VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice PhD Thesis, sv. 750

ISSN 1213-4198

Ing. Zdeněk Fiala

Analýza měrných řezných sil pro nové obráběné materiály a CNC technologie

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

Ing. Zdeněk Fiala

ANALÝZA MĚRNÝCH ŘEZNÝCH SIL PRO NOVÉ OBRÁBĚNÉ MATERIÁLY A CNC TECHNOLOGIE

ANALYSIS OF SPECIFIC CUTTING FORCES
FOR NEW MATERIALS AND CNC MACHINING

Zkrácená verze Ph.D. Thesis

Obor:	Strojírenská technologie
Školitel:	prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Oponenti:	doc. Ing. Pavel Bach, CSc.
	Ing. et Ing. Mgr. Jana Petrů, Ph.D.
Datum obhajoby:	16. dubna 2014

Klíčová slova
Měrná řezná síla, kompozit, VB opotřebení, zvukové spektrum, dominantní frekvence

Keywords
Specific cutting force, composite, flank wear, sound spectrum, dominant frequency

Místo uložení práce:
Areálová knihovna Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně
Technická 2896/2, 616 69 Brno

© Zdeněk Fiala, 2014
ISBN 978-80-214-5000-4
ISSN 1213-4198

Obsah

1 ÚVOD 5
2 CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE 7
3 MĚRNÁ ŘEZNÁ SÍLA (MĚRNÝ ŘEZNÝ ODPOR) 8
4 NOVÉ OBRÁBĚNÉ MATERIÁLY – KOMPOZITNÍ MATERIÁLY 9
4.1 Obrábění kompozitních materiálů 9
5 ANALÝZA MĚRNÝCH ŘEZNÝCH SIL PŘI FRÉZOVÁNÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ 11
5.1 Specifikace obráběných materiálů 11
5.2 Specifikace nástrojů použitých pro obrábění kompozitů 11
5.3 Průběh měrných řezných sil při změně řezných podmínek 11
5.3.1 Změna posuvu 12
5.4 Vliv opotřebení nástroje na hodnoty měrných řezných sil 15
5.5 Měrné řezné sily při obránění nástroji s rozličnými typy povlaků 16
5.5.1 Celkové porovnání k_C testovaných nástrojů 18
6 VZTAH MĚRNÁ ŘEZNÁ SÍLA – DOMINANTNÍ FREKVENCE OBRÁBĚCÍHO PROCESU 18
6.1 Referenční měření pro ocel 15 260.7 19
6.2 Měření pro sklo-polyesterový kompozitní materiál 21
7 ZÁVĚRY 24
Reference 26

1 ÚVOD

Důraz, kladený na snížení hmotnosti výrobků při zachování jejich mechanických vlastností a spolehlivosti funkce, je ve všech průmyslových odvětvích impulzem pro vývoj nových materiálů. Neustále se zvyšuje poptávka po materiálech s příznivým poměrem pevnosti a hustoty, mezi tyto materiály beze sporu patří i kompozitní materiály. Spotřeba kompozitních materiálů ve světě i v ČR neustále stoupá (ročně o více než 10%). Hlavní uplatnění dnes nacházejí kompozitní materiály v leteckém průmyslu (v ČR především při výrobě nosných částí malých sportovních letounů), jedná se zejména o kompozity se skelnými nebo uhlíkovými vlákny (výztuží), které jsou dohromady vázány pojivem (matricí), nejčastěji se jedná o organické polymery nebo umělé pryskyřice [1,2]. Kompozity (především s uhlíkovými vlákny) se začínají stále více prosazovat i v automobilovém průmyslu, kde je u nových vozů kladen důraz na snižování hmotnosti a s tím spojené spotřeby paliva. Kompozitní materiály mají v porovnání s tradičními kovovými materiály řadu výhod např. vyšší poměr pevnost/tuhost, odolnost proti korozi, nízkou tepelnou vodivost, elektroizolační vlastnosti, tlumení zvukových vln atd.

Mezi nejčastěji realizované obráběcí operace při zpracovávání kompozitních materiálů patří řezání (dělení), vrtání (otvory pro spojení dílců), soustružení a frézování (obrábění výsledného tvaru). Volba řezných podmínek a nástrojů pro obrábění kompozitních materiálů je náročná a vyžaduje pečlivý přístup. Je třeba brát v úvahu několik aspektů [2]:

- rozdílné mechanické vlastnosti vláken výztuže v příčném a podélném směru,
- vysoké hodnoty tahové pevnosti vláken, které výrazně zvyšují rychlost abrazivního opotřebení řezného nástroje, kdy dochází ke tření mezi přerušeným vláknem a hřbetem břitu nástroje,
- nízká tepelná odolnost, kdy při překročení tzv. kritické teploty při obrábění může dojít k poškození struktury matrice,
- nízká tepelná vodivost (teplo odvádí z místa řezu v největší míře nástroj).

Pro obrábění kompozitních materiálů je možné použít širokou škálu řezných nástrojů, mohou být použity nástroje z rychlořezné oceli (HSS), slinutých karbidů (SK), polykrystalického diamantu (DLC) atd. Při použití nástrojů z HSS musí být brána v úvahu jejich krátká životnost, která je způsobena rychlým abrazivním opotřebením, zapříčiněným třením přerušených vláken výztuže o hřbet nástroje. Nejčastěji se dnes používají pro obrábění kompozitů nástroje z polykrystalického diamantu, popřípadě nástroje ze slinutých karbidů s povlakem na bázi DLC, které mají ve srovnání s nástroji z HSS vyšší trvanlivost (až 1000×), odolnost proti abrazivnímu opotřebení a vyšší teplotní odolnost.

Pro hodnocení a optimalizaci řezného procesu z hlediska výkonnostního, kvalitativního a ekonomického je nezbytná znalost velikosti, směru a smyslu jednotlivých složek výsledné síly a jejich vývoj se změnou parametrů obráběcího procesu. Pro některé specifické obrobky (součásti z křehkých materiálů nebo součásti
s tenkými stěnami náchylnými ke vzniku trhlin atd.) jsou právě složky celkové síly omezujícím faktorem nasazení určitého druhu technologie. Dynamické namáhání soustavy stroj–nástroj–obrobek–přípravek jednotlivými složkovými silami má rovněž zásadní vliv na stabilitu řezného procesu a tím na přesnost obrobku a kvalitu (integritu) obrobeného povrchu. Znalost velikostí složek výsledné síly a jejich časového chování v průběhu řezného procesu umožňuje analýzy výrobních postupů, technologií, volby řezných nástrojů, obráběcích strojů a řezných podmínek [1,3–5]. Jednotlivé složky řezných sil ovšem není vhodné použít přímo pro analýzu nebo srovnání zatížení řezných nástrojů s rozlišnou geometrii popřípadě při obrábění s různým nastavením řezných podmínek. Za tímto účelem se provádí výpočet tzv. měrné řezné síly, ta je definována jako síla působící ve směru hlavního řezného pohybu potřebná pro oddělení třísky s průřezem 1 mm^2, její jednotkou je MPa [6].

Mezi veličiny, které se při obrábění, popř. po obrábění, měří a vyhodnocují, patří zejména silové zatížení, měrné řezné síly a opotřebení nástroje. Obráběcí proces bývá ovšem často doprovázen i zvukem o různém kmitočtu a intenzitě. Se zvukovým signálem (nejčastěji ve frekvenční doméně) lze dále pracovat, např. při posuzování stability obráběcího procesu nebo detekci nadměrného opotřebení řezného nástroje. Zaznamenané zvuky je možné pomocí analýzy zvukového spektra od sebe navzájem odlišovat. V průběhu životnosti nástroje může při konstantních řezných podmínkách, za jistých okolností, docházet k výrazným změnám ve zvukovém spektru obráběcího procesu. Řezný nástroj může postupně projít etapami nestabilního obrábění (jedna dominantní frekvence), stabilního obrábění (žádná dominantní frekvence, popř. frekvence zubová a její harmonické násobky) a obrábění řezným nástrojem s nadměrnou hodnotou opotřebení (jedna nebo více dominantních frekvencí o kmitočtu nad 6 kHz). Právě frekvence značící vyšší opotřebení nástroje se s postupným růstem opotřebení dále mění, je tedy možné sledovat jejich vývoj a hledat případné závislosti mezi dominantními frekvencemi zvukového spektra a opotřebením řezného nástroje, popř. měrnými řeznými silami.

2 CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE

Disertační práce má za cíl analýzu měrných řezných sil a doprovodných jevů při obrábění nových materiálů, kompozitních materiálů. Práce by měla přispět k rozšíření znalostí v oblasti analýzy měrných řezných sil, které působí na řezný nástroj při obrábění vybraných kompozitních materiálů. Dalším přínosem by měl být podrobný rozbor zvukových spekter, která jsou generována obráběcím procesem. Tato analýza by měla především prozkoumat možnost, zda lze pomocí jednoduchého měření zvuku v budoucnu přesně odhadnout opotřebení řezného nástroje a nárůst měrných řezných sil.

Všechny operace budou realizovány pomocí zařízení dostupného na Ústavu strojírenské technologie (ÚST), FSI VUT v Brně. Pro testování nástrojů bude plně využito dílenské zázemí ÚST, které disponuje potřebným vybavením – CNC stroje, mikroskop pro vyhodnocení opotřebení břitů řezných nástrojů, dynamometr, mikrofon, FFT analyzátor a speciální software pro zpracování naměřených dat.

Dílčí cíle dizertační práce je možné shrnout do následujících bodů:

- analýza současného stavu poznání řešené problematiky,
- příprava a provedení experimentálních zkoušek,
- analýza vývoje měrných řezných sil při systematických změnách řezných podmínek a nárůstu opotřebení řezného nástroje,
- porovnání měrných řezných sil při obrábění nástroji, na nichž jsou naneseny rozličné typy povlaků,
- tvorba zvukových map vybraných nástrojů z HSS a stanovení korelace mezi zvukem generovaným obráběcím procesem a velikostmi měrných řezných sil, resp. VB opotřebením při obrábění vybraných materiálů.

3 MĚRNÁ ŘEZNÁ SÍLA (MĚRNÝ ŘEZNÝ ODPOR)

Podobně jako mechanika těles a nauka o materiálu definuje pevnost materiálu v tahu nebo tlaku, stejně tak i teorie obrábění definuje velikost měrné síly potřebné k překonání soudržnosti materiálu účinkem řezného procesu. V obecném tvaru je měrná řezná síla popsána jako síla, která působí ve směru hlavního řezného pohybu vztažená na průřez třísky – tzn. jednotkou je MPa (označení měrná řezná síla a měrný řezný odpor korelují s principem akce a reakce) [6].

Vzorec pro výpočet řezné síly různých technologických operací vychází z Kinzelova matematického modelu [7], který byl sestaven na základě experimentálních měření. Tento vztah pro výpočet řezné síly je ve tvaru [8]:

$$F_C = k_{c11} \cdot \mathrm{b} \cdot h^{1-m_c} \tag{1}$$

kde k_{c11} je základní hodnota měrné řezné síly pro průřez třísky A= b · h = 1 · 1 = 1 mm^2 (b – šířka třísky, h – tloušťka třísky) a m_c konstanta. Matematický model měrné řezné síly je dále popsán jako [8]:

$$k_c = k_{c11} \cdot h^{-m_c} \tag{2}$$

Velikost konstant k_{c11} a m_c je dána mechanickými vlastnostmi obráběného materiálu. Hodnoty těchto konstant byly stanoveny experimentálně při různých řezných podmínkách pro různé technologické operace, v odborné literatuře je lze nalézt např. v [9–11]. Konstanty k_{c11} a m_c v sobě zohledňují i další vnější vlivy, jako jsou řezná rychlost, úhel čela nástroje, opotřebení nástroje atd. [8].

Souhrnně lze konstatovat, že velikost měrné řezné síly je závislá na [12]:

- fyzikálních vlastnostech materiálu obrobku,
- řezných podmínkách – zejména velikosti průřezu (tloušťky) třísky,
- mikro/makro geometrii řezného nástroje,
- řezném prostředí, apod.

V závislosti na změně tloušťky třísky se vyjádří měrná řezná síla jako

$$k_c = \frac{k_{c_{11}}}{h^{m_c}} = \frac{k_{c11}}{(f \cdot \sin \kappa_r)^{m_c}} \tag{3}$$

Dalším faktorem, který ovlivňuje velikost měrné řezné síly, je řezná rychlost, ta ovlivňuje zejména [6]:

- velikost oblasti a intenzity primární plastické deformace,
- teplotu deformovaného materiálu,
- určuje rychlost zatěžování materiálu obrobku,
- velikost součinitele tření na čele i na hřbetě a vznik a velikost nárůstku.

4 NOVÉ OBRÁBĚNÉ MATERIÁLY – KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

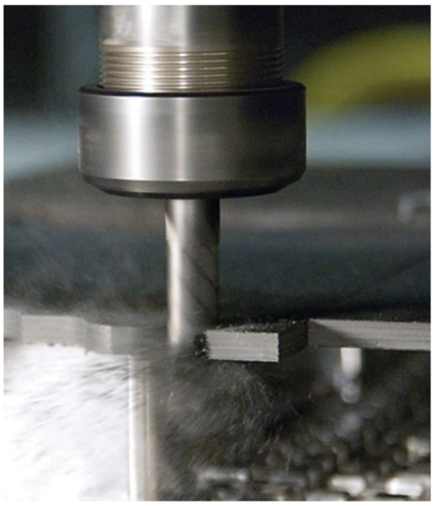
Kompozitní materiály nabízí vysoký poměr pevnost/hmotnost, modul pružnosti/hmotnost, únavovou odolnost, odolnost proti korozi atd. To dělá kompozitní materiály vysoce konkurenceschopné oproti konvenčním materiálům pro nejrůznější průmyslové aplikace [2].

Pod pojmem kompozitní materiály rozumíme heterogenní materiály složené ze dvou nebo více fází, které se podstatně liší svými fyzikálními, mechanickými a chemickými vlastnostmi. Tvrdší, tužší a pevnější nespojitá složka se nazývá výztuž, spojitá a obvykle poddajnější složka, která zastává funkci pojiva výztuže, se nazývá matrice. Pro kompozitní matriály je charakteristický tzv. synergismus, což znamená, že vlastnosti kompozitu jsou lepší, než by odpovídalo pouhému poměrnému sečtení vlastností jednotlivých složek [2,3,13].

Kompozitní materiály mohou dělit podle typu výztuže nebo matrice, obecně používaným dělením kompozitních materiálů je rozdělení podle tvaru prvků vyztužující fáze, podle kterého se dělí na částicové a vláknové. Vláknové kompozity jsou vyztuženy vlákny, která mají délkové rozměry podstatně větší než průřezové.

4.1 Obrábění kompozitních materiálů

K nejrozšířenějším obráběcím operacím při výrobě dílců z kompozitních matriálů patří vrtání, řezání, frézování atd. Důraz je při obrábění kladen především na jakost obrobené plochy, což je dáno aplikací těchto materiálů (letadla, raketoplány, mosty, lodě atd.) [14].



Obr. 1 Frézování kompozitu standardní válcovou frézou [15].

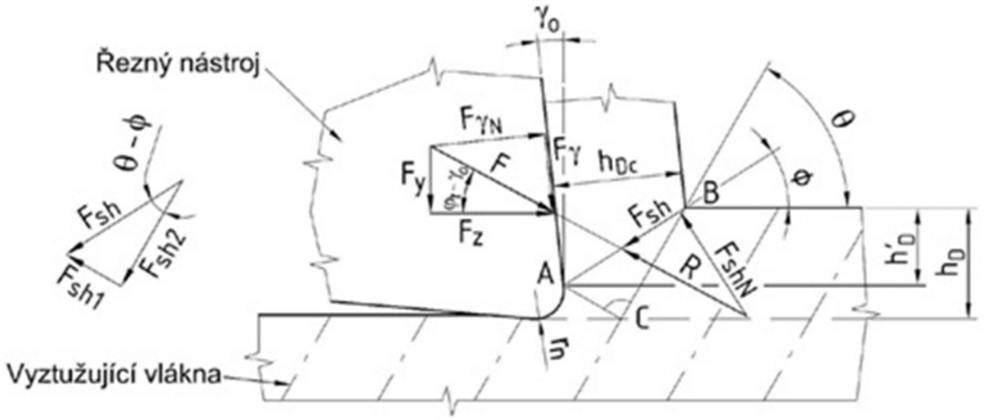
Obr. 2 Frézování kompozitu speciální válcovou frézou [16].

Náročnost obrábění kompozitních materiálů ovlivňují především vlastnosti výztuže a matrice. Jako výztuž se dnes nejčastěji používají uhlíková nebo skelná vlákna, jako pojivo se využívají především pryskyřice – polyesterová, vinylesterová

a epoxidová. Vzájemnou kombinací materiálu výztuže a matrice lze dosáhnout rozličných mechanických vlastností výsledného kompozitního materiálu, které je třeba zohlednit při volbě nástrojového materiálu, geometrie nástroje a řezných podmínek [17].

V minulosti bylo publikováno mnoho studií zabývajících se obráběním kompozitních materiálů, první z nich je možné nalézt např. zde [18–22]. Tyto práce se zabývají vlivem orientace výztuže na velikosti řezných sil, rychlost opotřebení nástroje, kvalitu obrobené plochy a delaminaci. Tyto studie jsou dále rozváděny experimentálními pracemi, které řeší obrobitelnost nově vyvíjených kompozitních materiálů, popřípadě možnosti simulace obrábění kompozitních materiálů [3,23–26].

Pro stanovení rozložení a velikostí sil působících na čele nástroje a v maximální rovině deformace obrobku, je třeba celý model zjednodušit (viz obr. 3). Střižná rovina je nahrazena teoretickou střižnou rovinou. Na základě této skutečnosti je možno uvažovat, že teoretická rovina střihu AB je tvořena rovinou AC (suma všech elementů *da*), ve které v důsledku smykového namáhání dochází k porušení vyztužujících vláken křehkým lomem a dále BC (suma všech elementů *db*), ve které dochází k porušení vazby matrice – vlákna a následnému skluzu [17,27].



Obr. 3 Celková řezná síla a její složky [27].

Celková řezná síla *F* je velikostí rovna celkovému řeznému odporu *R* (opačná orientace). Řezný odpor se skládá z tangenciální síly v rovině střihu a normálové síly v rovině střihu. Tangenciální síla v rovině střihu může být dále rozložena na složku F_{sh1}, která řeže vlákna podél CA a F_{sh2}, která řeže matrici, nebo delaminuje rozhraní matrice – vlákna podél BC, rovnoběžně s osou vyztužujících vláken. Síly F_{sh1} a F_{sh2} lze vyjádřit jako [17,27]:

$$F_{sh1} = F_{sh} \cdot \sin(\theta - \emptyset) \quad (4)$$

$$F_{sh2} = F_{sh} \cdot \cos(\theta - \emptyset) \quad (5)$$

Kde θ je úhel orientace vláken v rozsahu 0° až 90° a ϕ je teoretický úhel střižné roviny.

5 ANALÝZA MĚRNÝCH ŘEZNÝCH SIL PŘI FRÉZOVÁNÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

Pro výpočet měrných řezných sil bylo nutné provedení řezivostních zkoušek pomocí dynamometru Kistler pro měření silového zatížení nástroje a dále vypočítat velikosti průřezů třísek (pro různé řezné podmínky). Všechna měření byla provedena v laboratořích ÚST, pro experimentální obrábění byla použita konzolová frézka FV 25 CNC s řídicím systémem Heidenhain 315 iTNC.

5.1 Specifikace obráběných materiálů

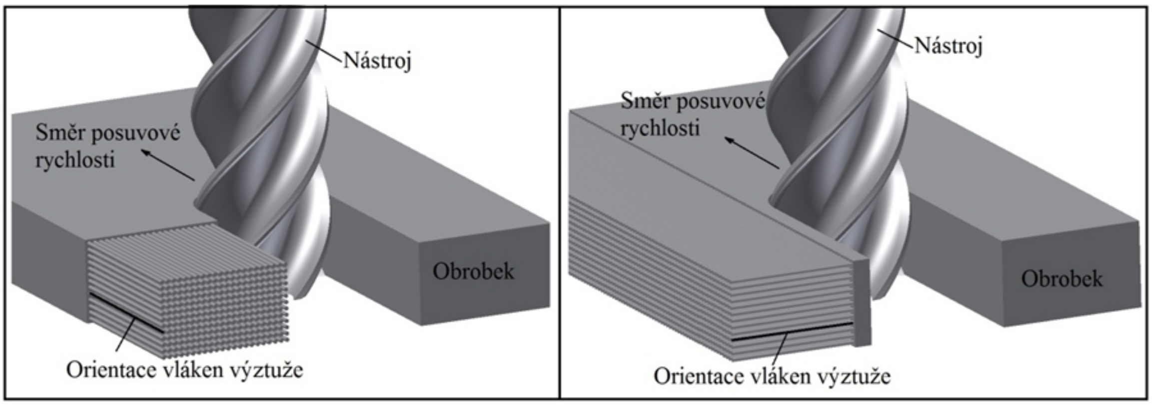
Pro experimentální obrábění byly zvoleny dva odlišné kompozitní materiály, z nichž jeden obsahuje výztuž ze skelných a druhý z uhlíkových vláken, jsou to pultruzně vyrobený sklo-polyesterový kompozit a uhlíko-epoxidový kompozitní materiál ve formě lamel. Oba obráběné materiály byly poskytnuty pro testování firmou PREFA KOMPOZITY, a. s., Brno. Podrobnosti o testovaných materiálech jsou uvedeny v disertační práci v kapitolách 8.1.1 a 8.1.2.

5.2 Specifikace nástrojů použitých pro obrábění kompozitů

Pro testování kompozitních materiálů byly zvoleny nástroje ze slinutých karbidů (SK) s různými typy povlaků a jeden nástroj z rychlořezné oceli (HSS) s povlakem na bázi (Al,Ti,Cr)N. Podrobnosti o nástrojích použitých pro experimentální obrábění jsou uvedeny v disertační práci v kapitole 8.2.

5.3 Průběh měrných řezných sil při změně řezných podmínek

Velikost měrné řezné síly je přímo závislá na nastavených řezných podmínkách. Byla provedena série experimentálních měření, která měla za cíl sledovat změny měrných řezných sil v průběhu obrábění vybraných kompozitních materiálů při různém nastavení posuvu na zub, šířky záběru hlavního ostří a řezné rychlosti. Všechna měření byla realizována pro nastavení orientace vláken výztuže 0° a 90° vůči posuvové rychlosti (viz obr. 4), protože mechanické vlastnosti vláken a mechanismus oddělování třísky jsou v těchto směrech rozdílné. Pro měření v této kapitole byl vybrán nástroj ze SK s diamantovým povlakem.

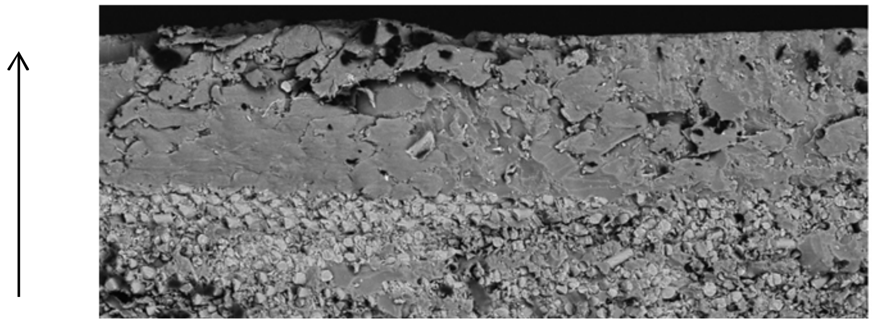


Obr. 4 Nastavení orientace vláken výztuže vůči vektoru řezné rychlosti.

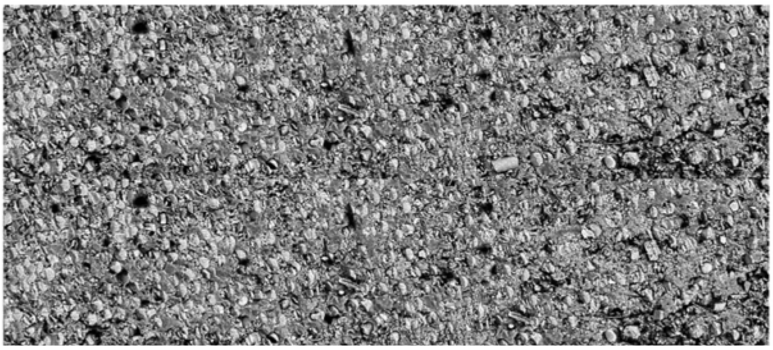
5.3.1 Změna posuvu

Posuv je jeden z parametrů, který výrazným způsobem ovlivňuje velikosti měrných řezných sil. V průběhu testování byla systematicky měněna hodnota posuvu, se kterou se měnily průřezy (tloušťky) třísek i zaznamenané řezné síly. Z těchto hodnot byly dále vypočteny velikosti měrných řezných sil. Měření byla prováděna pro oba testované kompozitní materiály.

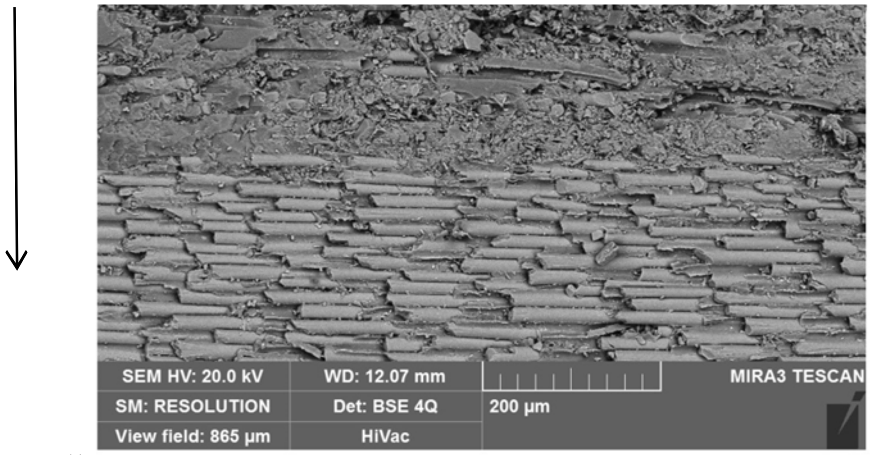
Hodnota šířky záběru hlavního ostří a_p byla při obrábění sklo-polyesterového kompozitu zvolena 5 mm z toho důvodu, aby byly obráběny současně všechny složky kompozitního materiálu (obalová fólie, skelná vlákna v pojivu, pás rovingu). Struktura jednotlivých vrstev materiálu je zobrazena na obr. 5.



Přechod mezi obalovou fólií a skelnými vlákny v polyesterovém pojivu

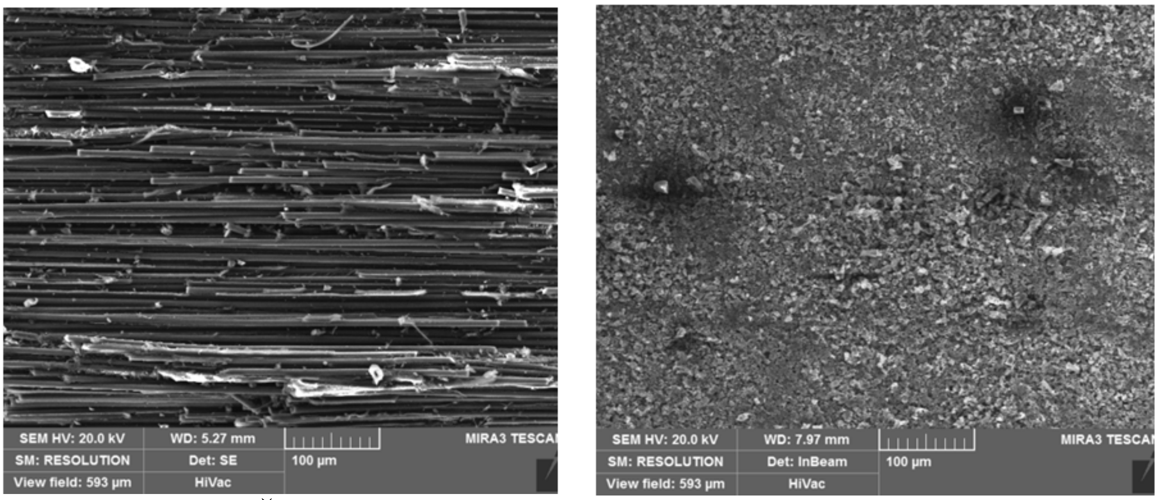


Přechod mezi skelnými vlákny v polyesterovém pojivu a vrstvou rovingu



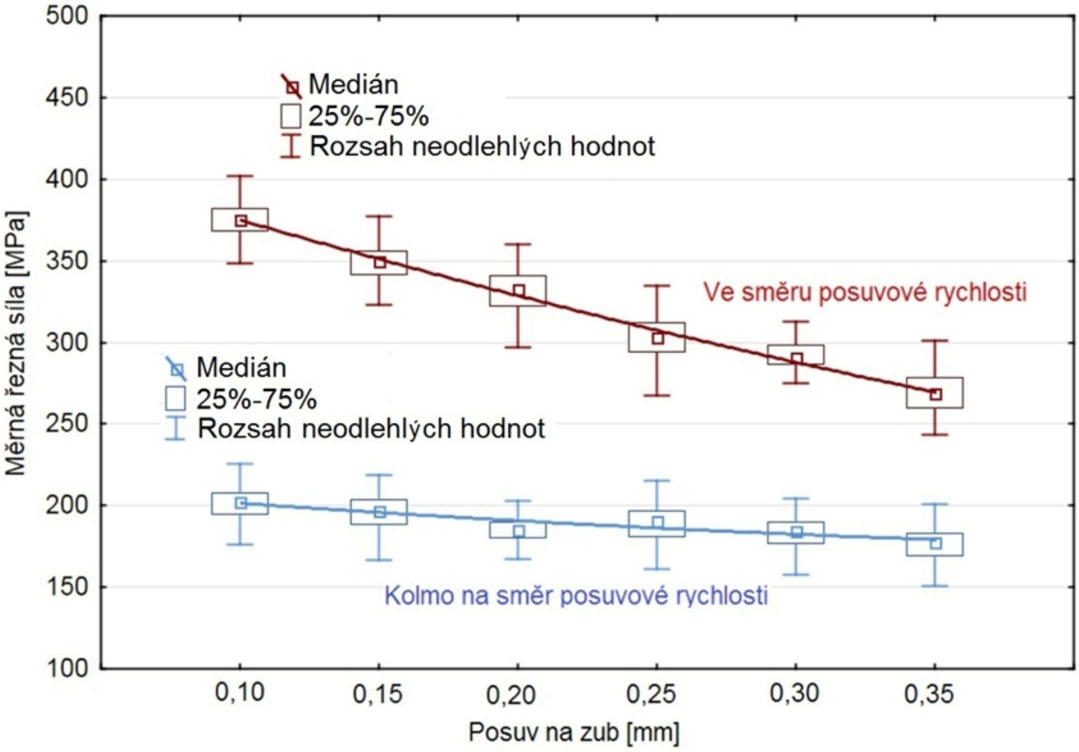
Obr. 5 Řez sklo-polyesterovým kompozitem s vyznačenými přechody mezi jednotlivými vrstvami při nastavené hodnotě a_p=5 mm.

Při obrábění uhlíko-epoxidového kompozitu byla šířka záběru hlavního ostří zvolena a_p=1,4 mm, což odpovídá tloušťce lamely testovaného materiálu. Průřez lamelou je zobrazen na obr. 6.



Obr. 6 Řez uhlíkovou lamelou po směru vláken (vlevo)
a kolmo na směr vláken výztuže (vpravo).

Při obrábění s orientací vláken 0º (směr vláken rovnoběžný se směrem posuvové rychlosti) byly zaznamenány nižší hodnoty měrných řezných sil při obrábění obou kompozitů v porovnání s orientací vláken 90º (směr vláken kolmý na směr posuvové rychlosti). Vývoj měrných řezných sil se zvyšující se hodnotou posuvu na zub při obrábění sklo-polyesterového kompozitu je znázorněno na obr. 7.

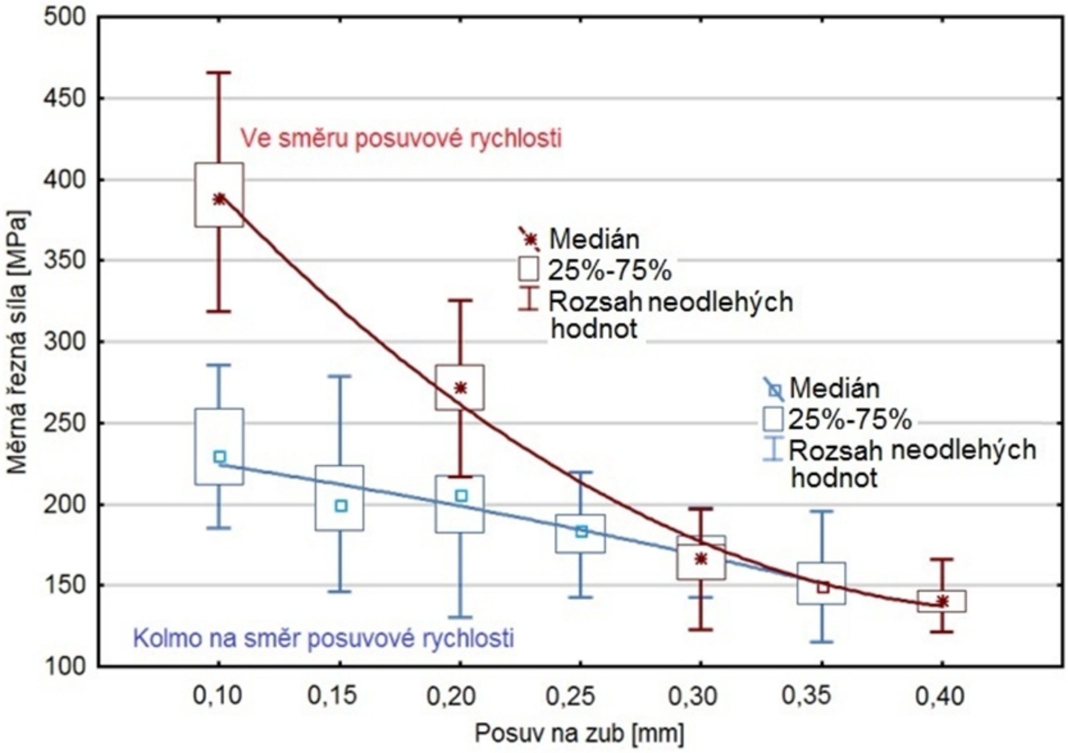


Obr. 7 Vývoj měrných řezných sil se změnou posuvu při obrábění
sklo-polyesterového kompozitu.

Rostoucí hodnota posuvu se projeví poklesem měrných řezných sil, tento pokles je výraznější pro případ nastavení vláken rovnoběžně se směrem posuvové rychlosti.

Při nastavení velikosti posuvu na zub 0,35 mm začalo docházet k praskání a odlamování kusů kompozitního materiálu (především při vyjíždění frézy z obrobku). Z tohoto důvodu nebyla hodnota posuvu na zub dále zvyšována a f_z=0,35 mm byla stanovena jako hodnota maximální.

Při obrábění uhlíko-epoxidového kompozitu nebylo možné stabilní upnutí pouze pomocí svěráku, navíc při dotahování čelistí svěráku docházelo k praskání lamel. Z tohoto důvodu byl v laboratoři ÚST vyroben speciální upínací přípravek (viz dizertační práce obr. 8.10), pomocí kterého bylo možné rychlé a stabilní upnutí obrobku ve formě lamel. Vývoj měrných řezných sil při obrábění uhlíko-epoxidového kompozitu se změnou posuvu na zub je zobrazen na obr. 8.



Obr. 8 Vývoj měrných řezných sil se změnou posuvu při obrábění uhlíko-epoxidového kompozitu.

Další měření vývoje měrných řezných sil se změnou řezných podmínek je uvedeno v dizertační práci v kapitolách 8.3.2 (Změna šířky záběru ostří) a 8.3.3 (Změna řezné rychlosti). Vzhledem ke skutečnosti, že experimentální obrábění popsané v dizertační práci v kapitole 8.3 (Průběh měrných řezných sil při změně řezných podmínek) probíhalo celé pouze s jedním nástrojem ze SK s diamantovým povlakem (DLC). Bylo provedeno kontrolní měření silového zatížení (měrných řezných sil) při obrábění sklo-polyesterového kompozitu při stejných řezných podmínkách, jaké byly postupně použity na začátku, v průběhu a na konci testování.

Cílem měření bylo zjistit, zda nedošlo k růstu silového zatížení (vypočtených měrných řezných sil) v průběhu testování vlivem opotřebení nástroje. Opotřebení břitu frézy je zobrazeno v disertační práci na obr. 8.19, 8.20 a 8.21.

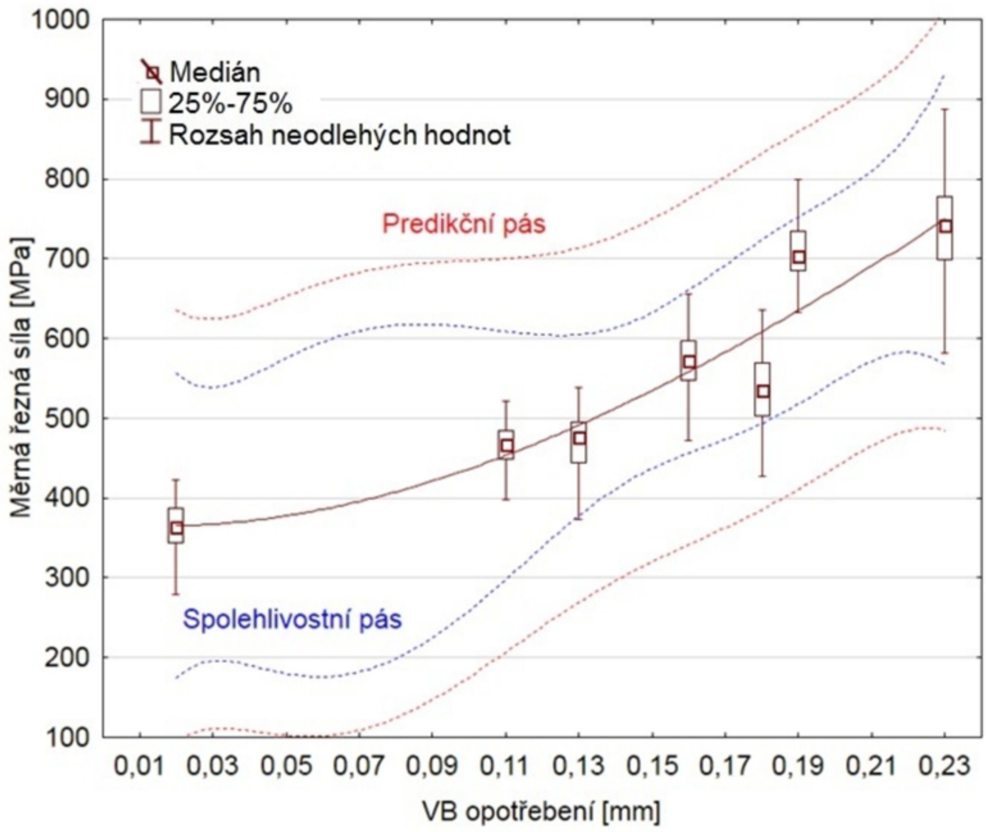
5.4 Vliv opotřebení nástroje na hodnoty měrných řezných sil

S rostoucím opotřebením řezného nástroje dochází k postupnému nárůstu jednotlivých složek výsledné síly působící na nástroj. Na základě této skutečnosti se tedy dá očekávat s rozvíjejícím se opotřebením nástroje i nárůst velikosti měrné řezné síly. Pro toto měření byla vybrána čtyř-břitá HSS fréza krátká (s jedním zubem přes střed) s povlakem (Al,Ti,Cr)N, vlastnosti nástroje a naneseného povlaku jsou popsány v dizertační práci v kapitole 8.2 (Specifikace nástrojů použitých pro obrábění kompozitů). I přes aplikaci otěruvzdorného povlaku, byla u tohoto nástroje očekávaná krátká životnost (řádově v jednotkách minut) a výrazné změny v silovém zatížení s rozvíjejícím se opotřebením nástroje. Řezné podmínky byly nastaveny následující:

- šířka záběru ostří a_p=2 mm,
- otáčky n=1000 ot/min (v_c=50,26 m/min),
- posuv na zub f_z=0,05 mm
- pracovní záběr ostří a_e=16 mm.

Jako materiál obrobku byl zvolen sklo-polyesterový kompozit. Obrábění probíhalo s nastaveným úhlem vláken 0° (směr vláken rovnoběžný se směrem posuvové rychlosti). Řezný nástroj dosáhl stanovené hodnoty opotřebení po 13. průjezdu materiálem, což odpovídá cca 5 min obrábění. Na hřbetech jednotlivých břitů byly patrné drobné rýhy způsobené třením přerušených vláken výztuže. Vývoj měrných řezných sil s rostoucím opotřebením nástroje je uveden na obr. 9, který je dále doplněn o regresní křivku, predikční pás a pás spolehlivosti.

Opotřebení frézy bylo primárně způsobeno abrazivním třením přerušených vláken o hřbety břitů nástroje. Hřbetní opotřebení bylo na všech zubech rovnoměrné a dobře měřitelné pomocí dílenského mikroskopu. Na hřbetní ploše byly po analýze povrchů břitů na elektronovém mikroskopu dobře patrné drobné rýhy orientované ve směru řezné rychlosti frézy (viz disertační práce obr. 8.26 a 8.27).



Obr. 9 Vývoj velikostí měrných řezných sil s rostoucím opotřebením nástroje.

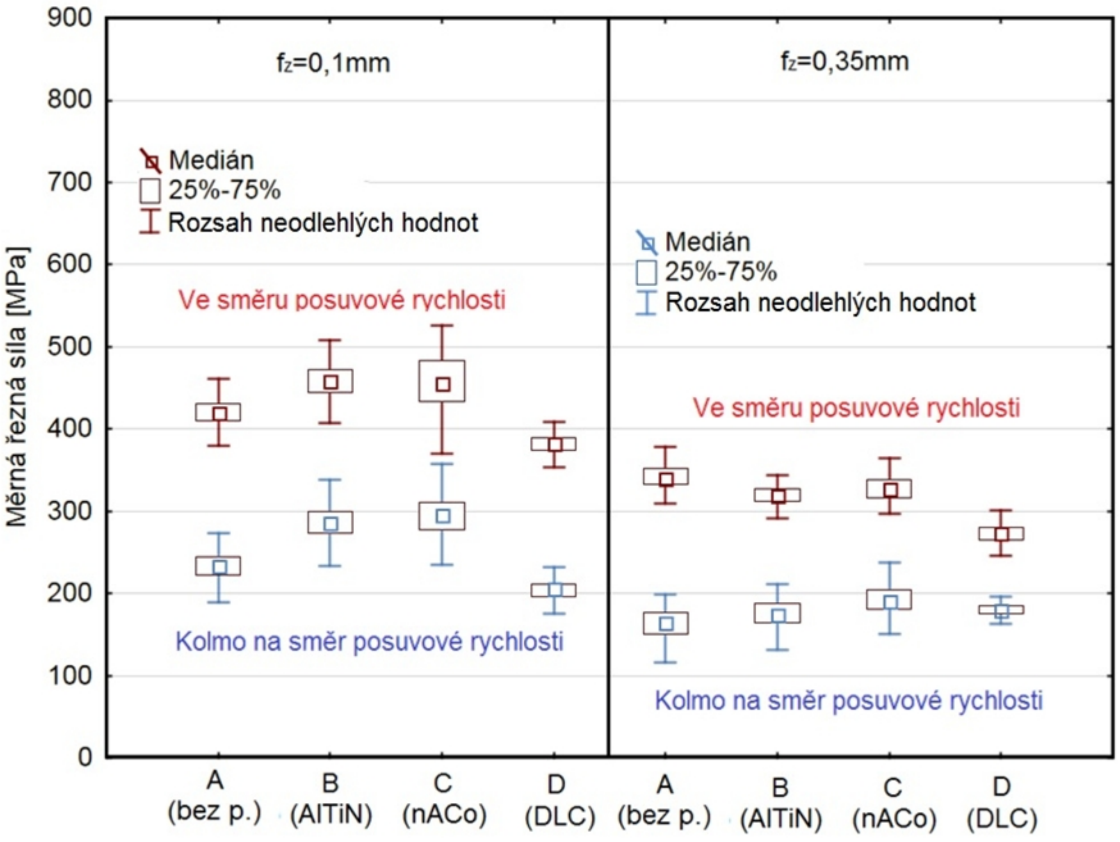
S rostoucím opotřebením nástroje je jasně patrný i růst měrné řezné síly působící na řezný nástroj. Velikost měrné řezné síly měla na začátku obrábění (VB_1=0,02 mm po 1. průjezdu) velikost $k_{c,VB0,02}$=364 MPa, po překročení mezní hodnoty opotřebení (VB_{13}=0,23 mm po 13. průjezdu) se její velikost změnila na $k_{c,VB0,23}$=742 MPa.

5.5 Měrné řezné sily při obránění nástroji s rozličnými typy povlaků

Dalším faktorem, který ovlivňuje velikosti měrných řezných sil, je typ nástroje použitého pro obrábění. V této kapitole je zkoumán vliv aplikace rozličných typů povlaků nanesených na nástroje ze SK na velikosti měrných řezných sil. Pro porovnání nástrojů bylo provedeno více experimentálních měření, aby bylo možné vyloučit chybné výsledky měření způsobené nerovnoměrnou strukturou testovaných materiálů (zejména u sklo-polyesterového kompozitního materiálu). Nástroje, použité pro testování, jsou podrobně popsány v dizertační práci v kapitole 8.2 (Specifikace nástrojů použitých pro obrábění kompozitů), jedná se o nástroje s obdobnou geometrií lišící se typem naneseného povlaku a utvařečem třísky na obvodu nástroje. Pro testování byly zvoleny tyto frézy:

- SK bez povlaku (nástroj A),
- SK s povlakem na bázi AlTiN (nástroj B),
- SK s povlakem na bázi nACo (nástroj C),
- SK s povlakem na bázi DLC (nástroj D).

Vývojový trend měrných řezných sil při změně řezných podmínek byl podrobněji prozkoumán v dizertační práci v kapitole 8.3 (Průběh měrných řezných sil při změně řezných podmínek). Řezné podmínky, nastavené pro porovnávání k_c byly opět systematicky měněny, v tomto případě byly ovšem použité pouze okrajové hodnoty nastavované při testování v kapitolách 8.3.1, 8.3.2 a 8.3.3. Na obr. 10 je zobrazeno porovnání k_c při obrábění s jednotlivými nástroji pro dvě různé hodnoty posuvu. Obdobná měření byla realizována dále pro různé hodnoty šířky záběrů hlavního ostří a řezné rychlosti.



Obr. 10 Porovnání měrných řezných sil při obrábění sklo-polyesterového kompozitu.

Vzhledem ke skutečnosti, že testování probíhalo pouze se třemi nástroji (od každého typu nástroje pouze jeden kus), bylo po ukončení testování nástrojů A, B a C provedeno kontrolní měření k_c. Při tomto měření byly nastaveny stejné řezné podmínky jako při prvním průjezdu materiálem testovanými nástroji. Kontrolní měření nástroje D bylo provedeno již v kapitole dizertační práce 8.3.4, pro celkové porovnání všech nástrojů byla použita data získaná z tohoto měření.

Změny v hodnotách k_c na začátku a na konci testování jsou uvedeny v dizertační práci na obr. 8.34. Podrobnější prozkoumání testovaných frézovacích nástrojů bylo provedeno na elektronovém mikroskopu ve firmě Tescan s. r. o., detaily břitů nástrojů jsou zobrazeny v disertační práci na obr. 8.36–8.39.

5.5.1 Celkové porovnání k_C testovaných nástrojů

Pro porovnání měrných řezných sil testovaných nástrojů bylo provedeno celkem 20 měření (+1× kontrolní měření) za různých řezných podmínek. Větší množství srovnávacích měření bylo zvoleno z toho důvodu, že v některých případech mohlo dojít k ovlivnění výsledků nestejnorodou strukturou materiálu obrobku a nerovnoměrným rozložením vrstvy rovingu u sklo-polyesterového kompozitu.

Z celkového porovnání nástrojů použitých pro obrábění vybraných kompozitních materiálů vyplývá, že nejvyšší hodnoty měrných řezných sil vznikají při obrábění s nástrojem C (SK s povlakem nACo), který dosáhl 11× nejvyšší hodnoty k_c, 6× druhé nejvyšší hodnoty k_c a 3× třetí nejvyšší hodnoty k_c při porovnání testovaných fréz, a to z celkového počtu 20 provedených srovnávacích měření. Nejlepších výsledků dosáhl nástroj D (SK s povlakem DLC), u tohoto nástroje byla 16× naměřena nejnižší hodnota měrné řezné síly. Pouze v jednom případě byla měrná řezná síla u tohoto nástroje zjištěna nejvyšší, tato skutečnost byla nejspíše způsobena právě nestejnorodou strukturou obráběného materiálu.

6 VZTAH MĚRNÁ ŘEZNÁ SÍLA – DOMINANTNÍ FREKVENCE OBRÁBĚCÍHO PROCESU

Doprovodným jevem obráběcího procesu je mimo jiné i zvuk o různých frekvencích a intenzitách, ten je závislý nejen na nastavených řezných podmínkách, ale i na stabilitě obráběcího procesu a stavu opotřebení řezného nástroje. Nestabilní obrábění je z pravidla doprovázeno zvukem o jedné dominantní frekvenci (DF), jejíž kmitočet se v průběhu obrábění nemění. Oproti tomu kmitočet DF zvuku vydávaného opotřebeným nástrojem se s rostoucím opotřebením průběžně mění. Cílem tohoto měření, bylo pokusit se nalézt korelaci mezi DF a opotřebením řezného nástroje, které přímo souvisí s velikostí měrné řezné síly.

Mapování zvukových spekter bylo provedeno při obrábění oceli 15 260 a sklo-polyesterového kompozitního materiálu nástroji z HSS bez povlaku a s povlakem na bázi (Al,Ti,Cr)N. Při obrábění testovaných materiálů probíhalo současně měření silového zatížení a zvuku vydávaného obráběcím procesem.

Pro záznam působení silového zatížení byl použit opět dynamometr KISTLER. Další sledovanou veličinou byl zvuk generovaný obráběcím procesem, k jejímu měření byla použita aparatura firmy Brüel&Kjaer (mikrofon typ 4189A, analyzátor Photon a notebook s vyhodnocovacím softwarem). Pomocí měření zvukového spektra při obrábění bylo možné určit, kdy se jednalo o obrábění stabilní nebo nestabilní a kdy o obrábění s ostrým nebo nadměrně opotřebeným nástrojem. Posledním sledovaným parametrem bylo VB opotřebení hřbetu nástroje. Pro toto měření byl použit dílenský mikroskop. Jako mezní hodnota opotřebení byla zvolena hodnota VB=0,2 mm.

6.1 Referenční měření pro ocel 15 260.7

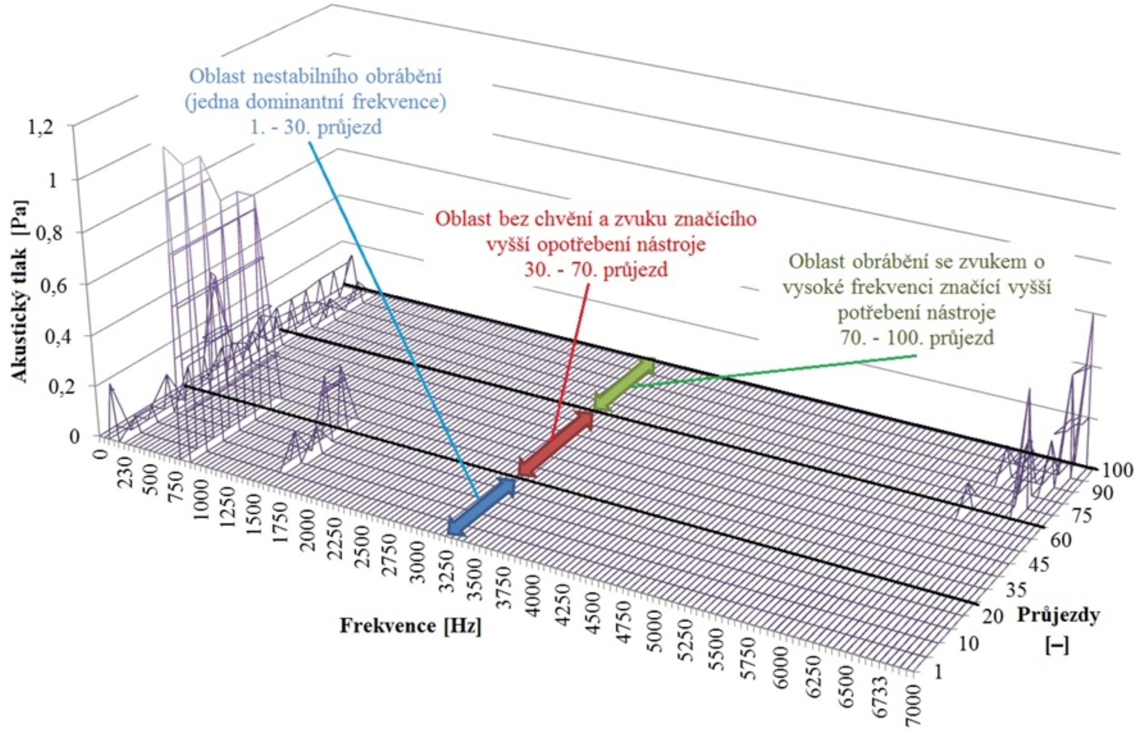
Testované nástroje prošly v průběhu testování postupně třemi fázemi obrábění, a to nestabilním obráběním, stabilním obráběním a obráběním s vyšší úrovní opotřebení frézovacího nástroje.

V každé fázi obráběcího procesu bylo zvukové spektrum odlišné. V průběhu nestabilního obrábění se ve zvukovém spektru vyskytovala jedna dominantní frekvence o vysoké intenzitě a neměnném kmitočtu. S rozvíjejícím se opotřebení nástroje, docházelo postupně ke stabilizaci obráběcího procesu, až při určité hodnotě opotřebení nastalo obrábění bez přítomnosti vibrací. Při stabilním obrábění se ve zvukovém spektru neobjevovala žádná dominantní frekvence o vysoké intenzitě, zaznamenatelná byla pouze frekvence zubová. V poslední fázi vydával obráběcí proces „pískavý“ zvuk o vysoké frekvenci a intenzitě, který se s rostoucím opotřebením dále měnil, právě tato změna byla dále podrobně sledována a vyhodnocována.

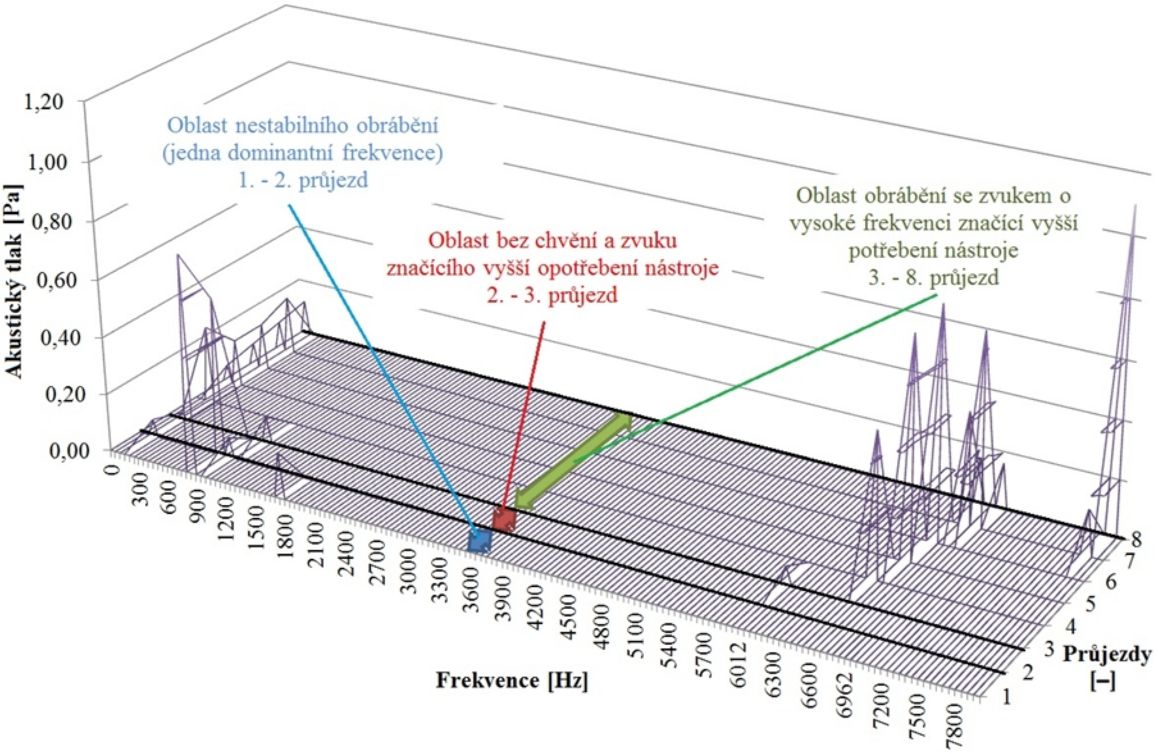
Pro záznam zvukových spekter byla použita aparatura firmy Brüel&Kjaer. Zvuk byl zaznamenáván mikrofonem a následně převáděn FFT analyzátorem z časové do frekvenční domény pro další zpracování a vyhodnocení. Měřená zvuková spektra se v průběhu každého průjezdu materiálem drobně lišila; intenzita a kmitočet v některých případech kolísaly, proto bylo pro správné vyhodnocení jejich velikostí použito statistického softwaru Statistica.

Testování řezných nástrojů probíhalo se třemi různými hodnotami řezné rychlosti (v_c=30, 35, 40 m/min), ostatní parametry zůstávaly konstantní. Při obrábění s nastavenou nejnižší hodnotou řezné rychlosti nebyl zaznamenán výskyt vibrací. Při zvýšení řezné rychlosti na 35 m/min vydával obrábějící nástroj zvuk s jednou dominantní frekvencí (viz dizertace obr. 9.14), což je typický průvodní jev nestabilního obrábění. Dalším ukazatelem byla kvalita obrobené plochy, na které byly patrné vady způsobené vibrujícím nástrojem (viz dizertace obr. 9.15).

Pro tvorbu zvukových map byly použity hodnoty mediánů intenzit a kmitočtů DF ve zvukových spektrech při obrábění s povlakovanými a nepovlakovanými nástroji. V průběhu každého průjezdu bylo zaznamenáno prostřednictvím Waterfall analýzy cca 20 zvukových spekter, ze kterých byly mediány intenzit a kmitočtů vypočteny. Složením naměřených zvukových spekter vzniknou zvukové mapy (obr. 11 – povlakovaný nástroj a obr. 12 – nepovlakovaný nástroj).



Obr. 11 Zvuková mapa povlakovaného nástroje (v_c=35m/min).

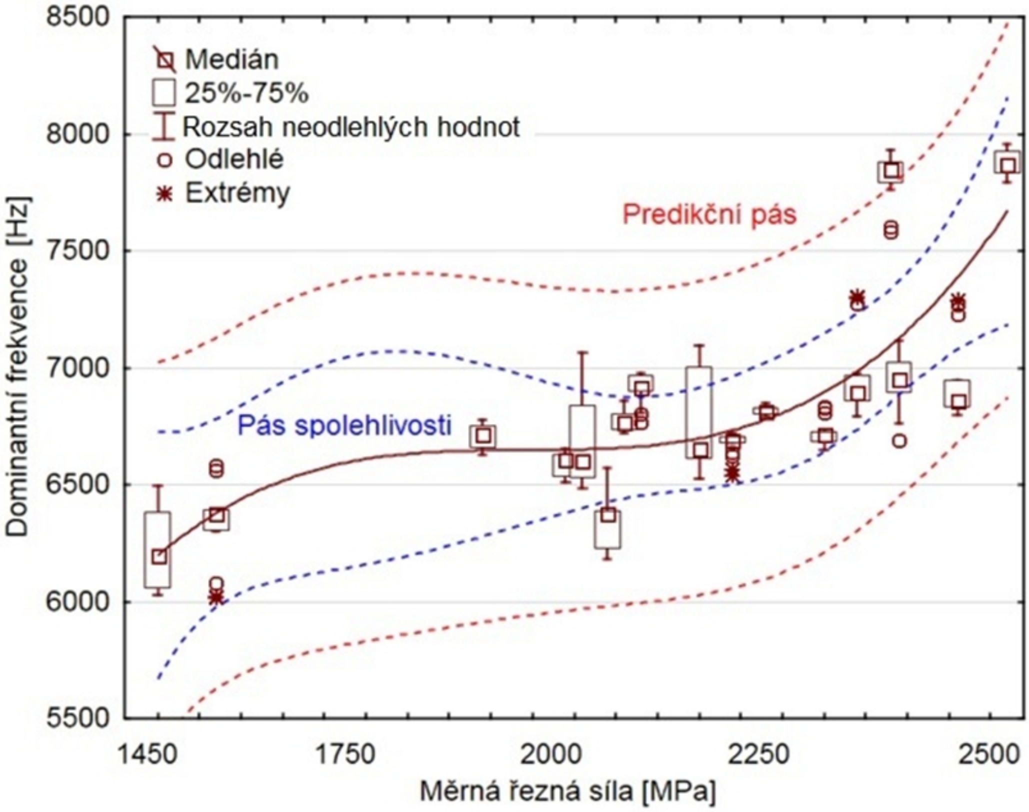


Obr. 12 Zvuková mapa nepovlakovaného nástroje (v_c=35m/min).

Na zvukových mapách jsou znázorněna zvuková spektra nástrojů od začátku až do konce testování (mezní hodnota opotřebení VB=0,2 mm). Na prvních průjezdech je patrná jedna DF s hodnotou 830 Hz (povlakovaný nástroj) a 875 Hz (nepovlakovaný nástroj), což je typické pro nestabilní obrábění. Naopak frekvence

začínající na hranici 6000 Hz značí výraznější opotřebení nástroje, tyto frekvence se postupně s dalšími průjezdy (s růstem opotřebení) zvyšují až k hodnotě 8000 Hz.

Závislosti DF na opotřebení hřbetu nástroje (průměrná hodnota opotřebení jednotlivých břitů), resp. měrné řezné síle jsou zobrazeny v dizertační práci na obr. 9.20 a obr. 9.22-9.24 pro různé případy experimentálního obrábění.



Obr. 13 Vztah mezi kmitočtem DF obráběcího procesu a měrnou řeznou silou pro souhrn všech testovaných nástrojů.

6.2 MĚŘENÍ PRO SKLO-POLYESTEROVÝ KOMPOZITNÍ MATERIÁL

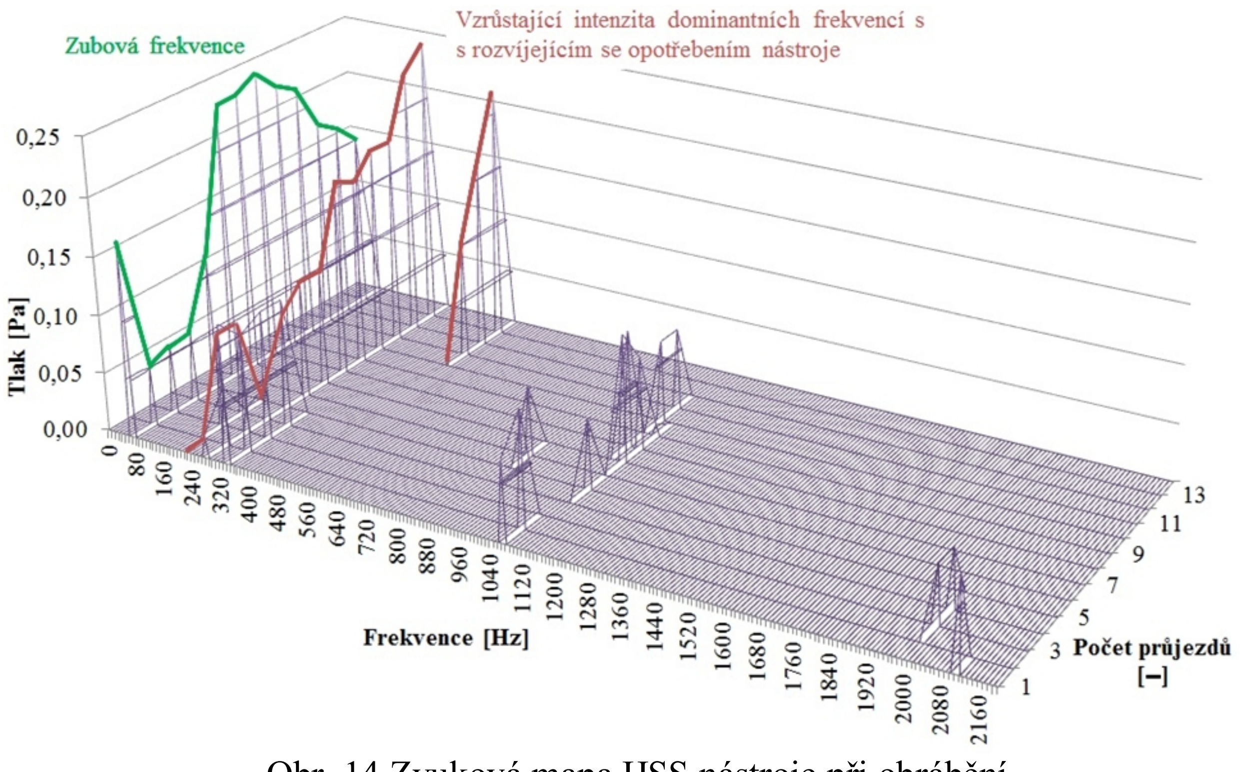
Pro toto měření byl vybrán jako materiál obrobku sklo-polyesterový kompozit, který je podrobně popsán v disertační práci v kapitole 8.1.1 (Pultruzně vyrobený sklo-polyesterový kompozit). Experimentální obrábění probíhalo s úhlem nastavení vláken 0° (orientace vláken ve směru posuvové rychlosti). Jako nástroj byla opět zvolena HSS fréza s povlakem na bázi (Al,Ti,Cr)N. Měření zvukového spektra obráběcího procesu probíhalo obdobným způsobem jako v předchozí kapitole. Experimentální měření bylo realizováno pro dvojí nastavení řezných podmínek (viz tab. 1), první nastavení bylo obdobné jako při obrábění oceli 15 260.7, při druhém byla změněna hodnota řezné rychlosti (posuvové rychlosti).

Tabulka 1 Řezné podmínky při obrábění oceli sklo-polyesterového kompozitu.

Řezná rychlost v_c [m/min]	Posuvová rychlost v_f [mm/min]	Posuv na zub f_z [mm]	Radiální šířka záběru ostří a_e [mm]	Axiální šířka záběru ostří a_p [mm]	Průměr nástroje D [mm]
35	140	0,05	16	2	16
50	200				

S obdobným nastavením jako při obrábění oceli, bylo provedeno celkem dvacet průjezdů kompozitním materiálem (cca 7,5 min obrábění), při kterých vzrostlo VB opotřebení nástroje postupně až na hodnotu VB=0,21 mm. V průběhu měření zvukového spektra obráběcího procesu nedošlo k žádnému vývoji nebo výrazné změně ve zvukovém spektru, jak tomu bylo při obrábění oceli. V zaznamenávaném zvukovém spektru se měnily dominantní frekvence pouze nahodile navíc s minimální intenzitou. Při tomto nastavení řezných podmínek tedy nebylo možné nalezení žádné závislosti nebo vztahu mezi zvukem generovaným obráběcím procesem a měrnou řeznou silou (resp. VB opotřebením), jak tomu bylo při obrábění oceli 15 260.7.

I přes „neúspěšné" první měření, bylo provedení další měření, tentokrát s vyššími hodnotami řezné a posuvové rychlosti. Při tomto nastavení dosáhl nástroj z HSS stanovené hranice opotřebení (VB=0,23 mm) po 13. průjezdu materiálem, což odpovídá cca 5 minutám obrábění.

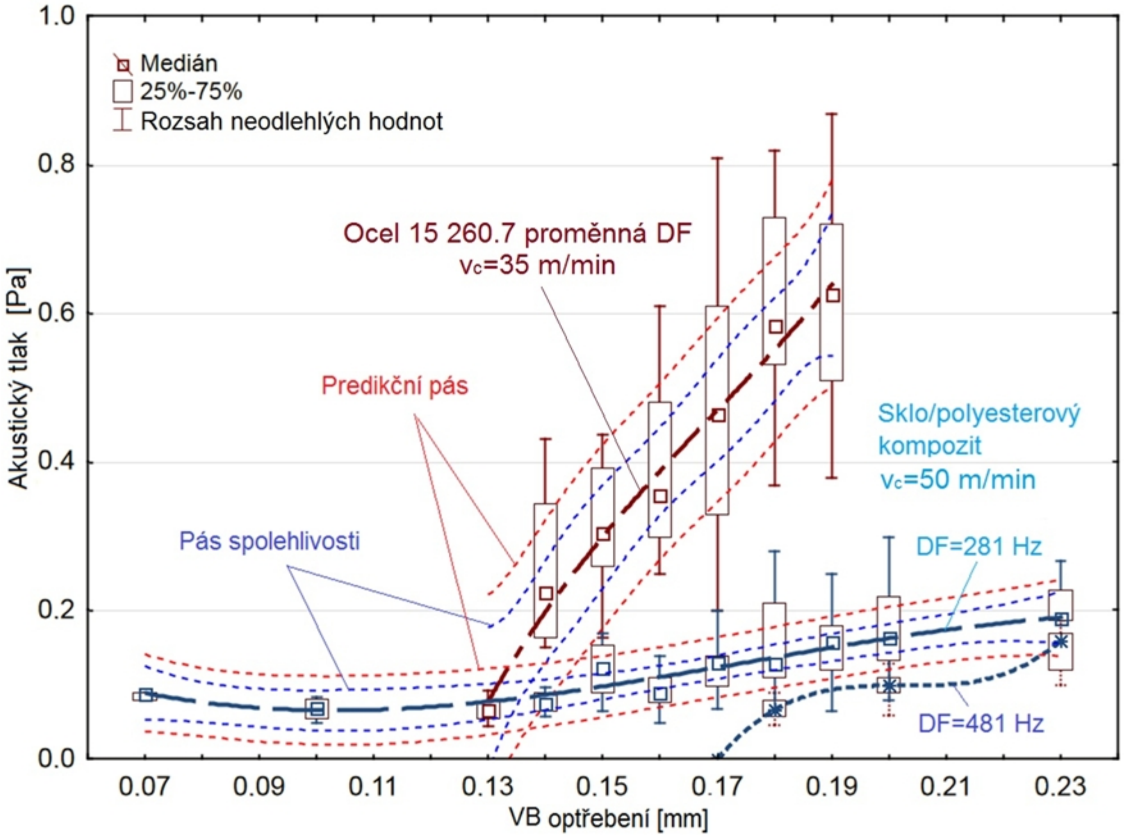


Obr. 14 Zvuková mapa HSS nástroje při obrábění sklo-polyesterového kompozitního materiálu.

Zvukové spektrum se po změně řezných podmínek změnilo (viz dizertace obr. 9.28), v průběhu obrábění byl s rostoucím opotřebením břitů nástroje sledován postupný vývoj tří dominantních frekvencí obráběcího procesu o kmitočtech 70 Hz (zubová frekvence), 281 Hz (harmonický násobek zubové frekvence) a 481 Hz. Zvuková mapa (viz obr. 14) přehledně znázorňuje vývoj těchto frekvencí v průběhu experimentálního obrábění.

V porovnání se zvukovými mapami, které byly získány z měření zvukových spekter při obrábění oceli (viz obr. 11 a 12), je patrný značný rozdíl. Nedochází k postupné změně kmitočtu a intenzity dominantní frekvence, ale k pouze k postupnému růstu intenzit dvou ze tří DF. Závislosti mezi intenzitou DF a VB opotřebením nástroje, resp. měrnou řeznou silou jsou uvedeny v dizertační práci na obr. 9.30 a 9.31.

Přímé srovnání vývoje zvuku generovaného obráběcím procesem při frézování oceli 15 260.7 a sklo-polyesterového kompozitního materiálu nebylo skrze rozdílné nastavení řezné rychlosti možné. Jsou-li zkombinována naměřená data intenzit, při obrábění testovaných materiálů nástrojem z HSS s povlakem (Al,Ti,Cr)N, je tak získán alespoň částečný obraz o rozdílnosti ve vývoji intenzit; viz obr. 15. Nastavené řezné podmínky jsou popsány v tab. 1.



Obr. 15 Vývoj intenzit DF testovaných materiálů s rostoucím opotřebením HSS řezného nástroje s povlakem (Al,Ti,Cr)N.

7 ZÁVĚRY

Celkové závěry disertační práce lze rozdělit do několika dílčích oblastí, přičemž obecné závěry získané při obrábění kompozitních materiálů jsou následující:

- velikost měrných řezných sil při obrábění kompozitních materiálů byla nejvíce citlivá na orientaci vláken, která způsobila zvýšení hodnot k_c v maximu až o 83,8% (sklo-polyester) a o 68,7% (uhlíko-epoxid) při nastavení vláken výztuže koaxiálně ke směru efektivní řezné rychlosti, kdy převládá tahový mód porušování vláken;

- z technologických veličin ovlivňujících hodnoty měrných řezných sil byl prokázán vliv posuvu na zub a šířky záběru hlavního ostří, u kterých byl pozorován plynulý nelineární pokles hodnot k_c. Oproti tomu změna řezné rychlosti v testovaném rozsahu řezných rychlostí neměla statisticky významný vliv na velikost k_c ($p=0,1$);

- u nástroje ze SK s povlakem DLC při obrábění sklo-polyesterového a uhlíko-epoxidového kompozitního materiálu nepřekročilo hřbetní opotřebení po daném počtu průjezdů materiálem hodnotu VB=0,02 mm (pro 51 průjezdů), přičemž tímto rozvojem opotřebení došlo k nárůstu velikosti k_c přibližně o 9 MPa (2,34%).

Z dalších měření a analýz opotřebení nástrojů při obrábění sklo-polyesterového kompozitního materiálu pak vyplývá:

- Při obrábění tohoto materiálu nástrojem z HSS bylo dosaženo hodnoty opotřebení VB=0,23 mm již po 13. průjezdu materiálem (cca 5 min obrábění) i přes aplikaci otěruvzdorného povlaku (Al,Ti,Cr)N. V průběhu testování došlo ke zvýšení průměrné měrné řezné síly o 408 MPa (122%) a nárůstu rozptylu o více než 300%.

- ze studie účinku PVD povlaků aplikovaných na nástrojích ze SK při obrábění tohoto materiálu vyplynulo, že nejnižší hodnoty měrných řezných sil (průměrně o 37 MPa) byly získané při obrábění nástrojem s DLC povlakem. Naopak nejvyšší hodnoty k_c (průměrně o 34 MPa) byly naměřeny při obrábění s nástrojem, na kterém byl nanesen povlak nACo.

Z provedených měření a analýz obrábění uhlíko-epoxidového kompozitního materiálu pak vyplývá:

- z porovnání účinku PVD povlaků aplikovaných na nástrojích ze SK při obrábění tohoto materiálu vyplynulo, že nejnižší hodnoty měrných řezných sil (průměrně o 71 MPa) byly získané opět při obrábění nástrojem s DLC povlakem. Naopak nejvyšší hodnoty k_c (průměrně o 31 MPa) byly naměřeny při obrábění nástrojem s povlakem nACo.

Z analýzy korelace mezi zvukem generovaným obráběcím procesem a dalšími sledovanými veličinami při frézování oceli 15 260.7 a sklo-polyesterového kompozitního materiálu nástroji z HSS pak vyplývá:

- při nastavení řezné rychlostí v_c=35 m/min (a dalších řezných podmínek) byl měřitelný vývoj intenzit i kmitočtů dominantních frekvencí ve zvukovém spektru pouze při obrábění oceli 15 260.7;

- při obrábění sklo-polyesterového kompozitního materiálu se stejnými řeznými podmínkami se ve zvukovém spektru nahodile objevovaly frekvence s nižšími intenzitami generované pohyblivými částmi stroje, a proto nebylo možné sledovat žádný vývoj dominantních frekvencí (DF). Po zvýšení řezné rychlosti na v_c=50 m/min, se ve zvukovém spektru postupně objevily tři DF s kmitočty 70 Hz (zubová frekvence), 281 Hz (vyšší harmonická) a 481 Hz (generovaná opotřebením), u kterých bylo možné sledovat pouze nárůst intenzit (nikoliv nárůst intenzit i kmitočtu, jak tomu bylo při obrábění oceli 15 260.7);

- podrobnější analýza zvukových spekter při obrábění oceli 15 260.7 dále ukázala, že při hodnotě hřbetního opotřebení nástroje v intervalu VB=0,11–0,14 mm se začaly objevovat ve zvukovém spektru DF o vyšším kmitočtu (asi 6 kHz a intenzitě (0,07 Pa), které jsou typickým průvodním jevem obrábění s opotřebeným nástrojem. U těchto frekvencí se dále vyvíjely intenzity i kmitočty s postupným růstem opotřebení nástrojů;

- nejintenzivnější zvuk $Int._{ocel}$=1,1 Pa byl zaznamenán při obrábění oceli 15 260.7 nepovlakovaným nástrojem s hodnotou opotřebení VB=0,21 mm;

- při frézování oceli 15 260.7 s řeznou rychlostí v_c=35 m/min byly nalezeny korelace (p=0,1) mezi kmitočtem DF a VB opotřebením (i měrné řezné síly) a intenzitou DF a VB opotřebením, resp. měrnou řeznou silou;

- při frézování sklo-polyesterového kompozitního materiálu s řeznou rychlostí v_c=50 m/min byly nalezeny pouze korelace (p=0,1) mezi intenzitou DF a VB opotřebením, resp. měrnou řeznou silou.

REFERENCE

[1] WEINERT, K., I. INASAKI, J. W. SUTHERLAND a W. WAKABAYSHI. *Dry machining and Minimum Quantity Lubrication*. Annals of CIRP [online]. 2004, č. 53, s. 511-537 [vid. 2014-01-01]. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)60027-4. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850607600274>

[2] ČERNOHORSKÝ, J. *Nejrozšířenější využití kompozitů v České republice je ve výrobě malých sportovních letounů*. Technický týdeník, 2006, roč. 54, č. 11, s. 4. ISSN 0040-1064.

[3] HUMÁR, A. a M. PÍŠKA. *Cutting forces analysis when drilling glass fibre reinforced plastics.* In Proceedings of the 31st International SAMPE Technical Conference, vyd. 31. Advanced Materials & Processes Preparing for the New Millenium. McCormick Place, CHICAGO, Illinois, USA: SAMPE, 1999. s. 276-285. ISBN: 0-938994-85- 9.

[4] SKOPEČEK, T., *Vliv vybraných parametrů procesu na řezné síly při HSC*. MM Průmyslové spektrum, [online], [vid. 2014-01-01], Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/vliv-vybranych-parametru-procesu-na-rezne-sily-pri-hsc.html>

[5] HUMÁR, Anton, *Technologie obrábění – 1. část, studijní opory pro magisterské studium,* UST FSI VUT v Brně, 2003, [Online], [vid. 2014-01-01], dostupné z: <http://www.fme.vutbr.cz/opory/pdf/VyrobniTechnologie_I.pdf>

[6] MACEK, K., ZUNA, P. a kol. *Strojírenské materiály. 1.* vydání Praha: ČVUT, 2003. 204 s. ISBN 80-01-02798-8.

[7] KINZLE, O. *Die Bestimmung von Kräffen und Leistungen an spanenden Werkzeuden und Werkzeugmaschinen*. German. VDI– Z 94 (1952) 11/12, s. 299-305

[8] VELCHEV, Stephan, Ivan KOLEV a Krasimir IVANOV. *Empirical mathematical models of the dependence of the specific cutting force on thickness of cut in turning*. Annals of faculty engineering hunedoara: International Journal of Engineering. Romania: University Politehnica Timisoar, 2011, roč. 9, č. 5, s. 303-312. ISSN 584 – 2673.

[9] DEGNER, W. H. LUTZE a E. SMEIKAL, *Spanende Formung: Teorie, Berechnung und Richtwerte*, Münhen, Wien, C. H. Verlag, 1993.

[10] SPUR, G. a T. STEFERLE. *Handbuch der Fertigungstechnek.* Vol. 1, Moskwa, Mashinostroenie, 1985 (Russian).

[11] KÖNIG, W. a K. ESSEL. *Spezufische Schittkraftwerte die Zerspanung metallischer Werkstofe*. Verlag Stahleisen, Düsseldorf, German 1973.

[12] STAHL, Jan-Eric. *Metal cutting: Theories and Models*. Lund Univeristz: Division of Production and Material Engineering, 2012. ISBN 978-91-637-1336-1.

[13] KOŘÍNEK, Zdeněk. *Definice a historie kompozitů*. 15 s. [online]. [vid. 2014-01-01]. Dostupné z: < http://www.volny.cz/zkorinek/historie.pdf>.

[14] HUMÁR, A., PÍŠKA, M., JANSKÝ, M., PODRÁBSKÝ, T. a V. ČECH, *Technologie zpracování nových kompozitních materiálů tuzemské výroby.* Závěrečná zpráva grantového projektu GAČR č.101/98/0855. Brno: Ústav strojírenské technologie VUT FSI, prosinec 2000. 154 s.

[15] *Cutters for Composite machining*, [online]. [vid. 2014-01-01]. Dostupné z: <http://www.mmsonline.com/products/cutters-for-composite-machining>

[16] *Composites in manufacturing*, [online]. [vid. 2014-01-01]. Dostupné z: <http://www.composites-manufacturing.com/features/31/20127/217/>

[17] SEDLÁČEK, J. *Efektivní obrábění vláknově vyztužených kompozitních materiálů*. Disertační práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, 2010. 104 s, 7 příloh. Vedoucí disertační práce doc. Ing. Anton HUMÁR, CSc.

[18] KOENIG W., WULF Ch., GRAB P. a H. WILLERSCHEID, *Machining of fiber reinforced plastics,* Annals of CIRP, 1985, č. 34, s. 537–547.

[19] KOPLEV A., LYSTRUP A. a T. VORM, *The cutting process, chips, and cutting forces in machining CFRP*, Composites 1983, č. 14, s. 371–376.

[20] TAKEYAMA H. a N. IJIMA, *Machinability of glass fiber reinforced plastics and application of ultrasonic machining*, Annals of CIRP, 1988, č. 37, s. 93–96.

[21] KIM K. S., LEE D. G., Y. K. KWAK a S. NAMGUNG, *Machinability of carbon fiber–epoxy composite materials in turning*, Journal of Materials Processing Technology, 1992, č. 32, s. 553–570.

[22] WERN C. W. a M. RAMULU, *Machining mechanics in fiber reinforced plastics*, ASME, Applied Mechanics Division, AMD 208, 1995, s. 1–28.

[23] DANDEKAR C. a Y. C. SHIN, *Multi-step 3D finite element modeling of subsurface damage in machining particulate reinforced metal Matrix composites*, Composites, 2009, s. 1231–1239.

[24] ZHOU L., HUANG S. T., D. WANG a X. L. YU, *Finite element and experimental studies of the cutting process of SiCp/Al composites with DLC tools*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010. doi:10.1007/s00170-010-2776-2.

[25] SOO S. L. a D. K. ASPINWALL, *Developments in modeling of metal cutting processes*, Proceedings of the IMechE, Part L: Journal of Materials Design and Applications, 2007, s. 197–211.

[26] KALLA D., J. SHEIKH-AHMAD a J. TWOMY , *Prediction of cutting forces in helical end milling fiber reinforced polymers*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2010, 50 vid., s. 882–891.

[27] ZHANG, L., ZHANG, H. a X. WANG, A *Force Prediction Model for Cutting Unidirectional Fibre-reinforced Plastics*. Machining Science and Technology. č. 5, 2001. str. 293-305. ISSN 1091-0344.

CURRICULUM VITAE

Ing. Zdeněk Fiala
narozen 5. 9. 1985
svobodný

Kontakt

Svážná 18, 634 00 Brno
Tel. 775 021 732
E-mail fialaml@centrum.cz

Vzdělání

Aktuální studium	Doktorské: VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, studijní obor Strojírenská technologie Téma DP: Analýza měrných řezných sil pro nové obráběné materiály a CNC technologie (obrábění kompozitních materiálů)
2008-2010	Magisterské: VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, studijní obor Strojírenská technologie a průmyslový management Téma DP: Vibrace při obrábění kovů
2005-2008	Bakalářské: VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, studijní obor Strojní inženýrství Téma BP: Modely materiálů pro simulaci dynamických dějů ve tváření
2001-2005	Střední průmyslová škola strojnická a slévárenská a Vyšší odborná škola technická, Brno, obor Počítačová grafika ve strojírenství

Kurzy, osvědčení

2013	Měření vibrací a práce v prostředí PULSE (*Brüel & Kjær*)
2013	Přesné metody obrábění
2011	Základní školení v seřizování, programování a práci se sondami Renishaw
2011	Měření zvuku a vibrací
2010	Matematická statistika a plánovaný experiment
2004	Počítačová podpora technologického programování

Pedagogická praxe – výuka na VUT v Brně

Technologie obrábění

Výrobní technologie II.

Odborné přednášky: Vibrace při obrábění

Účast na výzkumných projektech

2013	Výzkum pokročilých technologií obrábění pro konkurenceschopné strojírenství
2013	Problematika obrábění svarových spojů
2012	Vibrace generované při obrábění flexibilních obrobku
2012	Nový HSS frézovací nástroj s vnitřním chlazením pro hrubování
2011	Analýza řezivosti 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

Vedoucí a hlavní řešitel projektu

2014	Analýza zvukového spektra obráběcího procesu
2013	Analýza měrných řezných sil pro nové obráběné materiály

Jiné dovednosti

Anglický jazyk velmi pokročilý

Německý jazyk mírně pokročilý

Řidičský průkaz skupiny A, B

Znalost práce na PC: MS Office, AutoCad, Autodesk Inventor, Statistica, Minitab, Matlab

Zájmy

Člen Oddílu národní házené Draken Brno. Zkušenosti s pozicí programového a oddílového vedoucího na letním dětském táboře (LDT Zubří u Nového Města na Moravě). Mezi další zájmy patří např. turistika, cyklistika a cestování.

Abstrakt

Disertační práce je zaměřena na analýzu měrných řezných sil a doprovodných jevů při obrábění nových materiálů, kompozitních materiálů. Experimentální část práce je rozdělena na dvě hlavní kapitoly.

V první kapitole je podrobně analyzován vývoj měrných řezných sil při změně řezných podmínek. Experimentální obrábění sklo-polyesterového a uhlíko-epoxidového kompozitního materiálu je popsáno pro případy nastavení vláken výztuže pod úhly 0º a 90º (tzn. orientace vláken ve směru a kolmo na směr posuvové rychlosti). Dále je popsán vliv opotřebení nástroje na změnu velikosti měrné řezné síly. V poslední části kapitoly je provedeno srovnání hodnot měrných řezných sil při obrábění frézovacími nástroji z SK, na nichž jsou naneseny rozličné typy povlaků.

Druhá kapitola popisuje měření zvukových spekter obráběcího procesu, tvorbu zvukových map a hledání možných závislostí mezi dominantními frekvencemi zvukového spektra a měrnou řeznou silou, respektive VB opotřebením řezného nástroje. Tato měření jsou popsána pro případy obrábění oceli 15 260.7 a sklo-polyesterového kompozitního materiálu.

Abstract

This dissertation thesis is focused on the analysis of specific cutting forces and accompanying effects during machining of the new materials, composite materials. The experimental part is split up to two main chapters.

In the first chapter, the development of specific cutting forces is analyzed in detail when cutting conditions are changing. The experimental machining of glass/polyester and carbon/epoxy composites is described for fibers orientations 0º a 90º (ie, the orientation of the fibers in the feed rate direction and perpendicular to the feed rate direction). The influence of the cutting tool flank wear on the specific cutting force is investigated further. The last section compares the values of specific cutting forces when machining with carbide milling tools deposited by different types of coating.

The second chapter describes the measurement of sound spectrums generated by cutting process, sound maps creating and finding possible correlations between dominant frequencies of the sound and the specific cutting forces, or the cutting tool flank wear. The measurements are described for the cases of machining steel 15 260.7 and glass-polyester composite material.