzorků nástrojů prokázal výjimečné výsledky jediný typ monolitní stopkové frézy, pak další výzkum a vývoj by se měl zaměřit na optimalizaci mechanické úpravy nástroje omíláním a zavedený režim povlakování MARWIN G 0506-0518. Opakováním měření více vzorků by bylo dosaženo vyšší statistické spolehlivosti a další optimalizace obou režimů – omílacího i povlakovacího.

Experimentální zkoušky vývojových povlakovaných monolitních fréz s kulovým čelem ϕ16 mm prokázaly:

- Řezná zkouška je vhodnou metodou pro sledování rozvoje silového zatížení nástroje, pomocí které je možno hodnotit (srovnávat) kvalitu povlakovaných monolitních fréz.
- Nárůst celkových sil u testovaných fréz s kulovým čelem byl v průběhu celé životnosti nástrojů převážně lineární, přičemž za limitní hodnotu lze považovat pro dané podmínky obrábění sílu F = 250 N.
- Za daných podmínek obrábění bylo nejlepších výsledků dosaženo s frézami s kulovým čelem s označením SHM 1 na bázi (Al,Ti)N, které umožnily účinné obrábění po dobu víc než 115 minut bez potřeby chlazení.
- Vliv tloušťky ani drsnosti povlaku na trvanlivost řezného nástroje se prokázal.

Analýzy elektronovou mikroskopií prokázaly:

Monolitní frézy ϕ6 mm:

- U všech nástrojů s výjimkou MARWIN G s úpravou omíláním byla pomocí elektronového mikroskopu pozorována a zdokumentována zhoršená kvalita povlakování hlavního ostří.
- Kvalitu SK (velikost zrn cca 0,6 μm) lze považovat za vyhovující, přestože obsahoval i karbidy o velikosti 1,6–1,8 μm. Analýzou nebyly pozorovány mikrolomy fréz ani výrazná nehomogenita.

Monolitní frézy ϕ16 mm:

- Byly zaznamenány makročástice WC v základním materiálu (SK).
- U nástrojů s označením SHM 4 došlo k dekohezi povlaku a byla nalezena chyba v technologii iontového čištění řezného nástroje před PVD povlakováním (je nutno zkrátit dobu a snížit intenzitu tohoto čištění).
- Makročástice Ti v povlaku lze odstranit mechanickými úpravami např. kartáčováním po povlakování. U nástroje SHM 3 však odstraněním některých makročástic došlo i k odkrytí základního materiálu řezného nástroje.

Ostatní podstatné výstupy disertační práce:

- Byl vytvořen specializovaný software s názvem Filtr, který usnadňuje a urychluje zpracování datových souborů, zaznamenaných v ASCII formátu do PC při řezných zkouškách. Jeho funkce byla ověřena a výstupní (modifikované) datové soubory byly dále zpracovávány statistickými softwary.
- Analýza textury povrchu povlakovaného monolitního řezného nástroje s kulovým čelem ϕ16 mm prokázala vyšší hodnoty drsnosti než měření TOV rovinných zkušebních vzorků. Tato zvýšená drsnost byla způsobena

kopírováním textury povrchu základního materiálu monolitního frézovacího nástroje, která vznikla broušením.

- Měření adheze TOV ke SK všech testovaných povlakovaných nástrojů prokázalo, že hodnoty zátěžné síly scratchtestu, která způsobí oddělení povlaku, jsou vyšší než 70 N.
- Studie jakosti obrobeného povrchu prokázala hodnoty drsnosti R_a = 0,28–0,33 μm v průběhu celé trvanlivosti monolitního frézovacího nástroje ϕ6 mm s povlakem MARWIN SI bez úpravy omíláním. Vliv mechanické úpravy omílání ani rozdíl při nanesení povlaku MARWIN G na shodné monolitní frézovací nástroje se neprojevil.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

1 ARMAREGO, E.J.A.; BROWN, R.H. *The machining of metals.* Prentice-Hall, New Jersey, 1969. 437 s.

2 BUDAK, E.; LAZOGLU, I.; GUZEL, B.U. Improving Cycle Time in Sculptured Surface Machining Through Force Modelling. *Annals of The CIRP,* Vol. 53/1/2004, p. 103-106.

3 BUNSHAH, R.F. et al. *Handbook of Hard Coatings.* Norwich, New York, USA: Noyes Publications/William Andrew Publishing, LLC. 2001. 550 p. ISBN 0-8155-1438-7.

4 BUNSHAH, R.F. *Handbook of hard coatings.* Noyes Publications / William Andrew Publishing, N. York. 2001. p. 550. ISBN 0-8155-1437-7.

5 CSELLE, T.; HOLUBAR, P. Driving forces of today´s manufacturing technology. In *Frézování III.* Brno. FSI VUT v Brně, 2003. p. 33-62. ISBN 80-214-2436-2.

6 CSELLE, T. With High Performance Machining and Flexible Coating. In *Gorham Conference. Cutting Tools and Machining System.* Atlanta. May 21-23. 2001. GA. USA.

7 ČSN ISO 8688-2. Skúšanie trvanlivosti pri frézovaní. FÚNM, 1993. 31 p.

8 HEBÁK, P.; HUSTOPECKÝ, J. *Průvodce moderními statistickými metodami.* 1. vyd. Praha: SNTL, 1990. 296 s. ISBN 80-03-00534-5.

9 HEBÁK, P.; KOZÁK, J.; ŽVÁČEK, J. *Vícerozměrné statistické metody.* 1. vyd. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1982. 267 s. 17-040-82.

10 HUMÁR, A.; BUMABÁLEK, B. Vzájemná souvislost řezné síly a opotřebení nástroje. *Strojírenství.* 1984. 6(7). 34 p.

11 HUMÁR, A. *Materiály pro řezné nástroje. Interaktivní multimediální texty pro všechny studijní programy FSI.* [online]. 2006. [cit. 2007-05-01]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory/mat_pro_rez_nastroje/materialy_pro_rezne_nastroje_v2.pdf.

12 HUMÁR, A. Trendy vývoje materiálů pro řezné nástroje. In *Frézování III.* Brno. FSI VUT v Brně, 2003. p. 5-14. ISBN 80-214-2436-2.

13 HUMÁR, A.; PÍŠKA, M. Materiály pro řezné nástroje. *MM Průmyslové spektrum – Speciální vydání.* Září 2004. s. 84-96. ISSN 1212-2572.

14 JANDEČKA, K. Obrábění od A do Z. *Computer Design.* 2004. 2004/4. p. 18-19 ISSN 1212-4389.

15 JONES, M.I.; McCOLL, I.R.; GRANDT, D.M. Effect of Substrate Preparation and Deposition Conditions on the Preferred Orientation of TiN Coatings Deposited by RF Reactive Sputtering. *Surface and Coatings Technology.* 2000. Vol.132. p. 143-151.

16 KLOCKE, F.; EISENBLÄTER, G. Dry Cutting. *Annals of the CIRP.* 1997. vol. 46, no. 2, p. 519-526.

17 KŘÍŽ, A.; ZETEK, M. Aplikace tenkých nanokrystalických vrstev na řezné nástroje. In *Vrstvy a povlaky 2004.* Rožnov pod Radhoštěm, 2004. p. 17-22. ISBN 80-968337-8-2.

18 MAROŠ, B. *Empirické modely I.* Analýza inženýrského procesu. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2001. 112 s. ISBN 80-214-1984-9.
19 PÍŠKA, M. Quantitave Assessment of PVD Coatings and Cooling Fluids on the Drilling Performance and Wear of HSS Drills when Machining of Hardened Steel. In *Intertribo 2002.* Stará Lesná-Tatranská Lomnica. 14.–17.11.2002. Slovensko. p. 59-64. ISBN 80-233-0476-3.
20 PÍŠKA, M. Teoretický a realizační přístup k testování řezných nástrojů na VUT FSI v Brně. In *Frézování I.* Brno. FSI VUT v Brně, Ústav strojírenské technologie. 1999. p. 57-66. ISBN 80-214-1425-1.
21 PISKA, M.; POLZER, A. Wear of Coated Solid Carbide End Mills when Machining of Hardened Steels in Dry Conditions. In *International Tools Conference „Tools 2003“.* Zlín, UTB ve Zlíně. 2003. p. 40-49. ISBN 80-7318-135-5.
22 SREJITH,P.S.; NGOI, B.K.A. *Dry Machining: Machining of the Future. J. of Material Processing Technology.* 2000. Vol.101. p. 287-291.
23 ŠÍMA, M.; HOLUBÁŘ, P.; JÍLEK, M.; ZINDULKA, O.; RŮŽIČKA, M. Moderní PVD povlaky pro řezné aplikace a tváření. In *Vrstvy a povlaky.* 2004. Rožnov pod Radhoštěm. ISBN 80-968337-8-2.
24 ŠÍMA, M., JANKŮ, R. Mechanická úprava monolitních nástrojů před PVD povlaky. *MM Průmyslové spektrum.* Duben 2007. s. 72-73. ISSN 1212-2572
25 ŠÍMA, M.; ZINDULKA, O. Měření vlastností povlaků na nástrojích. *MM průmyslové spektrum.* 6/2004. ISSN 1212-2572.
26 TÖNSHOFF, H.K.; KARPUSCHEWSKI, B.; MOHLFELD, A.; SEEGERS, H. Influence of Subsurface Properties on the Adhesion Strength of Sputtered Hard Coatings. *Surface and Coatings Technology.* 1999. Vol.116-119. p. 524-529.
27 TUFFY, K et al. Determination of The Optimum TiN Coating Thickness on WC Inserts for Machnining Carbon Steels. In *Proceedings of the International Conference on Advances in Materials and Processing Technologies.* Dublin. 2003. Vol. I. p. 73-75. ISBN 1 872327 397.
28 VEPREK, S.; JILEK, M. Super and Ultra Hard Nanocomposite Coatigs: Generic Koncept for their Preparation. *Properties and Industrial Applications.* Vacuum, 67. 2003. p. 443-449.
29 YOON, M.C.; KIM, Y.G. Cutting Dynamic Force Modelling of Endmilling Operation. In *Advances in Materiále and Processing Technologies 2003.* Dublin, 2003, Vol. II, p. 811-814. ISBN 1 872327 397.
30 ZEMAN, P. Řezné prostředí a jeho účinky na řezný proces. In *Frézování IV*. Brno, FSI VUT v Brně. 2007. p. 19-26. ISBN 80-214-3239-X.
31 ZEMAN, P. Technologické zkoušky ve CVSVTT. In *Frézování IV*. Brno, FSI VUT v Brně. 2007. p. 33-36. ISBN 80-214-3239-X.
32 ZINDULKA, O. Moderní metody povlakování nástrojů. *MM průmyslové spektrum.* 10/2004. ISSN 1212-2572.

SEZNAM VLASTNÍCH PRACÍ VZTAHUJÍCÍCH SE K TÉMATU DISERTAČNÍ PRÁCE

1 CIHLAROVA, P.; PISKA, M.; POLZER, A.: The Effect of External and Internal Cooling on Drilling Process. In *IX. medzinárodné sympózium INTERTRIBO 2006*. Vysoké Tatry - Stará Lesná, KONGRES management s.r.o. 2006. p. 64-67. ISBN 80-969365-7-3.

2 CIHLÁŘOVÁ. P.; POLZER. A. Cutting performance of ball coated cemented carbide cutters. In *HONEYWELL EMI 2005*. Brno, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Fakulta informačních technologií a Fakulta strojního inženýrství. 2006. p. 153-157. ISBN 80-214-2942-9.

3 CIHLÁŘOVÁ, P.; POLZER, A.; JULIŠ, M. Vrtání siluminu s duplexními a triplexními PVD povlaky. In *FSI Junior Conference 2005*. Brno. FSI VUT v Brně. 2007. p. 16-20. ISBN 978-80-214-3365-6.

4 CIHLÁŘOVÁ, P.; POLZER, A.; VAŠÍK, P. Komplexní analýza řezivostních vlastností moderních HSS fréz. In *FSI Junior Conference 2004*. Brno. FSI VUT v Brně. 2005. p. 10-14. ISBN 80-214-2934-8.

5 KOCMAN, K.; HUMÁR, A.; SIEGEL, M.; ČERMÁK, J.; POLZER, A.; CIHLÁČOVÁ, P. Výzkumný záměr MSMT 262100003: Rozvoj vysoce přesných strojírenských technologií. *Obrábění progresivních konstrukčních keramik.* Brno. FSI VUT v Brně. Ústav strojírenské technologie. 2004. 49 p.

6 PÍŠKA, M.; CIHLÁŘOVÁ. P.; POLZER, A. *Moderní testování řezivosti nástrojů.* [online]. 2004. Dostupné z: http://www.fme.vutbr.cz/opory/

7 PÍŠKA, M.; HUMÁR, A.; POLZER, A.; CIHLÁŘOVÁ, P. Analýza řezivosti povlakovaných HSS fréz pomocí rozboru silového zatížení. Výzkumný záměr MSMT 562100003: Rozvoj progresivních vysoce přesných strojírenských technologií. *Dílčí výzkumná zpráva.* Brno. FSI VUT v Brně. Ústav strojírenské technologie. 2002. 72 p.

8 PÍŠKA, M.; HUMÁR, A.; POLZER, A.; CIHLÁŘOVÁ, P. Drilling of galss fibre reinforced plastics: Cutting forces and wear. In *TRANSFER 2003*. Trenčín, GC-TECH, Ing. Peter Gerši. 2003. p. 345-353. ISBN 80-8075-001-7.

9 PÍŠKA, M.; POLZER, A. Force analysis of up and down milling with end solid mills. *In CO-MAT-TECH 2004*. Trnava, Vydavatelstvo STU v Bratislave. 2004. p. 165-165. ISBN 80-227-2121-2.

10 PÍŠKA, M.; POLZER, A. Opotřebení povlakovaných celokarbidových fréz při obrábění zušlechtěných ocelí za sucha. In *International Tools Conference „TOOLS 2003“*. Zlín, UTB ve Zlíně. 2003. p. 40-40. ISBN 80-7318-135-5.

11 PÍŠKA, M.; POLZER, A. Studie řezivosti hrubovacích fréz z produkce ZPS-FN, a.s., Zlín. In *Frézování III* . Brno, VUT FSI v Brně, Ústav strojírenské technologie. 2003. p. 145-159. ISBN 80-214-2436-2.

12 PÍŠKA, M.; POLZER, A. Vliv technologie výbrusu na množství zbytkového austenitu. In *Frézování IV*. Brno, FSI VUT v Brně. 2007. p. 115-122. ISBN 80-214-3239-X.

13 PÍŠKA, M.; POLZER, A. Wear of Coated Solid Carbide End Mills when Machining of Hardened Steels in Dry Conditions. In *International Tools Conference „Tools 2003“*. Zlín, UTB ve Zlíně. 2003. p. 40-49. ISBN 80-7318-135-5.

14 POLZER, A.; CIHLÁŘOVÁ, P.; POSPÍŠILOVÁ, S. Stanovení měrných veličin technologie broušení a fázová analýza HSS k eliminaci křehkého porušování nástrojů. In *FSI Junior Conference 2005*. Brno. FSI VUT v Brně. 2005. ISBN 978-80-214-3365-6.

15 POLZER, A.; CIHLÁŘOVÁ, P.; VAŠÍK, P. Elektronová fázová a strukturní analýza celokarbidových nástrojů. In *FSI Junior konference 2004*. Brno, FSI VUT v Brně. 2005. ISBN 80-214-2934-8.

16 POLZER, A.; PÍŠKA, M. Workpiece Thermal Fields when Machining in Dry and Wet Cooling Environment. In *IX. medzinárodné sympózium INTERTRIBO 2006*. Vysoké Tatry - Stará Lesná, KONGRES management s.r.o. 2006. p. 60-63. ISBN 80-969365-7-3.

17 POLZER, A. Rozvoj monolitních frézovacích nástrojů pro efektivní obrábění kovových materiálů bez použití chlazení. In *Mezinárodní vědecká konference*. Ostrava, VŠB TU Ostrava, Fakulta strojní. 2005. p. 27-27. ISBN 80-248-0895-1.

18 VAŠÍK. P.; PÍŠKA, M.; POLZER. A., Analýza plochy řezu vznikající při obrábění frézou s kulovým čelem. In *Moderní matematické metody v inženýrství*. Ostrava. 2005. VŠB - TU Ostrava. p. 214-217. ISBN 80-248-0951-6.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

označení	jednotka	popis proměnné
a_p	mm	axiální šířka záběru
a_e	mm	radiální šířka záběru
n	min^{-1}	otáčky nástroje
v_f	$mm . min^{-1}$	posuvová rychlost
E	Pa	Youngův modul pružnosti
F	N	celková síla
F_1	N	celková síla vyvolaná řeznou částí jednoho břitu
F_{c1}	N	řezná síla působící jedním břitem frézy na obrobek
F_{cN1}	N	kolmá řezná síla působící jedním břitem na obrobek
F_{f1}	N	posuvová síla působící na jeden břit frézy
F_{h1}	N	horizontální síla působící v ortogonální rovině na jeden břit
F_{p1}	N	pasivní síla působící na jeden břit frézy
F_{tr1}	N	transversální síla působící v ortogonální rovině na jeden břit
F_{v1}	N	vertikální síla působící v ortogonální rovině na jeden břit
F_x	N	silová složka dynamometru pro měření zatížení v ose X
F_{x1M}	N	síla působící v ose X stroje a snímače a na jeden břit frézy
F_y	N	silová složka dynamometru pro měření zatížení v ose Y
F_{y1M}	N	síla působící v ose Y stroje a snímače a na jeden břit frézy
F_z	N	silová složka dynamometru pro měření zatížení v ose Z
F_{z1M}	N	síla působící v ose Z stroje a snímače a na jeden břit frézy
$G_{(x)}$	Pa	modul pružnosti ve smyku v bodě x
J	m^4	kvadratický moment setrvačnosti
$J_{y(x)}$	m^4	kvadratický moment setrvačnosti v bodě x
$J_{p(x)}$	m^4	polární moment setrvačnosti v bodě x
l	mm	délka vzorku
$M_{k(x)}$	N . m	krouticí moment v místě x
$M_{y(x)}$	N . m	ohybový moment v bodě x
Ra	μm	střední aritmetická úchylka profilu
$T_{z(x)}$	N	posouvající síla (řezná síla) v místě x
W	J	energie napjatosti zatížené frézy
w_F	m	průhyb ve směru působící síly
x	mm	vzdálenost od působící síly
x, y, z	mm	souřadnice kartézského souřadného systému
y(x)	mm	průhybu vzorku v závislosti na vzdálenosti od působící síly
φ_M	rad	úhel pootočení (zkroucení) ve směru působící síly
$\varphi(x)$	rad	úhel pootočení (zkroucení) v závislosti na vzdálenosti od působící síly

zkratka	**popis**
AEM	analytická elektronová mikroskopie
BSE	*Back Scattered Electrons* – zpětně odražené elektrony
CVD	*Chemical Vapour Deposition* – chemická metoda povlakování
EDS	analýza fází
HRTEM	*High-resolution TEMs* – TEM s vysokým rozlišením
HSS	*High Speed Steel* – nástrojová rychlořezná ocel
KNB	kubický nitrid boru
PVD	*Physical Vapour Deposition* – fyzikální metoda povlakování
REM	rastrovací elektronová mikroskopie
SK	*Solid Carbide* – slinutý karbid
TOV	tvrdá a otěruvzdorná vrstva
XRD	rentgenová difrakce

AUTOROVO CV

Osobní údaje

Jméno:	Ing. Aleš POLZER
Adresa:	Kubíčkova 11, 635 00 Brno, Česká republika
Telefon:	5 4114 2545
E-mail:	polzer@fme.vutbr.cz

Vzdělání

od 2002	Vysoké učení technické v Brně, FSI, Ústav strojírenské technologie, doktorské studium, obor Technologie obrábění
1997 – 2002	Vysoké učení technické v Brně, FSI, Ústav strojírenské technologie, obor Technologie obrábění.
1993 – 1997	ISŠ COP Olomoucká 61, Brno, obor Mechanik seřizovač pro obráběcí stroje a linky.

Průběh praxe

od 1.10. 2005	Asistent, Vysoké učení technické v Brně, FSI, ÚST, Odbor technologie obrábění.
1.12.2003 - 30.9.2005	Technický pracovník, Vysoké učení technické v Brně, FSI, ÚST, Odbor technologie obrábění
1.2.2002 - 30.6.2002	Technický pracovník, Vysoké učení technické v Brně, FSI, ÚST, Odbor technologie obrábění.

Dovednosti Práce s PC: Windows, Office, CAD/CAM systémy, CNC, www a další.

Řidičský průkaz A1, B.

Jazykové znalosti ANGLIČTINA - mírně pokročilý,
NĚMČINA - mírně pokročilý.

Zájmy Sport, počítače (CAD/CAM systémy a CNC), technika, cestování.

Cíl Zajímavá práce v tvůrčím kolektivu progresivní firmy s možností dalšího profesního a osobního růstu a rozvoje.

ABSTRAKT

Rozvoj materiálových a počítačových věd aplikovaných do výrobních procesů umožnil efektivní obrábění tvarově komplikovaných forem a zápustek povlakovanými monolitními frézovacími nástroji a bez použití řezné kapaliny. Výzkum v této disertační práci je zaměřen především na rozbor současného stavu problematiky, na specifikaci vhodné komplexní metodiky testování těchto nástrojů i na zvyšování jejich trvanlivosti v závislosti na jejich geometrii i technologii povlakování. Bylo shledáno, že doporučovaná struktura základního materiálu řezného nástroje se zrny o velikosti pod 0,5 μm, kvalita povrchů břitů řezných nástrojů, druhy PVD povlaků i vlastní technologie povlakování jsou u jednotlivých výrobců výrazně odlišné. V práci byla provedena kvantifikace některých rozdílů pro soudobé i nově vyvíjené řezné nástroje aplikací komplexní metody testování, která umožňuje optimalizovat proces jejich výroby i využití ve strojírenské praxi.

ABSTRACT

Progress on material and computer sciences applied on production processes has allowed an effective machining of complex mechanical parts and moulds, especially with use of coated monolithic milling cutters and without any need of cooling fluids.

The subject of research conducted in this dissertation work is focused on a theory of the art, specification of a complex cutting test performance methodology and enhancement of the tool life by means of design of the cutting edge and the coating technology. It has been found that the recommended structure of substrate for cutting tools with grain size bellow 0.5 μm in common, quality of cutting tool surfaces, sorts of PVD coatings and moreover the cutting technology for various producers are different significantly. A precise quantification of the differences for the nowadays and new cutting tools by a complex methodology is done, that allows an optimisation of the cutting tool production and its use in manufacturing practise.