



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

# ANALÝZA MĚRNÝCH ŘEZNÝCH SIL PRO NOVÉ OBRÁBĚNÉ MATERIÁLY A CNC TECHNOLOGIE

ANALYSIS OF SPECIFIC CUTTING FORCES FOR NEW MATERIALS AND CNC MACHINING

DIZERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. ZDENĚK FIALA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. MIROSLAV PÍŠKA, CSc.

BRNO 2014

## Abstrakt

Dizertační 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  $0^\circ$  a  $90^\circ$  (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 nanášeny 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.

### Klíčová slova

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

## 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  $0^\circ$  a  $90^\circ$  (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.

### Key words

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

### **Bibliografická citace**

FIALA, Z. *Analýza měrných řezných sil pro nové obráběné materiály a CNC technologie*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 125 s. Vedoucí dizertační práce prof. Ing. Miroslav Pška, CSc.

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem dizertační práci na téma „Analýza měrných řezných sil pro nové obráběné materiály a CNC technologie“ vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

V Brně 2014

---

Ing. Zdeněk Fiala

## **Poděkování**

Děkuji tímto svému vedoucímu prof. Ing. Miroslavu Píškovi, CSc. za cenné připomínky a rady při vypracování dizertační práce.

## Obsah

1. Úvod .....	8
2. Cíle dizertační práce .....	10
3. Měrná řezná síla (měrný řezný odpor).....	11
4. Technologie frézování .....	14
4.1 Průřez třísky při čelním frézování.....	14
4.1.1 Průřez třísky při čelním frézování nástrojem se šroubovicí.....	14
4.2 Řezné síly při čelním frézování .....	15
4.2.1 Matematické modely řezných sil.....	15
4.3 Vliv opotřebení hřbetu nástroje na silové zatížení nástroje .....	16
5. Opotřebení řezného nástroje .....	19
5.1 Metody měření opotřebení.....	19
6. Vibrace při obrábění .....	20
6.1 Diagramy stability.....	23
6.2 Vliv opotřebení nástroje na stabilitu obráběcího procesu.....	24
7. Nové obráběné materiály – kompozitní materiály.....	26
7.1 Definice a klasifikace.....	26
7.1.1 Historický vývoj kompozitních materiálů.....	29
7.2 Matrice .....	29
7.2.1 Nenasycené polyestery (UP) .....	29
7.2.2 Vinylesterové pryskyřice (VE).....	30
7.2.3 Epoxidové pryskyřice (EP) .....	31
7.3 Vlákná .....	32
7.3.1 Skelná vlákna .....	32
7.3.1.1 Výroba pultruzně vyrobeného sklo-polyesterového kompozitu.....	33
7.3.2 Uhlíková vlákna .....	34
7.4 Obrábění kompozitních materiálů.....	36
7.5 Řezné materiály pro obrábění kompozitních materiálů .....	37
7.5.1 Rychlořezné oceli .....	37
7.5.2 Slinuté karbidy .....	38
7.5.3 Polykrystalický diamant.....	39
7.6 Mechanismus porušení vláken.....	39

7.7	Proces řezání kompozitních materiálů .....	40
8.	Analýza měrných řezných sil při frézování kompozitních materiálů .....	44
8.1	Specifikace obráběných materiálů .....	45
8.1.1	Pultruzně vyrobený sklo-polyesterový kompozit.....	45
8.1.2	Uhlíko-epoxidový kompozit .....	46
8.2	Specifikace nástrojů použitých pro obrábění kompozitů.....	47
8.3	Průběh měrných řezných sil při změně řezných podmínek .....	50
8.3.1	Změna posuvu .....	51
8.3.2	Změna šířky záběru ostří.....	56
8.3.3	Změna řezné rychlosti.....	60
8.3.4	Kontrolní měření .....	63
8.4	Vliv opotřebení nástroje na hodnoty měrných řezných sil .....	65
8.5	Měrné řezné síly při obrábění nástroji s rozličnými typy povlaků .....	70
8.5.1	Porovnání $k_c$ při změně velikosti posuvu .....	71
8.5.2	Porovnání $k_c$ při změně šířky záběru ostří.....	75
8.5.3	Porovnání $k_c$ při změně řezné rychlosti .....	76
8.5.4	Kontrolní měření .....	79
8.5.5	Celkové porovnání $k_C$ testovaných nástrojů.....	86
9.	Vztah měrná řezná síla – dominantní frekvence obráběcího procesu .....	87
9.1	Referenční měření pro ocel 15 260.7 .....	88
9.1.1	Popis materiálu.....	88
9.1.2	Specifikace nástrojů použitých pro obrábění .....	89
9.1.3	Měření silového zatížení – měrné řezné síly .....	90
9.1.4	Zvukové mapy testovaných nástrojů.....	95
9.2	Měření pro sklo-polyesterový kompozitní materiál.....	104
10.	Závěry .....	111
	Perspektiva dalších prací.....	113
	Reference .....	114
	Autorovy publikace k danému tématu .....	122
	Seznam použitých zkratk a symbolů.....	123
	Seznam příloh .....	125

## 1. Úvod

V technologii obrábění je v dnešní době požadována konkurenceschopnost a ekonomičnost výroby, což znamená minimalizovat výrobní náklady. Moderní obráběcí stroje společně s novými řeznými nástroji umožňují dosáhnout vysoké produktivity obrábění při zachování požadované rozměrové a geometrické přesnosti [1], je ovšem nutné nastavit optimální výrobní podmínky.

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 [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 geometrií 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  $1 \text{ mm}^2$ , její jednotkou je MPa [6].

Mezi veličiny, které se při obrábění, popř. po obrábění, měří a vyhodnocují, patří zejména silové zatížení, měrné řezné síly, drsnost obrobené plochy a opotřebení řezného nástroje. Obráběcí proces bývá ve většině případů 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. Zaznamenaný zvuk 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 zvuk značící vyšší opotřebení nástroje se s postupným růstem opotřebení dále mění, je tedy možné sledovat jeho vývoj a hledat případné závislosti mezi dominantními frekvencemi zvukového spektra a opotřebením řezného nástroje, popř. měrnými řeznými silami.

## 2. Cíle dizertační práce

Dizertační 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.

Díčí 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 nanášeny 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 vztahovaná 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]:

$$F_c = k_{c11} \cdot b \cdot h^{1-m_c} \quad (3.1)$$

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

$$k_c = k_{c11} \cdot h^{-m_c} \quad (3.2)$$

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 a typ technologické operace [8].

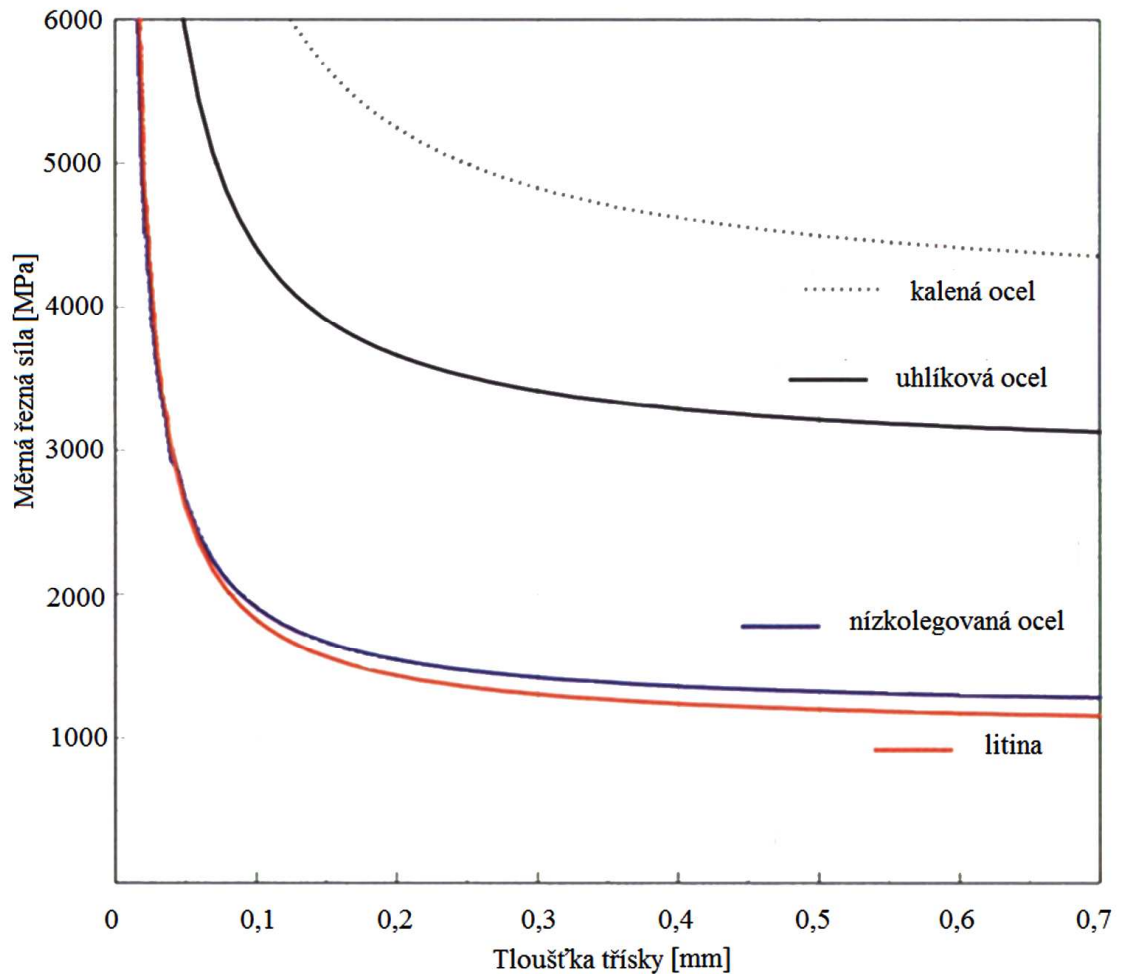
Pro výpočet řezné síly se, při soustružení různých druhů materiálů za konstantní řezné rychlosti, často používá vztah:

$$F_c = C_{Fc} \cdot a_p^{x_{Fc}} \cdot f^{y_{Fc}} \quad (3.3)$$

Za předpokladu, že šířka záběru ostří  $a_p = 1 \text{ mm}$  ( $x_{Fc} = 1$ ) a velikost tloušťky třísky  $h$  odpovídá velikosti posuvu  $f$ , lze vyjádřit konstantu  $C_{Fc}$  jako měrnou řeznou sílu  $k_c$ :

$$k_c = \frac{F_c}{a_p \cdot f} = \frac{C_{Fc}}{h^{1-y_{Fc}}} = k_{c11} \cdot h^{-m_c} \quad (3.4)$$

kde konstanta  $C'_{Fc} = k_{c11}$  a  $m_c = 1 - y_{Fc}$  [8].



Obr. 3.1 Závislost měrné řezné síly na tloušťce třísky [12].

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

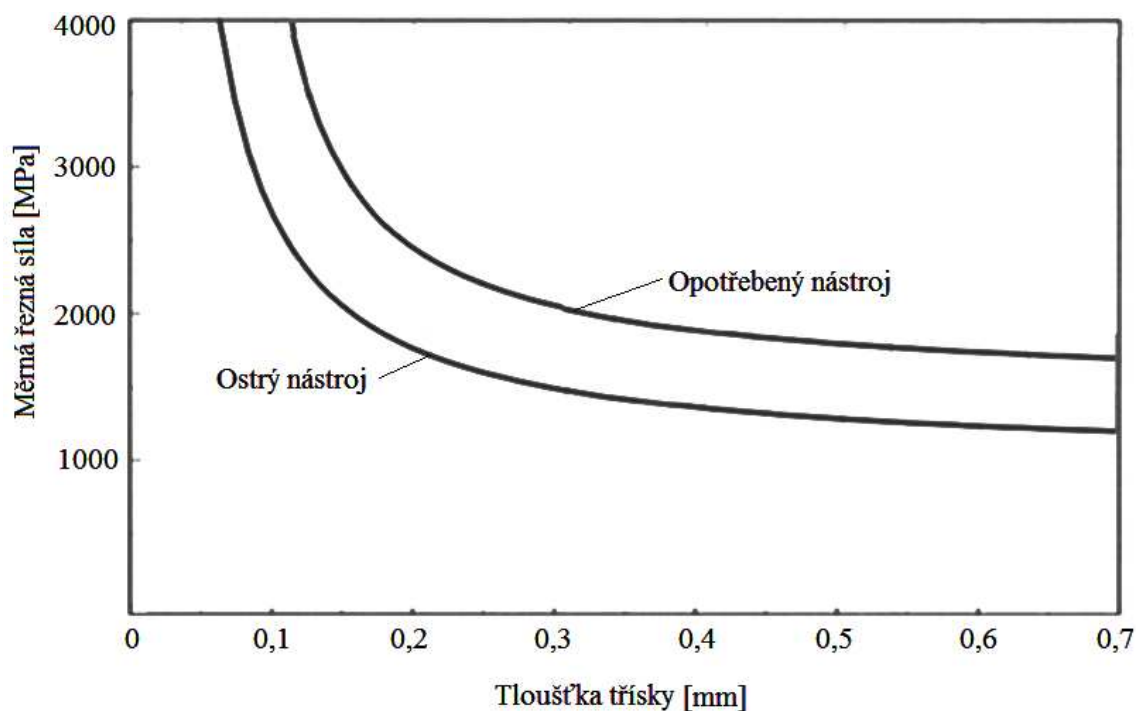
$$k_c = \frac{k_{c11}}{h^{m_c}} = \frac{k_{c11}}{(f \cdot \sin \kappa_r)^{m_c}} \quad (3.5)$$

Dochází-li ke zmenšování tloušťky třísky, zvětšuje se poměrná hodnota deformační práce, protože se zvětšuje stupeň zpevnění materiálu i podíl pasivních prací na tvorbu třísky. Poměrně malý vliv má na velikost měrné řezné síly šířka třísky [6].

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 nárůstu.

Při růstu opotřebení řezného nástroje dochází k postupnému zvyšování měrné řezné síly (viz obr. 3.2).



Obr. 3.2 Vliv opotřebení nástroje na velikost měrné řezné síly uhlíkové oceli [12].

## 4. Technologie frézování

Technologie frézování je metoda obrábění, při které je materiál obrobku odebírán břity rotujícího nástroje. Posuv nejčastěji koná obrobek, převážně ve směru kolmém k ose nástroje. U moderních frézovacích strojů jsou posuvové pohyby plynule měnitelné a mohou se realizovat ve všech směrech (obráběcí centra, víceosé CNC frézky). Řezný proces je přerušovaný, každý zub frézy odřezává krátké třísky proměnné tloušťky. Z technologického hlediska se v závislosti na použitém nástroji rozlišuje frézování válcové a čelní. Válcové frézování se převážně uplatňuje při práci s válcovými a tvarovými frézami. Zuby frézy jsou vytvořeny pouze po obvodu nástroje, hloubka odebírané vrstvy se nastavuje kolmo na osu frézy a na směr posuvu. Obrobená plocha je rovnoběžná s osou otáčení frézy. V závislosti na kinematice obráběcího procesu se rozlišuje frézování nesousledné a sousledné [13].

### 4.1 Průřez třísky při čelním frézování

U čelního frézování se tloušťka třísky mění v závislosti na úhlu posuvového pohybu  $\varphi_i$  a je navíc ovlivněna i úhlem nastavení hlavního ostří  $\kappa_r$ , proto se její okamžitá hodnota vypočte ze vztahu [13]:

$$h_i = f_z \cdot \sin \varphi_i \cdot \sin \kappa_r \quad (4.1)$$

Jmenovitá šířka třísky  $b_i$  je pro libovolné  $\varphi_i$  konstantní a vypočítá se podle vztahu:

$$b = \frac{a_p}{\sin \kappa_r} \quad (4.2)$$

Jmenovitý průřez třísky  $A_{Di}$ :

$$A_{Di} = b \cdot h_i = a_p \cdot f_z \cdot \sin \varphi_i \quad (4.3)$$

#### 4.1.1 Průřez třísky při čelním frézování nástrojem se šroubovicí

Plocha průřezu třísky odpovídá analýze šroubovitého konoidu a lze ji odvodit pro každý zub a jeho úhel záběru. Zub při frézování postupně mění v čase velikost průřezu třísky. V souvislosti s touto časovou změnou se mění i měrná řezná síla, celkové zatížení zubu frézy i řezný výkon [14].

Pro výpočet průřezu třísky lze použít například vztah:

$$A_D = f_z \cdot \sqrt{R^2 + \left(\frac{s_s}{2\pi}\right)^2} \cdot \sum_{i=1}^{z_z} (\cos \varphi_{1i} - \cos \varphi_{2i}) \quad (4.4)$$

Odvození tohoto vzorce lze nalézt ve [14].

## 4.2 Řezné síly při čelním frézování

Při stanovení velikostí řezných sil při frézování se vychází ze silových poměrů na jednom břitu, který je v poloze určené úhlem  $\varphi_i$ .

Síla působící na  $i$ -tý zub frézy je pak dán vztahem:

$$F_{ci} = A_{Di} \cdot k_{ci} \quad (4.5)$$

Měrná řezná síla je tedy dána vztahem:

$$k_{ci} = \frac{F_{ci}}{A_{Di}} \quad (4.6)$$

Celková řezná síla, působící na frézu je dána vztahem, kde  $z_z$  je počet zubů v záběru [6].

$$F_c = \sum_{i=1}^{z_z} A_{Di} \cdot k_{ci} \quad (4.7)$$

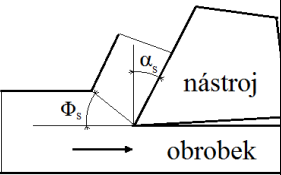
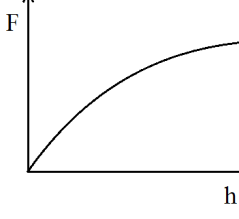
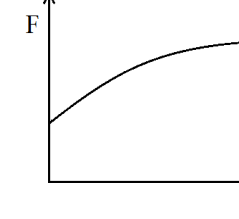
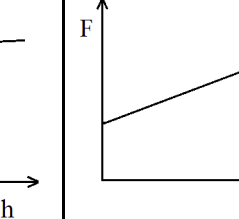
Z této silové analýzy vyplývá cyklické zatěžování frézovacích hlav, které může mít negativní důsledky na průběh opotřebení břitů a vznik chvění [14].

Síla se v průběhu frézování dále mění v závislosti na stavu opotřebení frézy [15]. Tato skutečnost je nejvíce patrná u nástrojů s břitý ve šroubovici, kdy na počátku frézování je fréza v důsledku pozitivních úhlů čela vtahována do řezu, a na konci frézování, kdy je zcela opotřebená, se od obrobeného povrchu výrazně odtlačuje. Měřením časových závislostí rozvoje sil při frézování pomocí dynamometrů lze nepřímo kvantifikovat i průběh opotřebení [14].

### 4.2.1 Matematické modely řezných sil

Pro popis řezných sil při frézování běžně slouží vyjádření silových poměrů na břitu nástroje. Literatura uvádí další varianty analytického vyjádření popisu řezných sil (viz obr. 3.2). Například pro simulace stability obráběcího procesu jsou používány lineární modely a modely založené na exponenciálních funkcích [16,17].

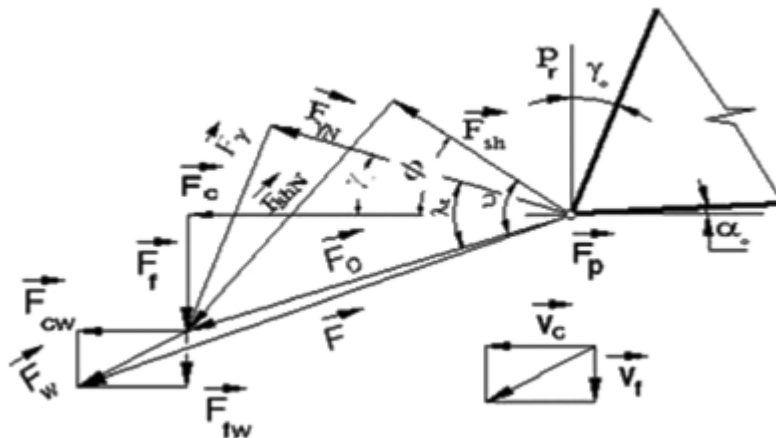
Tab. 4.1 Analytická vyjádření řezné síly [12].

Mechanický model	Mocninný model	Exponenciální model	Lineární model
Feng, Ernst, Merchant $F_S = \tau_s \cdot \left(\frac{b \cdot h}{\sin \Phi_S}\right)$	Kienzle $F_i = b \cdot k_i \cdot h^{1-m}$	Sthepan, Feng $F_i = b \cdot k_i \cdot h^x +$ $b \cdot k_i$	Altintas $F_i = k_i \cdot b \cdot h +$ $b \cdot k_i$
			

$b$  – šířka třísky,  $h$  – tloušťka třísky,  $\tau_s$  – smykové napětí,  $x$  a  $m_c$  – materiálové konstanty.

#### 4.3 Vliv opotřebení hřbetu nástroje na silové zatížení nástroje

Tato kapitola popisuje silové zatížení působící na břit nástroje a jeho vývoj s rostoucím hřbetním opotřebením. Dále uvádí, jakým způsobem se vlivem hřbetního opotřebení nástroje mění hodnota výsledné síly a měrné řezné síly. Následující vztah (4.8) vyjadřuje elementární přírůstek celkové síly [14].



Obr. 4.3 Změna velikosti a směru výsledného silového zatížení z  $F_0$  na  $F$  při uvažování hřbetního opotřebení [14].

$$dF = \sqrt{\left(\frac{\partial F_c}{\partial t} dt\right)^2 + \left(\frac{\partial F_f}{\partial t} dt\right)^2 + \left(\frac{\partial F_p}{\partial t} dt\right)^2} \quad (4.8)$$

Pro výpočet řezné síly je uveden vztah (4.5), ve kterém ovšem není uvažován nárůst síly vlivem opotřebení nástroje. Pro získání hodnoty řezné síly  $F_c$  při uvažovaném

opotřebení, je vztah doplněn o složky  $F_{cw}$ , jak je uvedeno ve vztahu (4.9). Ostatní složky silového zatížení jsou uvedeny ve vztazích (4.14 a 4.15) [14]

$$F_c = F_{c0} + F_{cw} \quad (4.9)$$

kde

$$F_{c0} = A_D \cdot kc = a_0 \quad (4.10)$$

$$F_{cw} = a_1 \cdot t + a_2 \cdot t^2 \quad (4.11)$$

po dosazení

$$F_c = a_0 + a_1 \cdot t + a_2 \cdot t^2 \quad (4.12)$$

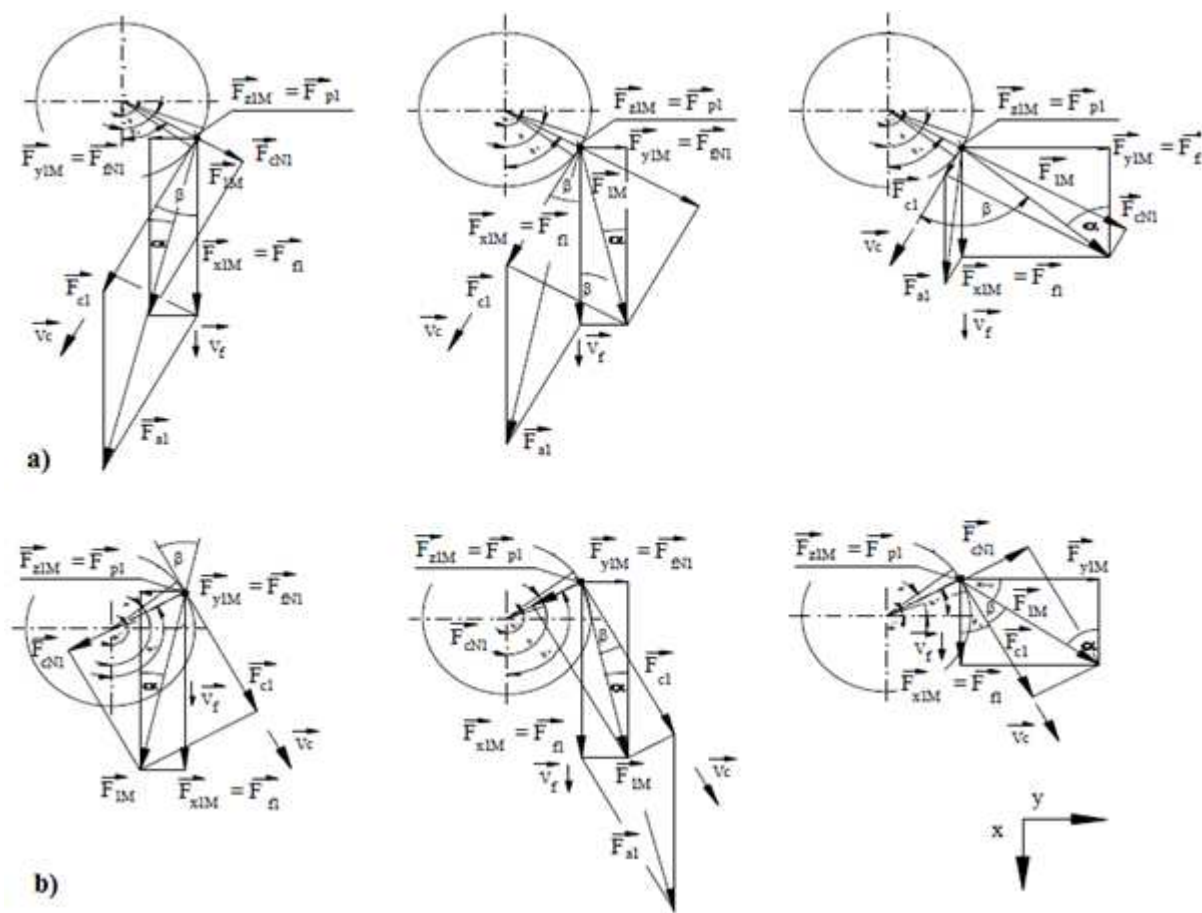
po dosazení do vztahu pro výpočet měrné řezné síly tedy je získán vzorec

$$k_c = \frac{F_c}{A_D} = \frac{a_0 + a_1 \cdot t + a_2 \cdot t^2}{A_D} \quad (4.13)$$

pro ostatní silové složky

$$F_f = k_{Ff} \cdot F_c \quad (4.14)$$

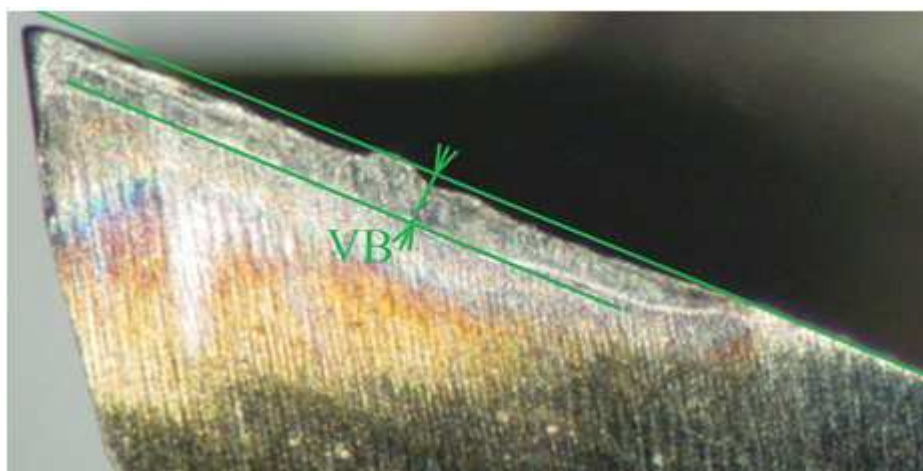
$$F_p = k_{Fp} \cdot F_c \quad (4.15)$$



Obr. 4.4 Silový rozklad v průběhu opotřebení pro frézování: a) nesousledné; b) sousledné [18].

## 5. Opotřebení řezného nástroje

V průběhu obráběcího procesu dochází ke kombinovanému zatěžování břitu, na nástroj působí mechanické, tepelné, chemické a další faktory, které ve výsledku způsobí opotřebení nástroje. Typů opotřebení řezných nástrojů je velké množství, patří mezi ně např. opotřebení na hřbetu, opotřebení ve tvaru žlábků, plastická deformace břitu, vydrolení ostří, opotřebení ve tvaru vrubu, tvorba nárůstku na hřbetu nástroje, hřebenové trhlínky na ostří, únavový lom, lom na břitu atd. [4,13]. Kritéria, která se nejčastěji používají pro kvantifikaci opotřebení nástroje, jsou šířka fazetky opotřebení na hřbetě – VB a hloubka výmolu na čele – KT.



Obr. 5.1 Šířka fazetky opotřebení na hřbetě.

### 5.1 Metody měření opotřebení

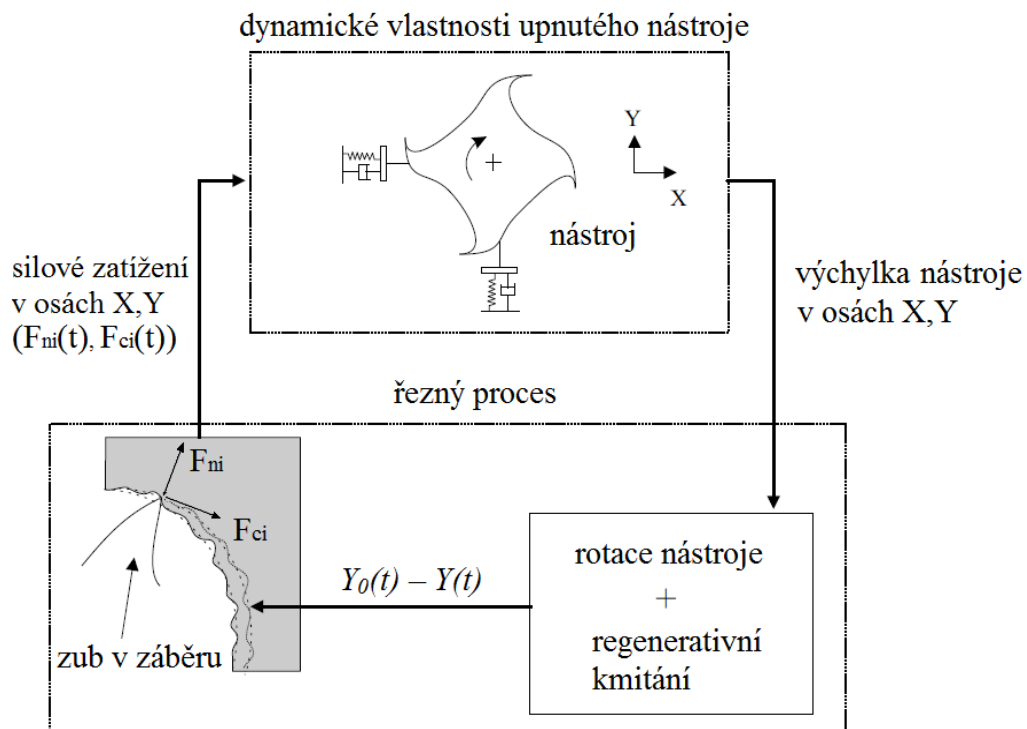
Metody pro stanovení opotřebení řezného nástroje se dělí na metody přímé a nepřímé. Přímé metody určují přímo hodnotu opotřebení vybraného kritéria. Mezi tyto metody patří např. měření VB opotřebení na dílenském mikroskopu, KT pomocí profiloměru, optické měření pomocí speciální kamery, vážení břitové destičky atd. Další přímé metody měření opotřebení nástroje je možno nalézt zde [19,20].

Nepřímé metody stanovují hodnotu opotřebení na základě dat naměřených určitým typem snímače. Mezi přístroje, které se používají pro nepřímé stanovení hodnoty opotřebení, patří např. dynamometr – měření sil, akcelerometr – měření vibrací (zrychlení, rychlosti a výchylky), mikrofón – měření zvuku v časové nebo frekvenční doméně. Tyto metody určují stav opotřebení nástroje bezprostředně v průběhu obrábění [15,20,21].

Podrobnosti o jednotlivých metodách stanovování VB opotřebení nástroje pomocí nepřímých metod lze nalézt např. zde [21–26].

## 6. Vibrace při obrábění

Vibrace generované nestabilním obráběcím procesem se označují jedním slovem jako chvění, v anglické literatuře se používá ekvivalentní označení *chatter*. Je to nežádoucí stav, při kterém dochází např. ke zhoršení kvality obrobené plochy, rychlejšímu opotřebení nástroje, nadměrnému hluku atd. Chvění se objevuje jako doprovodný jev u všech technologií jak při hrubovacích, tak i dokončovacích operacích. Vznik chvění je zapříčiněn vzájemným ovlivňováním řezného procesu a obráběcího stoje, tento vztah je možné vyjádřit pomocí zpětnovazebního obvodu (viz obr. 6.1). Tento jev byl popsán již v šedesátých letech minulého století prof. Tlustým, Poláčkem a jejich spolupracovníky. Vznik samobuzeného kmitání (chvění) se nejčastěji popisuje pomocí dvou principů, a to regenerativního principu a principu polohové vazby [27–29].



Obr. 6.1 Zpětnovazební obvod [30].

Samobuzené kmity podle regenerativního principu vznikají takovým způsobem, že kmitající břit nástroje obrábí zvlněný povrch obrobku, který byl vytvořen kmity předchozího zubu nástroje (frézování) popř. při předchozí otáčce obrobku (soustružení) viz obr. 6.2. Zvlněný povrch zapříčiní periodicky se měnící hodnotu hloubky řezu (průřezu třísky) a tím i periodicky se měnící velikost řezné síly [27–29].

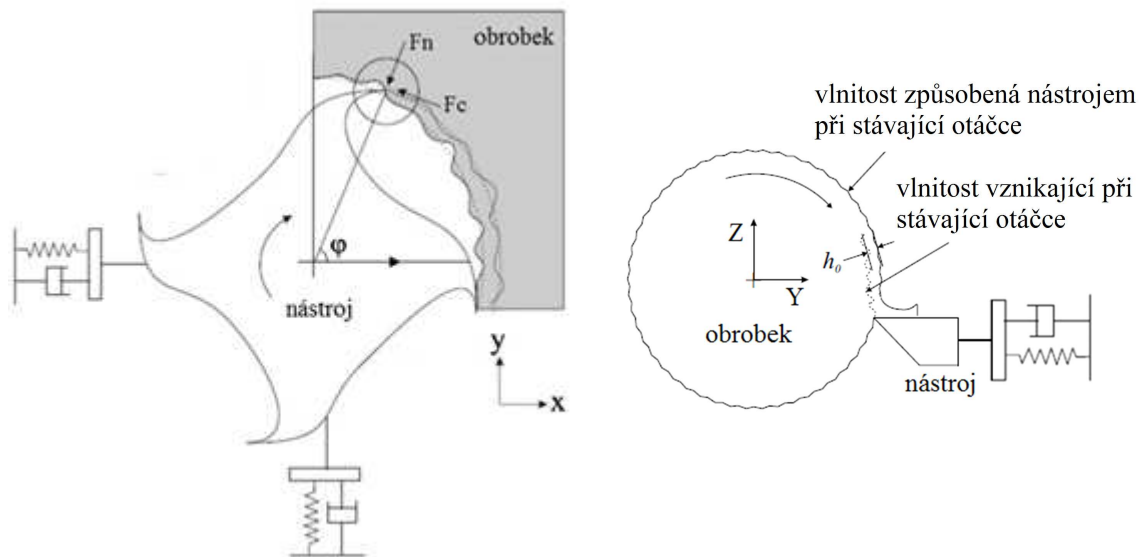
Maximální hodnota řezné síly při stabilním frézování, bez přítomnosti chvění, je dána šířkou záběru ostří  $a_p$ , posuvem na zub  $f_z$  a velikostí měrné řezné síly  $k_c$  dle vztahu

$$F_{stat} = a_p \cdot f_z \cdot k_c \quad (6.1)$$

nazývá se statickou silou, protože se její velikost mění pouze s tloušťkou třísky, ovšem nikoliv periodicky v průběhu jedné otáčky. Tato síla se opakuje periodicky až během každé následné otáčky nástroje s tzv. zubovou frekvencí, která je dána

$$f_z = n \cdot z \quad (6.2)$$

kde  $n$  jsou otáčky vřetene a  $z$  je počet zubů nástroje [27,29].



Obr. 6.2 Regenerativní princip při frézování a soustružení [30].

Při nestabilním obrábění navíc vzniká dynamická síla  $F_{dyn}$  tj. síla generovaná periodickou změnou tloušťky (průřezu) třísky na dráze mezi dvěma sousedními zuby frézy nebo na obvodu obrobku při soustružení. Tato síla je dána vztahem

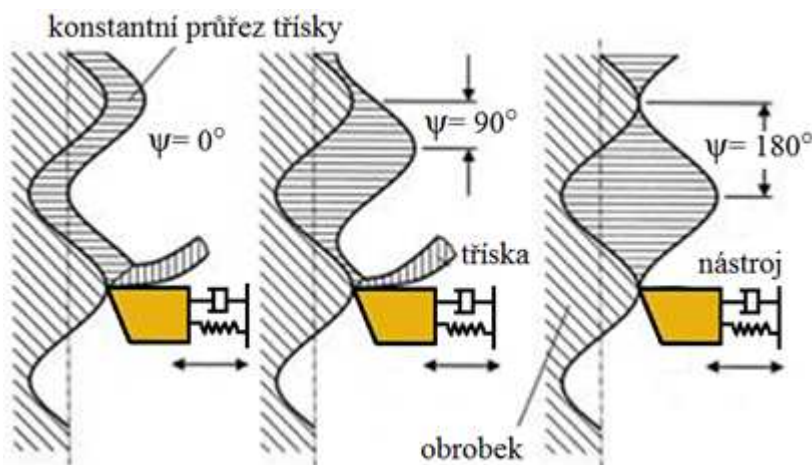
$$F_{dyn} = k_c \cdot a_p \cdot [Y_0(t) - Y(t)] \quad (6.2)$$

kde  $Y(t)$  značí kmity aktivního zubu v záběru a  $Y_0(t)$  vlny zanechané na obrobku předchozím zubem nástroje. Rozdíl amplitud  $Y_0(t) - Y(t)$  vyjadřuje proměnnou hloubku třísky. V případě, že je obrobek vůči nástroji velmi tuhý, jsou kmity  $Y(t)$  měřitelné pouze na nástroji (frézování). U méně tuhých obrobků, je třeba měřit i kmity obrobku. Výchylka  $Y(t)$  tak představuje relativní kmitání soustavy nástroj–obrobek [27–29].

Podle rovnice (6.2) obrábí řezný nástroj zvlněný povrch a současně sám kmitá. Kmity nástroje a vlny na povrchu obrobku jsou fázově posunuté o úhel  $\psi$ , který lze vyjádřit jako

$$\psi = 2\pi - 2 \cdot \arctg \frac{G(f)}{H(f)} \quad (6.3)$$

kde  $G(f)$  je reálná část přenosové funkce kmitavého systému a  $H(f)$  je část imaginární. Přenosová funkce se v angličtině označuje jako FRF (Frequency Response Function), získává se pomocí měření modálních parametrů upnutého nástroje (obrobku). Podrobnosti o frekvenčních přenosových funkcích, je možné nalézt například zde [31–36].



Obr. 6.3 Změna tloušťky třísky v závislosti na fázovém posuvu [37].

Samobuzené vibrace mohou být vybuzeny například nehomogenitou obráběného materiálu nebo samotným najetím (nárázem) nástroje do materiálu. Budící síla má tedy tvar skokové změny. Po vybuzení kmitů touto skokovou silou dále záleží na vlastnostech soustavy stroj–nástroj–obrobek, zda dojde k utlumení kmitů nebo naopak k jejich samobuzení [27,29].

Vztah mezi budicí a zubovou frekvencí je dán vztahem

$$f_{ch} = f_z \cdot \left( N + \frac{\psi}{2\pi} \right) \quad (6.4)$$

kde  $N$  představuje počet celých vln mezi sousedními zuby frézy, zatímco zlomek v závorce odpovídá zbylé necelé části vlny ( $\psi/2\pi < 1$ ). Frekvence chvění je tedy závislá na zubové frekvenci, respektive na otáčkách nástroje při obrábění. Při rozhodování, zda jde o stabilní či nestabilní obrábění je důležité, zda amplituda kmitů narůstá nebo je konstantní. Jestliže narůstá, pak integrál dodávané energie, resp. příkonu, podél dráhy bříty je větší než integrál energie spotřebované. V takovém případě je děj nestabilní. Stabilizuje se až výběhem zubu nad obráběný povrch a tím přerušením dodávky energie [32].

Pro určení meze stability mezi nestabilním a stabilním obráběním musí platit podmínka

$$|Y| = |Y_0| \quad (6.5)$$

příčemž platí

$$|Y| = |\phi| \cdot F_{dyn} \quad (6.6)$$

kde  $\phi$  je komplexní přenosová funkce uvažovaná, resp. měřená mezi břitem nástroje a obrobkem. Špaček [38] odvodil pomocí rovnic (6.2), (6.5) a (6.6) vztah pro šířku záběru ostří na mezi stability

$$a_p(f) = \frac{-1}{2 \cdot k_c \cdot G_o^{neg}(f)} \quad (6.7)$$

Řezný proces bude tedy stabilní právě tehdy, bude-li šířka záběru ostří menší než mezní. Protože šířka záběru ostří  $a_p$  je kladné číslo, je výše uvedená podmínka splněna pouze pro záporné hodnoty přenosové funkce  $G(f)$ , z tohoto důvodu je u přenosové funkce uveden index „neg“. Pro výpočet otáček příslušícím ke zjištěným hodnotám šířek záběrů ostří lze užít vztah

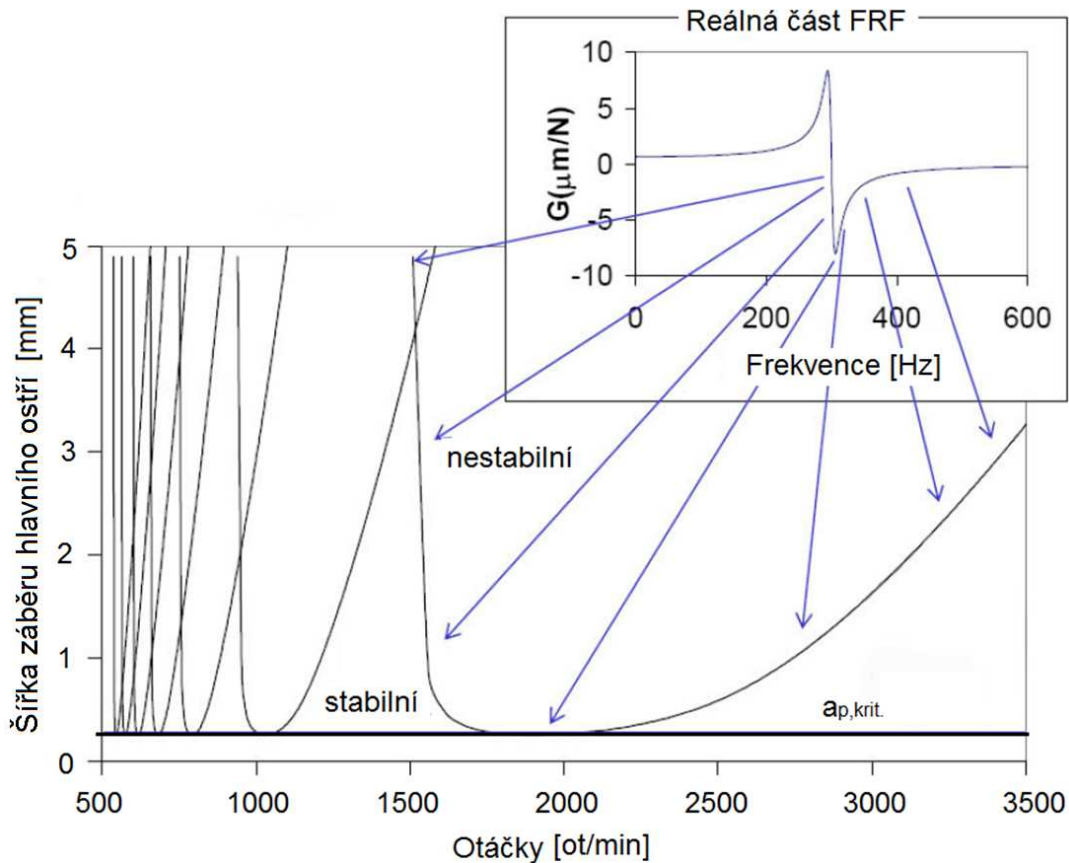
$$n = \frac{60 \cdot f}{z(N + \frac{\psi}{2\pi})} \quad (6.8)$$

kde  $z$  je počet zubů nástroje a  $N$  je počet celých vln na povrchu obrobku mezi po sobě následujícími řezy ( $N = \{1, 2, 3, \dots, n\}$ ) [27, 29]. Odvození vztahu (6.7) a (6.8) lze nalézt v odborné literatuře např. ve [17, 18, 27–30, 39–43].

## 6.1 Diagramy stability

Diagram stability je graf oddělující nestabilní kombinace šířek záběru a otáček vřetene (otáčky, při kterých vzniká chvění) od kombinací stabilních. Lze pomocí něj tedy nastavit takové řezné podmínky, při kterých bude obrábění stabilní a zároveň bude maximálně využit výkon obráběcího stroje [27, 28, 39].

Sestavení diagramu stability vyžaduje v první fázi měření amplitudo-fázové frekvenční charakteristiky nástroje upnutého v konkrétním stroji. Poté lze pomocí vztahů (6.7) a (6.8) sestavit z vybraných částí naměřené FRF přímo diagram stability.



Obr. 6.4 Diagram stability [44].

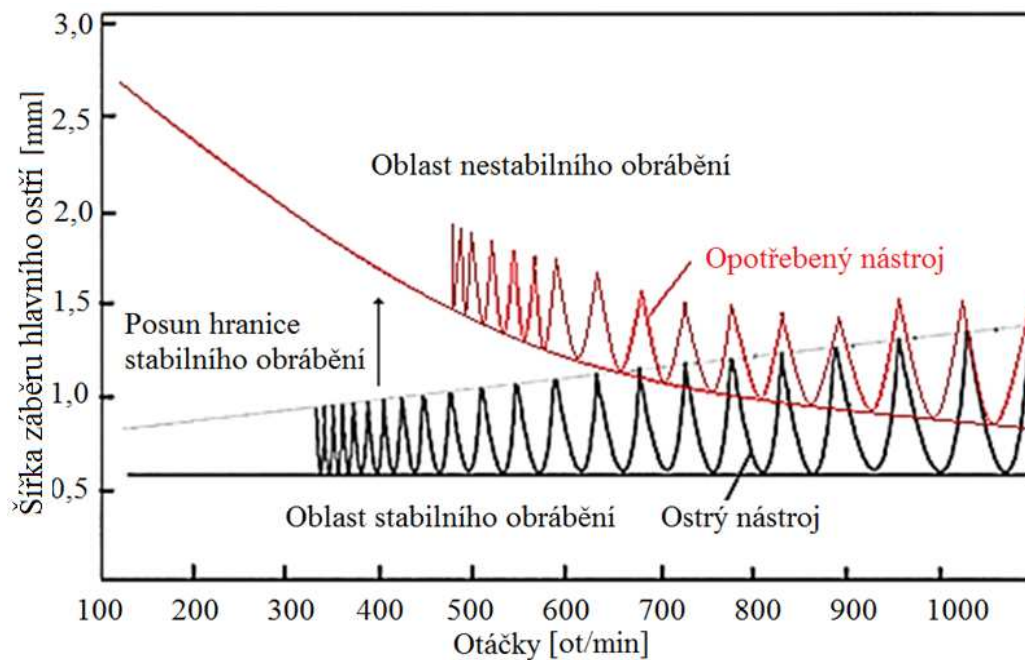
Oblast, ve které je zaručeno obrábění bez vzniku vibrací se nachází v části pod hraniční křivkou diagramu, naopak v oblasti nad křivkou jsou kombinace otáček a šířek záběrů hlavního ostří, při kterých nastává chvění. Diagram tedy umožňuje nastavit takové řezné podmínky, aby bylo v celém rozsahu otáček vyloučeno nebezpečí vzniku samobuzených vibrací. Tohoto lze dosáhnout tím, že je zvolena šířka záběru hlavního ostří menší, než je hodnota tzv. kritické mezní šířky záběru hlavního ostří získaná z minimální hodnoty přenosové funkce  $G(f)_{neg,min}$ . Pro dosažení větších úběrů materiálu při hrubovacích operacích je možné v diagramu nalézt pásma otáček, ve kterých je lze nastavit na několikanásobě větší hodnotu šířky záběru hlavního ostří při zachování stabilního obrábění [27,28,39,40].

## 6.2 Vliv opotřebení nástroje na stabilitu obráběcího procesu

Opotřebení řezného nástroje je spojeno například s horší kvalitou obrobené plochy, růstem řezných sil, nadměrným hlukem atd. S růstem opotřebení se ovšem od určité míry zvyšuje i stabilita obráběcího procesu [27,45].

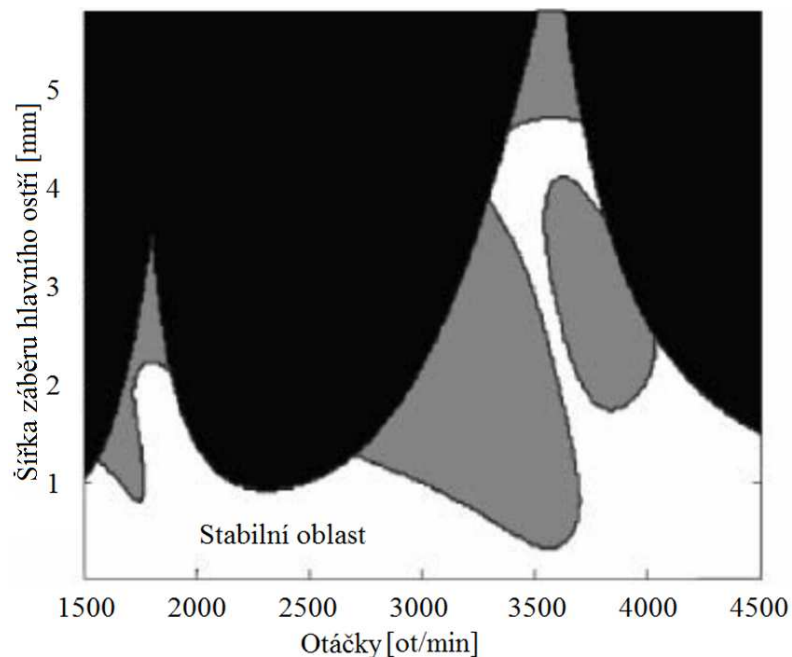
S rostoucím opotřebením nástroje dochází k posunu hranice mezi stabilním a nestabilním obráběním tak, že se rozšiřuje oblast stabilního obrábění. Tato skutečnost

platí ovšem pouze pro oblast nižších otáček vřetene, ve kterých se projevuje tzv. procesní tlumení [27,45].



Obr. 6.5 Diagram stability pro ostrý a opotřeбенý nástroj [45].

Právě problematika procesního tlumení je dnes často řešeným tématem, několik příkladů prací na toto téma je možné nalézt zde [46–51]. Diagramy zohledňující opotřeбенí nástroje při vyšších otáčkách se nazývají „Super diagramy“, podrobnosti o těchto diagramech lze nalézt například v práci [52,53].

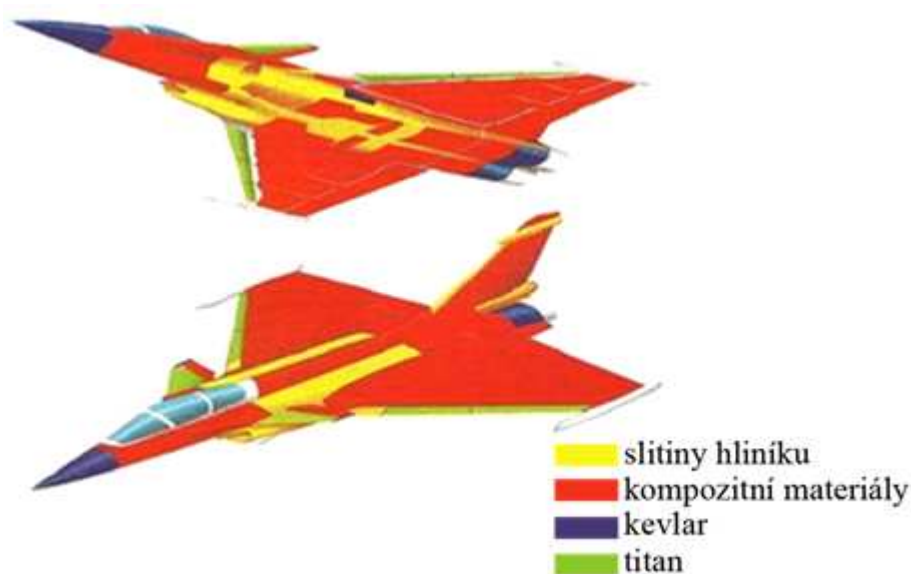


Obr. 6.6 „Super“ diagram stability [53].

## 7. Nové obráběné materiály – kompozitní materiály

Neustálé požadavky na snížení hmotností výrobků, při zachování mechanických vlastností, jsou u leteckého a automobilového průmyslu hnacím motorem pro vývoj nových materiálů. Pro své specifické vlastnosti se dnes po celém světě výrazně zvyšuje poptávka po nejrozličnějších typech kompozitních materiálů.

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 nejrozličnější průmyslové aplikace [2].



Obr. 7.1 Příklad použití kompozitních materiálů [54].

### 7.1 Definice a klasifikace

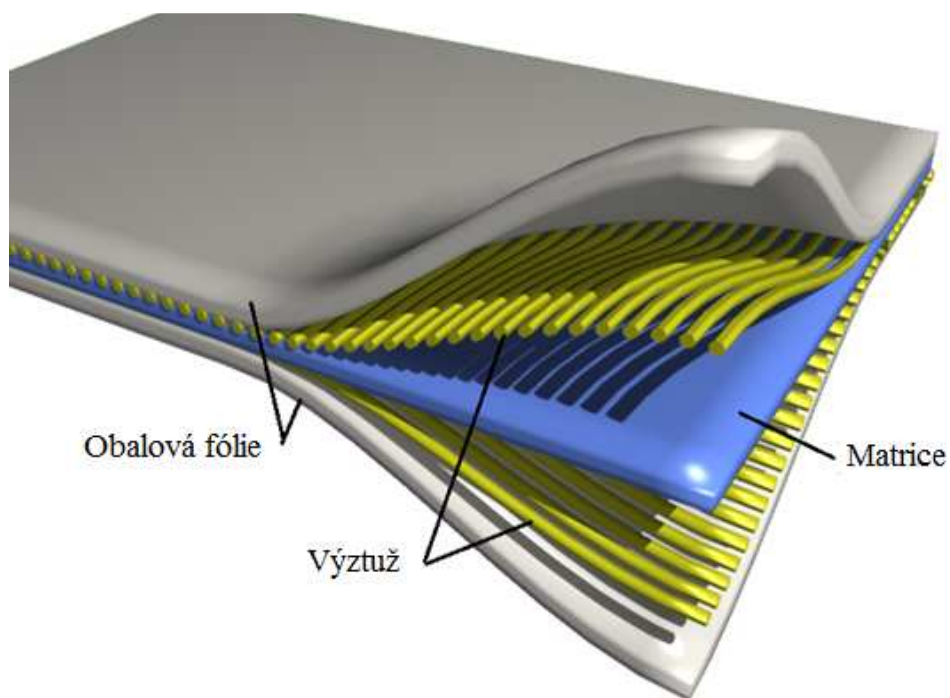
Pod pojmem kompozitní materiály rozumíme heterogenní materiály složené ze dvou nebo více fází, které se podstatně liší svými fyzikálními, mechanickými a chemickými vlastnostmi. Tvrdší, tužší a pevnější nespojitá složka se nazývá výztuž, spojitá a obvykle poddajnější složka, která zastává funkci pojiva výztuže, se nazývá matrice. Pro kompozitní materiály je charakteristický tzv. synergismus, což znamená, že vlastnosti kompozitu jsou lepší, než by odpovídalo pouhému poměrnému sečtení vlastností jednotlivých složek. Aby mohl být materiál označován jako kompozitní, musí splňovat následující podmínky [2,3,55]:

- podíl výztuže musí být minimálně 5%,
- vlastnosti (mechanické, fyzikální a chemické) matrice a výztuže se liší, výztuž je výrazně pevnější a tužší než matrice,
- kompozit musí být připraven smícháním složek.

Kompozitní materiály se mohou dělit podle rozměrů fází:

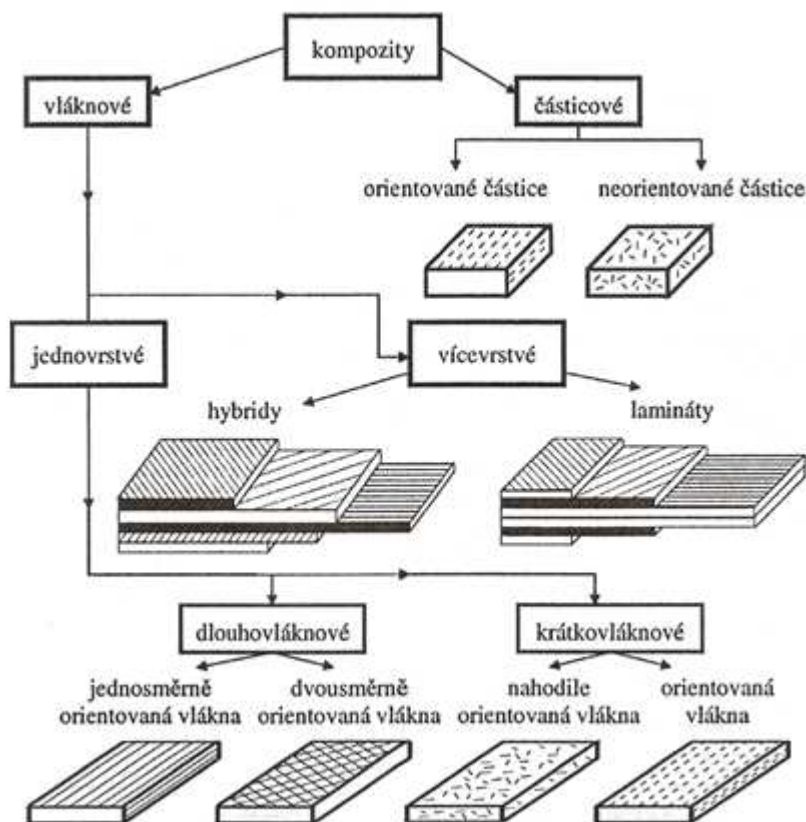
- mikrokompozity,
- makrokompozity,
- nanokompozity.

V průmyslu mají největší uplatnění mikrokompozitní materiály, u kterých dosahují největší příčné rozměry výztuže (vláken nebo částic)  $10^0$  až  $10^2$   $\mu\text{m}$ . Oproti kovům a jejím slitinám mají mikrokompozity používané v průmyslu menší hustotu a tedy příznivý poměr pevnosti v tahu a modulu pružnosti k hustotě (hmotnosti), dosahují tak velké měrné pevnosti a měrného modulu. Makrokompozity obsahují výztuž o velikosti  $10^0$  až  $10^2$  mm a jsou tedy používány především ve stavebnictví. Za makrokompozitní materiály lze považovat i plátované kovy, vícevrstvé materiály a konstrukce. Nanokompozity jsou materiály, které mají rozměr výztuže v jednotkách nanometrů [55].



Obr. 7.2 Složení kompozitního materiálu [56].

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. Další dělení kompozitních materiálů je znázorněno na obr. 7.3 [57].



Obr. 7.3 rozdělení kompozitních materiálů podle tvaru prvků výztuže [58].

Dlouhovlákné kompozity mají poměr mezi délkou a průměrem vlákna větší než 100 nebo je délka vlákna totožná s délkou dílce, krátkovlákné mají tento poměr menší než 100. Částicové kompozity se skládají z částic, které jsou definovány jako nevláknový útvar ve tvaru koule, krychle, kvádrů apod. Částice se v mnohem menší míře podílejí na přenosu namáhání než vlákna. Jejich význam spočívá ve zlepšení odolnosti proti opotřebení, snížení koeficientu tření, úprava tepelné a elektrické vodivosti, apod. Částice mohou mít v matrici náhodnou nebo stejnou orientaci, a to z důvodu požadovaných mechanických vlastností [58,59].

V praxi jsou nejčastěji používány vícevrstvé kompozitní materiály, které se skládají z několika tenkých různě orientovaných jednosměrných vláknových kompozitů tzv. lamin. Jsou-li materiály v každé vrstvě stejné, např. skelná vlákna v epoxidové pryskyřici, označuje se kompozit jako laminát. V případě, že jsou vrstvy vyrobeny z různých materiálů, např. jedna vrstva je vyztužena ze skelných a druhá z uhlíkových vláken, jedná se o tzv. hybridní laminát [59].

### 7.1.1 Historický vývoj kompozitních materiálů

Historie kompozitních materiálů začíná na počátku dvacátého století a je spojena s vynálezem syntetické pryskyřice (1908 – Leo Baekeland). Ta byla pro své vlastnosti využívána pro výrobu elektrických izolátorů. První průmyslová výroba kompozitních materiálů byla zahájena na počátku čtyřicátých let Americkou firmou Owens–Illinois Glass Co, uhlíková vlákna o dvacet let později [55,59].

## 7.2 Matrice

Jako matrice se označuje spojitá složka, která zastává funkci pojiva výztuže a chrání většinou křehká vlákna. Pro kompozity s kontinuálními vlákny se nejčastěji používají matrice polymerní, které se dělí na reaktoplastické a termoplastické [58,60].

Mezi nejpoužívanější matrice lze zařadit nenasyčené polyestery (UP), vinylestery (VE), epoxidy (EP) a z termoplastů polypropylen (PP) a polyamid (PA). Reaktoplasty a aromatické termoplasty s vysokou tepelnou a tvarovou stálostí se vzhledem ke své vysoké ceně používají především ve vojenském průmyslu (díly na tryskových letadlech), případně pro výrobu špičkových zařízení (družice, rakety, apod.). Při výběru vhodné pryskyřice se musí sledovat určité vlastnosti (viz tab. 7.1) [60].

Tab. 7.1 Sledované vlastnosti pryskyřic [60].

Užitné vlastnosti	Technologické vlastnosti
Pevnost	Viskozita pryskyřice
Modul pružnosti	Smáčivost vláken
Prodloužení při přetržení	Doba želatinace
Houževnatost	Skladovatelnost
Odolnost proti tečení	Reakční rychlost
Tepelná odolnost	Doba želatinace
Hořlavost	Obsah těžkých látek
Navlhavost	Smrštění při reakci
Odolnost proti UV záření	Citlivost na poměr složek
Dielektrické vlastnosti	Vedlejší produkty vytvrzování
Chemická odolnost	Adheze k povrchu formy

### 7.2.1 Nenasyčené polyestery (UP)

Řadí se mezi nejpoužívanější pryskyřice. Lineární nenasyčený nenasyčený polyester je připraven reakcí dvou složek (polypropylenglykolu a kyseliny ftalové, kumaronové, maleninové nebo anhydridu). Vzniklý předpolymer je poté rozpuštěn v reaktivním rozpouštědle (obvykle se používá styren). Katalyzátorem síťovací reakce jsou organické peroxidy (nejčastěji methylethylketonperoxid), aktivátorem (urychlovačem) obvykle

naftalen kobaltnatý. Volbou vytvrzovacího systému lze dosáhnout širokého rozmezí doby gelace a vytvrzení. Polyesterové technologie lze proto použít pro všechny technologie. Viskozitu pryskyřice určuje podíl reaktivního rozpouštědla [60].

Nemodifikované nenasyčené polyesterové pryskyřice mají velké smrštění při vytvrzování (7 až 8 %). Jsou křehké, snadno v nich vznikají mikrotrhliny. Elektrické vlastnosti mají dobré, stejně jako odolnost proti ultrafialovému záření. Pryskyřice dobře smáčejí skleněná vlákna, ale pevnost vazby matrice je menší [60].

Základní druhy nenasyčených polyesterových pryskyřic jsou [60]:

- orthoftalová
- izoftalová – lepší tepelná a chemická vodivost v porovnání s orthoftalovou pryskyřicí.
- fumarová – dobrá tepelná a chemická vodivost,
- chlorftalová – nehořlavá, ale za cenu horších mechanických vlastností,
- tereftalová – velmi dobrá tepelná a chemická vodivost.

Tab. 7.2 Mechanické vlastnosti a tepelná odolnost vybraných čistých pryskyřic [59].

Pryskyřice	Modul pružnosti E [MPa]	Pevnost v tahu Rm [MPa]	Maximální pracovní teplota [°C]
orthoftalová	3400	55	80
izoftalová	3400	75	90
fumarová	2800	40	130
chlorftalová	3400	20	140

### 7.2.2 Vinylesterové pryskyřice (VE)

Jsou to nenasyčené estery epoxidových pryskyřic. Vyrábějí se buď z bisfenolu nebo novolakové VE pryskyřice. Obsahují reaktivní rozpouštědlo (obvykle styren). Makromolekula předpolymeru VE má méně reaktivních míst než je tomu u UP, dvojná vazba je umístěna pouze na koncích makromolekuly. Důsledkem je menší stupeň zesíťení, vedoucí k větší ohebnosti pryskyřice a větší odolnosti proti tvorbě mikrotrhlinek. Kompozity s vinylesterovými pryskyřicemi mají větší mezilaminární smykovou pevnost a větší houževnatost než kompozity s nenasyčenými polyesterami [60].

Vinylesterové pryskyřice mají ve srovnání s UP [60]:

- větší tepelnou odolnost,
- větší odolnost proti působení UV záření,
- velkou odolnost v kyselém a zásaditém prostředí,
- vysokou odolnost pohlcovat mechanické a tepelné rázy,
- pomalejší reakci při vytvrzování,
- vyšší cenu.

### 7.2.3 Epoxidové pryskyřice (EP)

Jsou to z hlediska konstrukčního použití nejvšestrannější reaktoplasty. V závislosti na chemické struktuře pryskyřice a použitém tvrdidlu a případných modifikujících složkách mají nejširší rozsah možných vlastností. Mají dobrou houževnatost (v porovnání s ostatními reaktoplasty), odolnost proti únavě a tečení, výbornou adhezi k vláknům, uspokojivou teplotní odolnost, výtečnou chemickou odolnost, dobré elektrické vlastnosti a malé smrštění při vytvrzování. V důsledku polárnosti (přítomnosti hydroxylových skupin) jsou navlhavé, takže za přítomnosti vody je nutné počítat se značným zhoršením teplotní odolnosti i u pryskyřic s vysokou teplotou skelného přechodu (tetrafunkční epoxidy), z důvodu plastifikačního účinku vody [60].

Viskozita čistých epoxidových pryskyřic je v nevytvrzeném stavu větší než u UP a VE. Podle molekulové hmotnosti se jedná o kapaliny až tuhé nelepivé látky. Přidáním dalších složek (reaktivních ředidel), případně modifikací složkou pro zvýšení houževnatosti, lze užité i technologické vlastnosti výsledné směsi měnit v širokém rozmezí. Vytvrzovací reakce u EP je stupňovité povahy, probíhá velmi pomalu, takže obvykle nevznikají problémy s exotermickou povahou vytvrzovacího procesu (s výjimkou tlustostěnných dílů). Při vytvrzování epoxidové pryskyřice se neuvolňují vedlejší produkty, takže k získání kompozitu bez dutin (bublin) není zapotřebí vysokého tlaku. V případech, kdy je žádoucí vytvrzovací proces naopak zkrátit lze použít urychlovačů (obvykle BDMA - benzyldimethylamin). Epoxidy jsou proto použitelné pro všechny technologie, ale jsou dražší než UP a VE [60].

Základní typy pryskyřic používané pro kompozitní materiály jsou [60]:

- glycidyloly bisfenolu A, např. diglycidylether BPA - zkratka DGEBA,
- novolakové pryskyřice (vyšší teplotní odolnost),
- třífunkční epoxidy,
- tetrafunkční epoxidy, např. tetraglycidylmethylendianilin (TGMDA).

S rostoucí funkčností epoxidu roste hustota sítě ve vytvrzeném stavu, to spolu s existencí aromatických skupin v řetězci dává větší teplotu skelného přechodu a tedy vyšší teplotní odolnost (max. teplota je u epoxidové pryskyřice TGMDA 240 °C) [60].

### 7.3 Vlákná

Je to část kompozitního materiálu, která je, co se týká mechanických vlastností, tvrdší, tužší a pevnější. Sdružením elementárních vláken (monovláken) vznikají prameny, která mohou být dále zpracovávána do nejrůznějších forem např. [61]:

- **sekané prameny** – pro přípravu vstřikovacích a lisovacích směsí,
- **mletá vlákna** – mletím lze získat krátká vlákna (jen u krátkých vláken),
- **prameny** – přímé bez ohybů,
- **rovingy** – (z anglického výrazu roving – provazec, přást) sdružené prameny s nulovým nebo malým počtem zákrutů, bývají dodávány navinuty na cívkách,
- **jednoduchá a kablovaná příže** – vzniká zkrucováním pramenů a jejich sdužováním, používá se pro výrobu technických tkanin,
- **rovingové tkaniny**,
- **hybridní tkaniny**,
- **rohože**,
- **prepregy** – jsou to různě široké role nebo kotouče, které obsahují buď paralelně uspořádané rovingy, tkaninu nebo rohož a polytvrzenou reaktoplastickou nebo termoplastickou maticí. Je možné též vyrobit pramenový prepreg, kde jsou vlákna impregnována reaktoplastickou nebo termoplastickou maticí.

#### 7.3.1 Skelná vlákna

Skelná vlákna mají silikátový základ ( $\text{SiO}_2$ ). Vyrábějí se tažením taveniny směsi oxidů Si (s příměsí oxidů Al, Ca, Mg, Pb a B) a většinou s malým podílem oxidů alkalických kovů Na a K. Podle obsahu jednotlivých prvků se skelná vlákna označují jako skloviny E, S, D, C a ARC. Potřebného průměru vlákna se dosahuje dlužením proudu skla tekoucího tryskami (průměr trysky 1 mm) ve dnu zvláknovací hlavy. Konečný průměr vlákna je dán rozdílem mezi rychlostí vytékání skloviny a rychlostí odtažování vlákna. Jednotlivá vlákna se po povrchové úpravě dále sdužují do pramenů a navíjí se na cívky [61].



Obr. 7.4 Vyztužení profilu skelnými vlákny [62].



Obr. 7.5 Zákaznický profil [62].

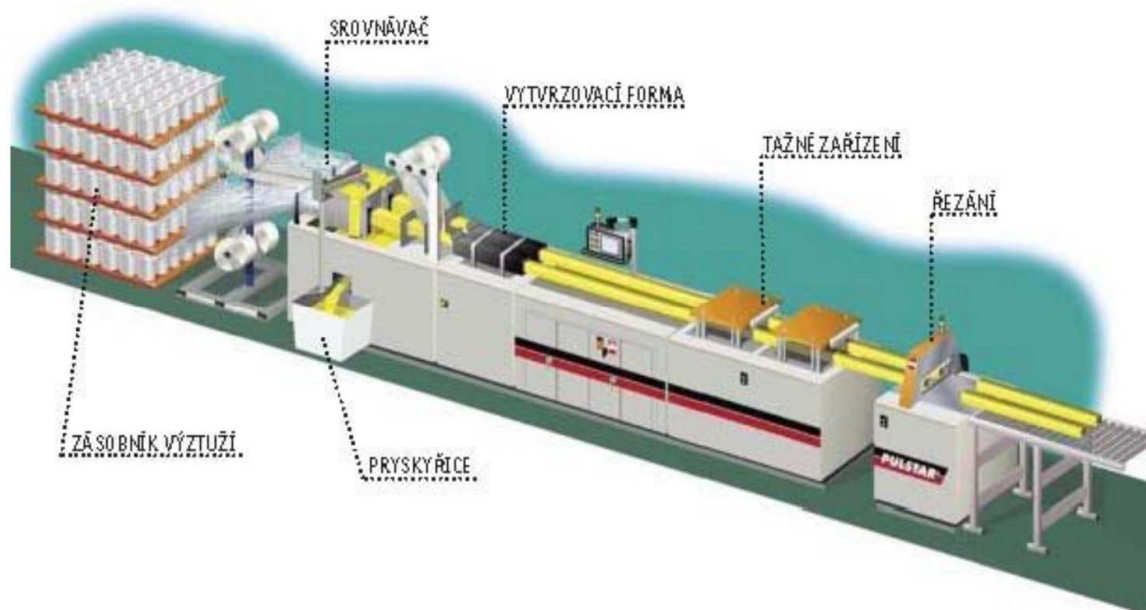
Provozní teplota skelných vláken je závislá na jejich složení, např. provozní teplota E-skla je omezena teplotou 460 °C (při teplotě 400 °C je pevnost v tahu snížena o 52 %), u S-skla dochází k poklesu pevnosti v tahu až nad teplotou 600 °C a má o 170 °C vyšší teplotu měknutí. Dalším faktorem ovlivňujícím pevnost je stav povrchu materiálu, poškození vláken při sduřování do pramenů nebo absorpci vzdušné vlhkosti [61,63].

Tab. 7.6 Vlastnosti vybraných skelných vláken [61].

Materiál	Sklo E	Sklo C	Sklo S	Sklo ARC	Křemenné sklo
Průměr [ $\mu\text{m}$ ]	5–16	9–13	9–13	–	8,9
Hustota [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]	2,54	2,49	2,49	2,7	2,19
Modul pružnosti [GPa]	73	69	85,5	75	69
Pevnost v tahu [GPa]	2–4	max. 3	max. 4,6	1,7	3,45
Prodloužení [%]	1,8–3,2	4,8	5,7	–	5
Součinitel délkové roztažnosti [ $10^{-6} \text{K}^{-1}$ ]	4,9	7,2	5,6	–	–
Tepelná vodivost [W/mK]	1	1	1	–	–
Teplota měknutí [°C]	800	750	970	–	–

### 7.3.1.1 Výroba pultruzně vyrobeného sklo-polyesterového kompozitu

Slovo „pultruze“ vzniklo z anglického názvu „pultrusion“ a v této české podobě se již mezi odbornou veřejností zažilo. Pultruze je proces kontinuální výroby vyztužených pryskyřic různých tvarů a délky tažením. Vstupní materiál je směs tekuté pryskyřice a vláknové výztuže. Proces zahrnuje tažení materiálu přes vyhřívanou ocelovou formu pomocí tažného zařízení. Vyztužující materiál, převážně skelné vlákno, je ve formě rovingu a plošných rohoží. Tato vlákna navinutá na cívkách vstupují do srovnávače, jehož funkcí je rovnoměrné rozmístění rovingu v průřezu a správné umístění rohoží [64].



Obr. 7.6 Schéma výroby tažených profilů [64].

Vyrobené profily mají na povrchu tenkou netkanou povrchovou polyesterovou roušku. Tato rouška obaluje skleněnou výztuž a navíc, nasycena pryskyřicí, tvoří obal, který zvyšuje odolnost proti vniknutí chemikálií, UV záření a vylepšuje i estetický vzhled kompozitu. Povrchová rouška zabraňuje tomu, aby po poškození povrchu vyčnívala skleněná vlákna ven [64].

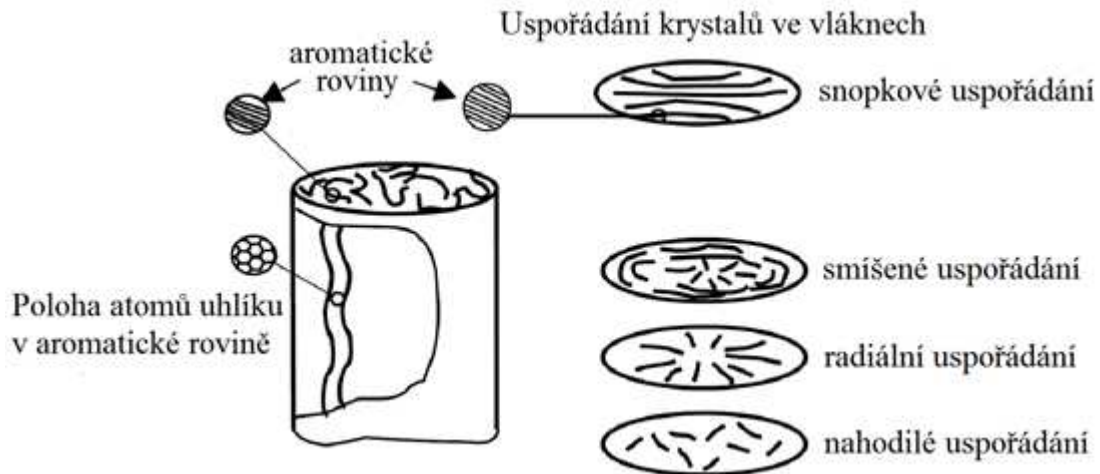
V dalším zařízení se vlákna, rohože a rouška smáčí ve směsi pryskyřice, plniva, barviva, katalyzátoru, popř. dalších přísad pro zlepšení materiálových vlastností výsledného profilu. Po výstupu z lázně má polotovar už podobný tvar jako výsledný profil. V předtvarovací formě se vytlačuje přebytečné pojivo, profil se postupně tvaruje a vstupuje do vytvrzovací formy. V této vyhřívané formě probíhá termosetická reakce a profil se vytvrzuje. Na výstupu z formy je hotový profil tažen podávacím zařízením a dělen na požadované délky, většinou šestimetrové [64].

### 7.3.2 Uhlíková vlákna

Mají větší rozsah mechanických vlastností při poměrně malé hustotě ( $1,8\text{--}2\text{ g/cm}^3$ ). U uhlíkových vláken může při styku s méně ušlechtilými kovy docházet k elektrochemické korozi, při níž koroduje kovový materiál. Cena uhlíkových vláken je v porovnání se skelnými o řád vyšší [62].

V porovnání se skleněnými vlákny se vyznačují vysokou anizotropií mechanických i fyzikálních vlastností, což je dáno krystalem grafitu. Ve směru kolmém k bazálním rovinám šesterečné mřížky působí jen slabé Van der Waalovy vazby, ovšem v rovinách bazálních vrstev, v tzv. „aromatických“ rovinách, jsou atomy vázány pevnými kovalentními vazbami. Vysoké pevnosti a tuhosti aromatických rovin je využito

v uhlíkových vláknech, ve kterých jsou bazální roviny orientovány rovnoběžně s podélnou osou vlákna. Na rozdíl od krystalu grafitu nejsou aromatické roviny ve vláknu pravidelně uspořádány ve sledu ABABA (jak by odpovídalo hexagonální mřížce), ale jsou vedle sebe uspořádány nahodile, v tzv. turbostratickém uspořádání. To znamená, že je-li např. modul pružnosti ve směru osy vlákna 500 GPa, kolmo na osu je pouze 6 GPa [58,61].



Obr. 7.7 Uspořádání aromatických rovin v uhlíkových vláknech [61].

Uhlíková vlákna jsou odolná vysokým teplotám, avšak v neoxidujícím prostředí. Pevnost je konstantní až do teploty 2000 °C, modul pružnosti dokonce s teplotou roste. V oxidačním prostředí pevnost vláken rychle klesá již od teplot 500 °C [8]. Uhlíková vlákna je možné dělit podle několika kritérií. Podle mechanických vlastností se rozdělují na [61]:

- karbonizovaná vlákna – střední modul pružnosti, dobrá pevnost v tahu,
- vysokomodulová grafitizovaná vlákna (HM vlákna – High Modulus),
- vlákna vysoce pevná, se středním modulem pružnosti (IM vlákna – Intermediate Modulus),
- vlákna s vysokým modulem pružnosti (VHM vlákna – Very High Modulus).

dále se dělí na [57]:

- dutá vlákna,
- mletá uhlíková vlákna,
- diskontinuální vlákna porušená tahem.

Tab. 7.7 Vlastnosti vybraných uhlíkových vláken nabízených firmou Mitsubishi [61].

	Průmyslové kompozity		Letecké kompozity	
	K13710	K13A10	KS352U	K13C2U
Průměr [ $\mu\text{m}$ ]	10	10	10	10
Hustota [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]	2,12	2,15	2,05	2,19
Modul pružnosti (osový) [GPa]	640	790	550	900
Pevnost v tahu [GPa]	2,6	2,6	3,6	3,8
Prodloužení [%]	0,42	0,36	0,65	0,42
Součinitel délkové roztažnosti [ $10^{-6} \text{K}^{-1}$ ]	Osový	-0,9	-1,5	-
	Příčný	10	6	-
Tepelná vodivost [W/mK]	140	220	130	620
Obsah uhlíku [%]	$\geq 99$	$\geq 99$	$\geq 99$	$\geq 99$

#### 7.4 Obrábění kompozitních materiálů

K nejrozšířenějším obráběcím operacím při výrobě dílců z kompozitních materiálů 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.) [57].



Obr. 7.8 Frézování kompozitu – standardní válcovou frézou [65].



Obr. 7.9 Frézování kompozitu – speciální válcovou frézou [66].

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, vinylosterová 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 [58].

V minulosti bylo publikováno mnoho studií zabývajících se obráběním kompozitních materiálů, první z nich je možné nalézt např. zde [67–71]. 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 obrábitelnost nově vyvíjených kompozitních materiálů, popřípadě možnosti simulace obrábění kompozitních materiálů [3,72–75].

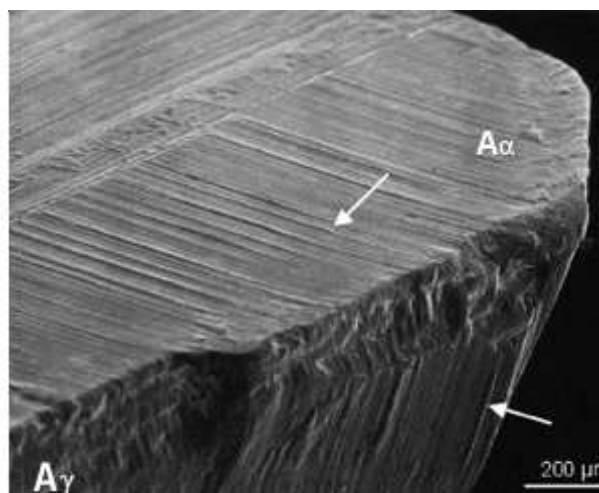
## 7.5 Řezné materiály pro obrábění kompozitních materiálů

Při volbě nástroje pro obrábění je nutné brát v úvahu abrazivní vlastnosti výztuže (výjimkou jsou aramidová vlákna), je tedy nezbytné volit co nejvíce otěruvzdorný materiál nástroje. Většina kompozitních materiálů má velice nízkou tepelnou vodivost, vznikající teplo tedy neodchází ve formě třísky, ale je ve velké míře odváděno nástrojem popřípadě chladícím médiem (je-li možné ho použít). Optimální nástroj pro obrábění kompozitních materiálů tedy musí mít jak odolnost proti abrazivnímu opotřebení tak tepelnou odolnost (vodivost) [76,77].

V průběhu obrábění skelných vláken nastává další problém, a to prašnost odebraného materiálu. Obvykle se tento problém řeší bezprostředním odsáváním (viz obr. 7.10) třísky ve formě „prášku“, ta obsahuje nařezaná skelná vlákna, která mohou být z dlouhodobějšího hlediska škodlivá pro obsluhu obráběcího stroje.



Obr. 7.10 Odsávací zařízení připojené přímo ke vřetenové jednotce [78].



Obr. 7.11 Abrazivní opotřebení nástroje [79].

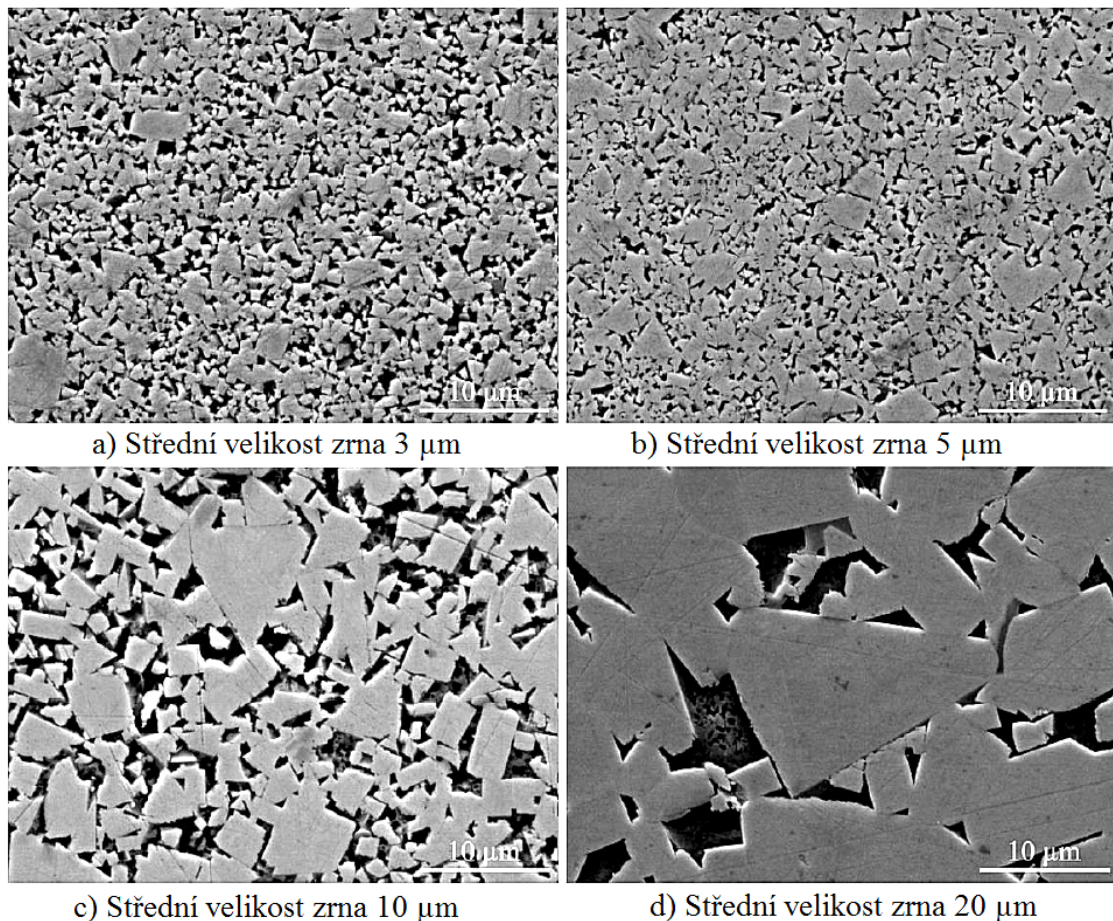
### 7.5.1 Rychlořezné oceli

Nástroje z rychlořezné oceli (RO) jsou pro obrábění kompozitních materiálů použitelné pouze v omezené míře. Jejich tvrdost je ve srovnání s jinými nástrojovými materiály nižší a tedy i odolnost proti abrazivnímu opotřebení. Další vlastností, která je

při obrábění kompozitních materiálů podstatná, je tepelná vodivost nástroje (odvod tepla z místa řezu). Ta je u nástrojů z RO (3–4)× nižší než u nástrojů ze slinutých karbidů. Aplikací ořezavých povlaků lze redukovat rychlost opotřebení pouze do jisté míry [58,76,77].

### 7.5.2 Slinuté karbidy

Nástroje ze slinutých karbidů dosahují v porovnání s nástroji z RO delší trvanlivosti i lepší tepelné vodivosti. Mechanické vlastnosti slinutých karbidů jsou závislé především na obsahu pojiva (nejčastěji kobaltu Co) a velikosti zrna karbidické fáze [58]. Tvrdost slinutých karbidů se zvyšuje s rostoucí jemností zrn a snižujícím se podílem pojiva. Rostoucí velikost zrn a větší podíl kobaltu zvyšují houževnatost slinutého karbidu [76].



Obr. 7.12 Struktura slinutých karbidů WC-Co s různou zrnitostí [6].

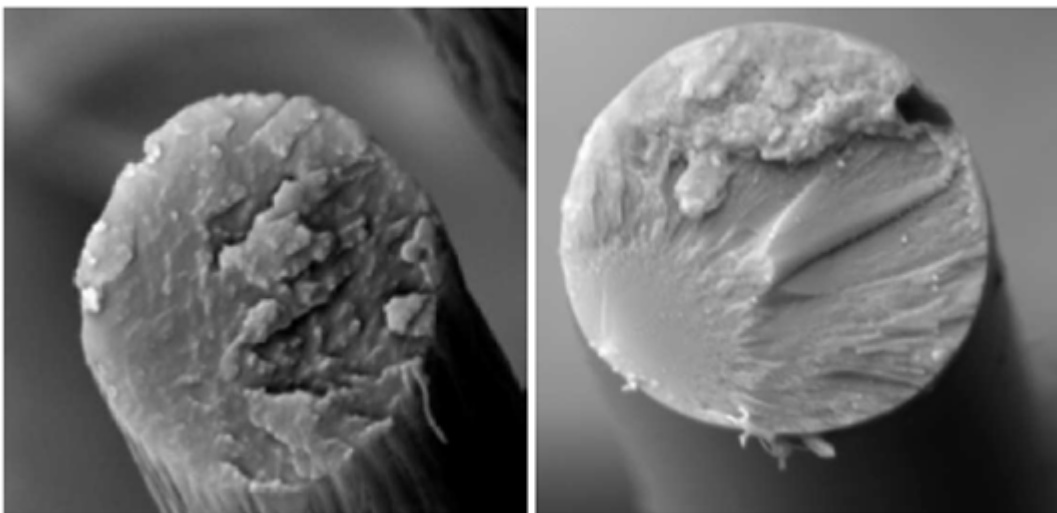
Pro účely obrábění kompozitních materiálů (skelná a uhlíková vlákna) jsou vhodné jemnozrné slinuté karbidy, které mají vyšší hodnoty tvrdosti. Nižší houževnatost nástroje je nutné zohlednit např. při nestabilním obrábění, kdy je nástroj cyklicky zatěžován.

### 7.5.3 Polykrystalický diamant

Nejlepších výsledků při obrábění kompozitních materiálů dosahují nástroje osazené řeznými prvky z polykrystalického diamantu (tzv. připájené ostří), nebo opatřené diamantovými povlaky. Především vysoká tvrdost diamantu, která umožňuje odolávat vysokému abrazivnímu opotřebení vyztužujících vláken a vynikající tepelná vodivost, která zaručuje rychlý odvod tepla z oblasti řezu, jsou předpokladem pro vysokou kvalitu obrobeného povrchu a dlouhou trvanlivost nástroje. Trvanlivost je mnohonásobně vyšší (až stonásobně) než u nástrojů ze slinutých karbidů. Ostrý břit, který vydrží po dlouhou dobu obrábění, poskytuje chladnější řez a snižuje tvorbu delaminace, protože při nadměrném opotřebení břitu se vlákna spíše odlamují, místo aby byla běžně řezána. Vhodnou aplikací nástrojů z PKD při obrábění kompozitních materiálů dochází ke zvýšení řezných podmínek (zejména řezné rychlosti) a následně produktivity o 50 až 100 %. Jak připájené břity, tak diamantové povlaky jsou většinou aplikovány na podkladový slinutý karbid, který jim zaručuje pevnost a odolnost proti tepelným a mechanickým šokům [58,80].

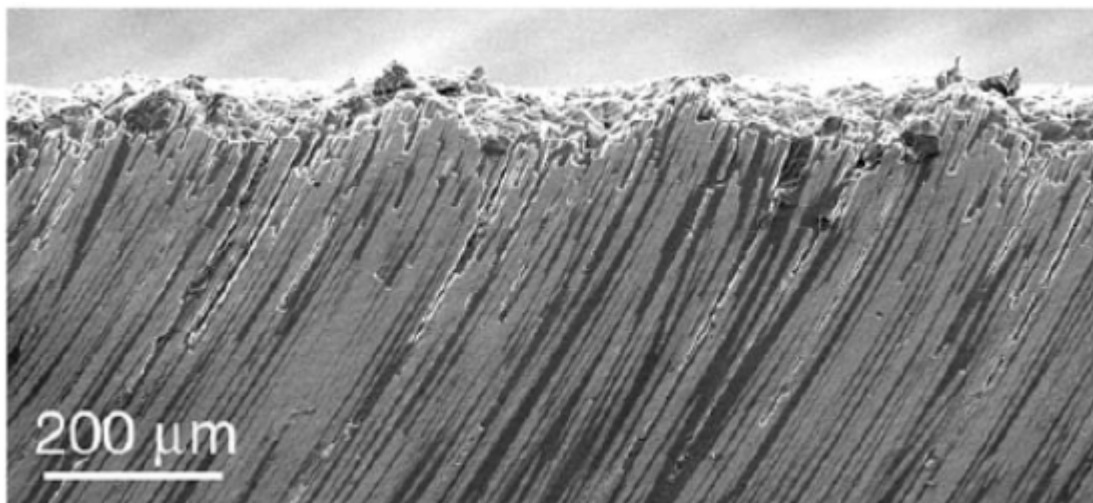
### 7.6 Mechanismus porušení vláken

K mechanickému porušení vláken (uhlíkových a skelných) kompozitního materiálu dochází vlivem tahového namáhání, pro tyto vlákna je typický křehký lom. Ten je iniciován trhlinou nebo defektem, v místě s koncentrovaným napětím. U většiny syntetických vláken zvláknovaných z taveniny dochází k houževnatému lomu [58,81].



Obr 7.13 Křehký lom skelného (vlevo) a uhlíkového (vpravo) vlákna [82].

Na kvalitu obrobené plochy nemají vliv pouze řezné podmínky, ale je třeba brát v úvahu i orientaci vláken. Na obr. 7.14 je pohled na povrch obrobku z kompozitního materiálu s uhlíkovými vlákny po ortogonálním řezání s úhlem vláken  $120^\circ$  (řezné podmínky:  $a_p=0,1$  mm,  $v_c=1$  m/min) [83].



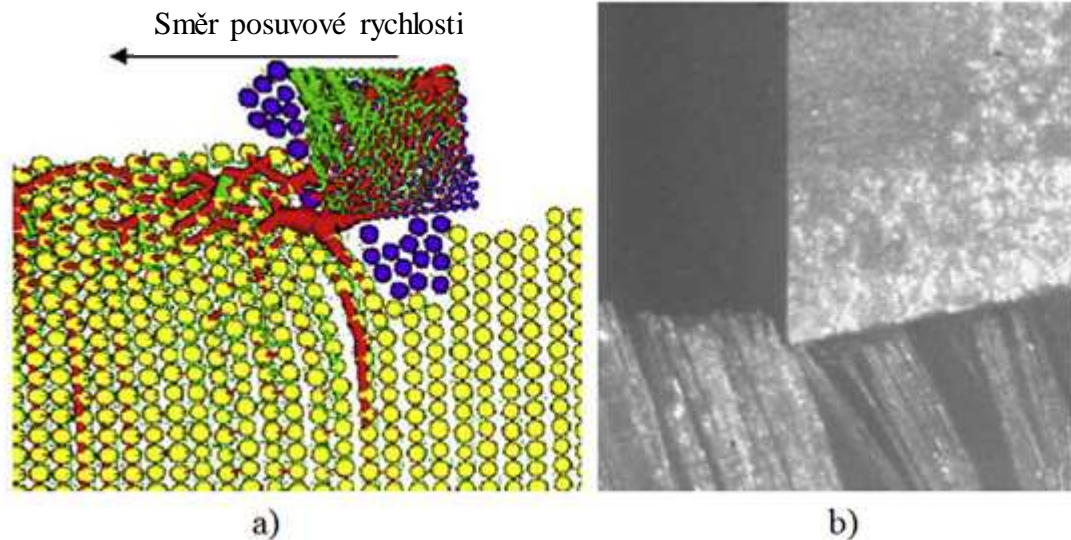
Obr. 7.14 Mikrostruktura obrobeného povrchu materiálu F593 Prepreg (uhlíková vlákna v epoxidové pryskyřici) [83].

### 7.7 Proces řezání kompozitních materiálů

První studie zabývající se tvorbou třísky se objevily již koncem 19. století, bylo možné v nich nalézt první popisy střížné roviny a mechanismu tvorby třísky. Tyto práce byly s postupem času dále rozváděny a doplňovány o nové poznatky. V současné době jsou znalosti z oblasti vzniku a utváření třísky velmi rozsáhlé, podložené experimentálním měřením. Tyto studie se ovšem zabývají převážně obráběním kovových materiálů, co se týče kompozitních materiálů, je stále prostor pro další práci v dané oblasti.

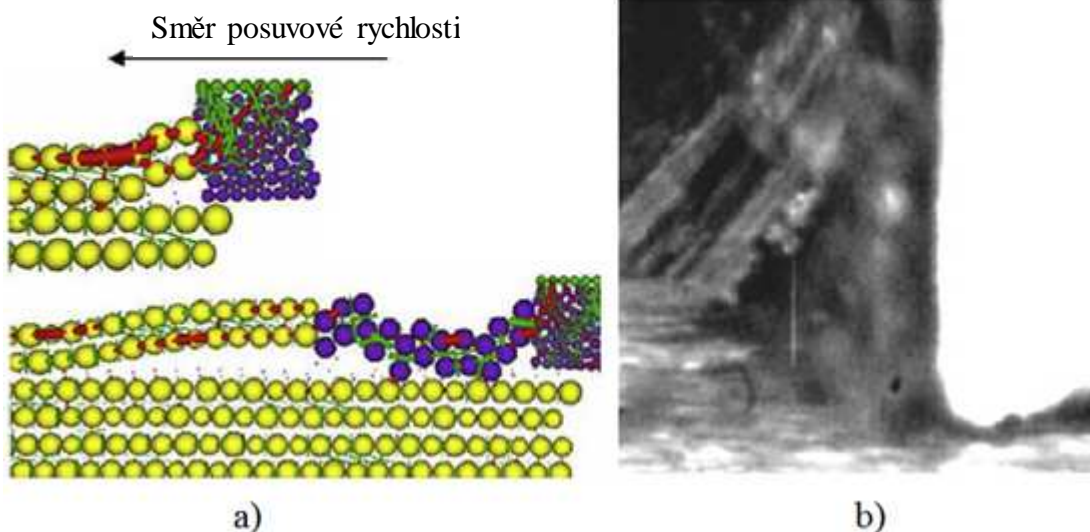
Při popisu střížné roviny a mechanismu tvorby třísky je u kompozitních materiálů nutné znát nejen materiál matrice a výztuže, ale i orientaci vyztužujících vláken (za předpokladu, že všechna vlákna mají orientaci stejnou). Na obr. 7.15, 7.16 a 7.17 jsou uvedeny příklady obrábění (ortogonální řezání) kompozitního materiálu s uhlíkovými vlákny, které jsou orientovány pod různými úhly. Dále jsou na nich znázorněna namáhání vláken tak, že červená barva reprezentuje tlakové a zelená tahové napětí [81,84].

Při obrábění vláken se sklonem vláken  $90^\circ$  dochází k ohýbání svazků vláken ve směru posuvu nástroje. Na povrchu obrobené plochy se při této orientaci vláken objevují nerovnosti a prasklinky. Na záběrech z vysokorychlostní kamery je patrné, že se po přerušení vláken ostřím nástroje vlákna vracejí do původní polohy, přičemž se třou o čelo nástroje a způsobují zrychlené opotřebení hřbetu nástroje [81].



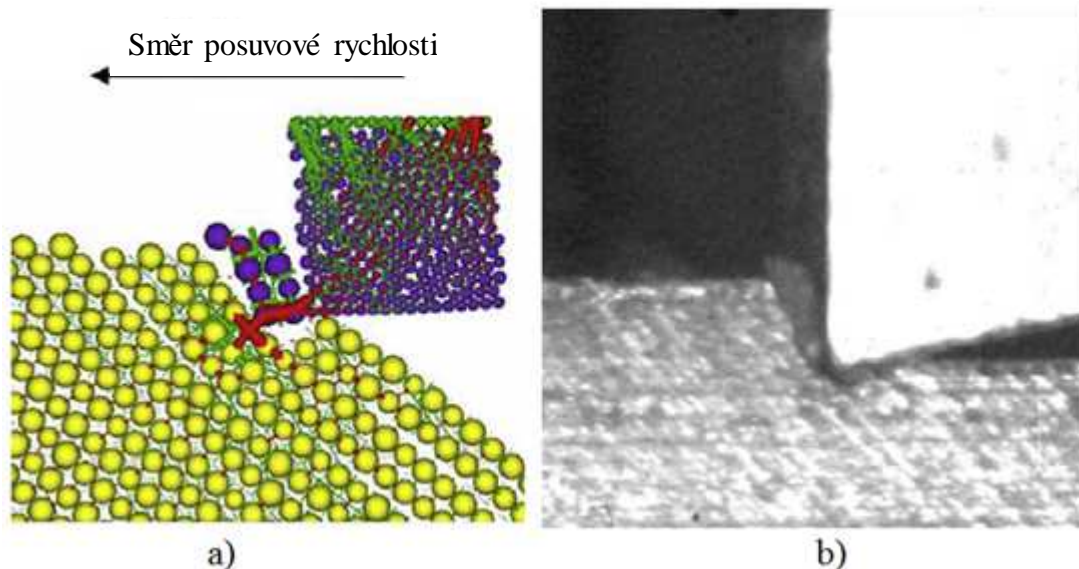
Obr 7.15 Průběh ortogonálního řezání kompozitního materiálu s úhlem vláken  $90^\circ$  [81].  
a) FME model. b) Záběr z vysokorychlostní kamery.

U vláken s orientací  $0^\circ$  dochází nejdříve k odlomení vláken od matrice vlivem tlakového působení břitu ve směru posuvu nástroje, a až poté dojde k prasknutí vybočených vláken (v kolmém směru k ose vlákna) pod tlakem nástroje. U odebraného materiálu dojde k jeho ohnutí a následnému zlomení (namáhání na vzpěr), tříška odchází ve formě větších kusu odlomeného materiálu. Obrábění takto orientovaných vláken způsobuje delaminaci a štěpení (obdobné jako při obrábění dřeva). Simulace ukazuje, že při tomto způsobu obrábění vzniká vysoké tlakové a ohybové namáhání a delaminace svazků vláken. Fialovou barvou jsou zobrazeny části materiálu, které přišli o všechny vazby s obrobkem [81].

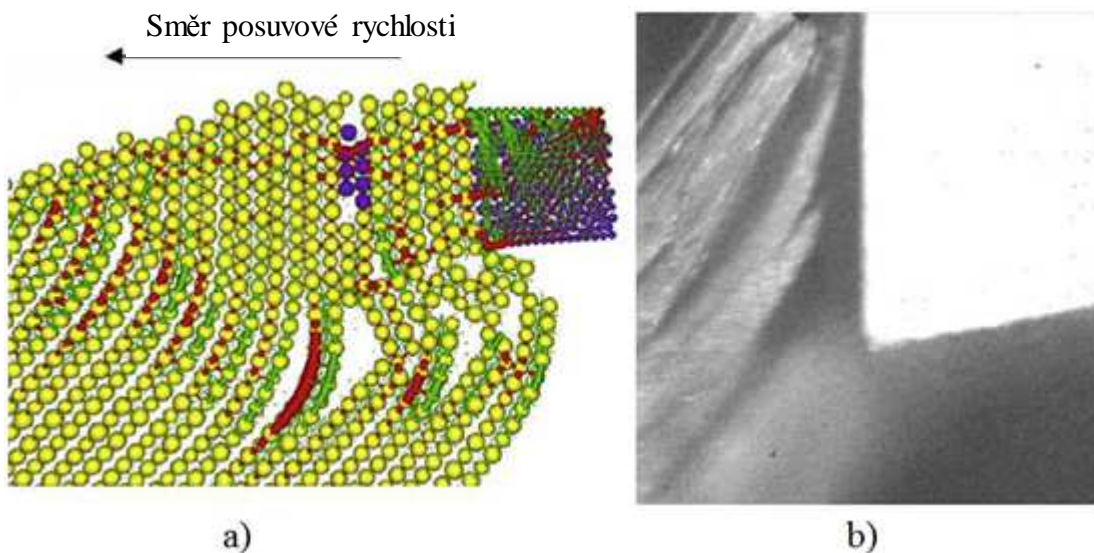


Obr 7.16 Průběh ortogonálního řezání kompozitního materiálu s úhlem vláken  $0^\circ$  [81].  
a) FME model. b) Záběr z vysokorychlostní kamery.

Při obrábění vláken pod úhlem  $45^\circ$  se mechanismus oddělovací třísky sestává z napínání a stříhání vláken břitem nástroje. Tříška se tvoří na rozhraní matrice/vlákně stříhem a odchází ve formě drobné třísky. Ve směru kolmém na osu vláken se materiál ohýbá a stlačuje, poté se vrací do své přirozené polohy, přičemž dochází ke tření přerušovaných vláken s hřbetem nástroje a tím i ke zrychlení abrazivního opotřebení. K rozvoji abrazivního opotřebení přispívají také drobné segmenty třísky, které neodcházejí po čele nástroje, ale jsou vtačeny pod nástroj a odchází po hřbetě [81].



Obr 7.17 Průběh ortogonálního řezání kompozitního materiálu s úhlem vláken  $45^\circ$  [81].  
a) FME model. b) Záběr z vysokorychlostní kamery.



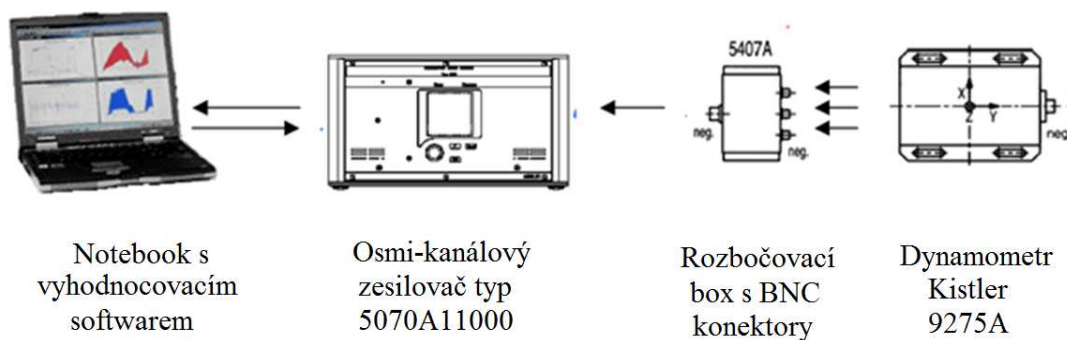
Obr 7.18 Průběh ortogonálního řezání kompozitního materiálu s úhlem vláken  $-45^\circ$  [81].  
a) FME model. b) Záběr z vysokorychlostní kamery.

V průběhu obrábění vláken pod úhlem  $-45^\circ$  dochází zlomení vláken vlivem výrazného ohybu a vytahování vláken z materiálu obrobku. Tento mechanismus porušení je dobře patrný na obr. 7.18 a), kde dochází k ohybu a praskání vláken kolmo na jejich osu.



## 8. Analýza měrných řezných sil při frézování kompozitních materiálů

Pro výpočet měrných řezných sil bylo nutné provedení řezivostních zkoušek pomocí aparatury Kistler pro měření silového zatížení nástroje a dále vypočítat velikosti průřezů třísek (pro různé řezné podmínky). Obráběný materiál byl upnut ve svěráku, který byl mechanicky upevněn k dynamometru. Při obrábění uhlíko-epoxidového kompozitu bylo pro stabilní upnutí nezbytné navíc použít speciální upínací přípravek.



Obr. 8.1 Schéma zapojení dynamometru [18].

Všechna měření byla provedena v laboratořích ÚST, pro experimentální obrábění byla použita konzolová frézka FV 25 CNC s řídicím systémem Heidenhain 315 iTNC. V průběhu obrábění nebylo použito vnější chlazení. Při obrábění kompozitních materiálů byly průběžně odstraňovány třísky (ve formě prášku obsahujícího skelná nebo uhlíková vlákna) a to z důvodu ochrany zdraví obsluhy stroje.



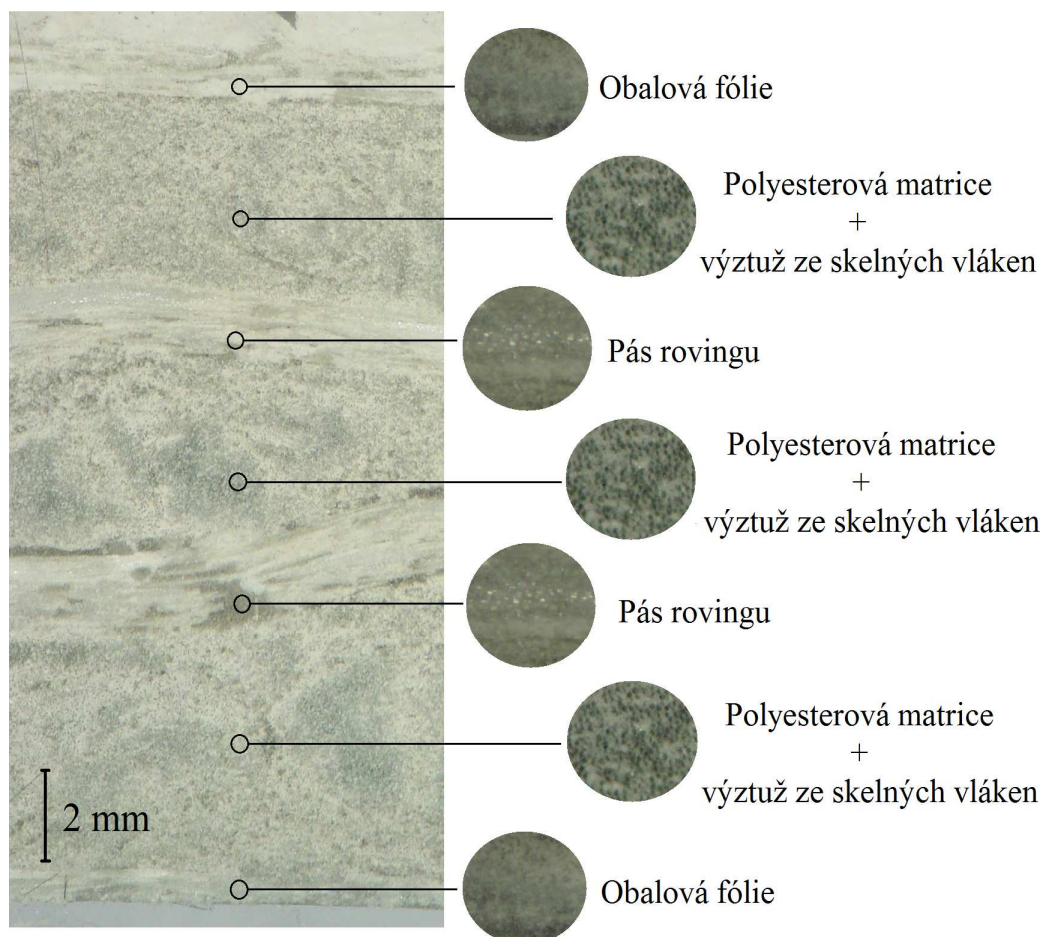
Obr. 8.2 Nastavení a průběh experimentálního obrábění.

## 8.1 Specifikace obráběných materiálů

Kompozitní materiály se dělí zejména podle použitého materiálu výztuže, nejčastěji se používá výztuž z uhlíkových nebo skelných vláken. 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.

### 8.1.1 Pultruzně vyrobený sklo-polyesterový kompozit

Pro experimentální obrábění byl materiál upraven do bloků o rozměrech 220x110x12 mm. Na obr. 8.3 je znázorněn pohled na část průřezu materiálem a jsou zde vyznačeny rozdíly ve složení struktury jednotlivých vrstev materiálu.



Obr. 8.3 Vrstvy materiálu vybraného pro testování.

Kompozitní materiál má následující vlastnosti:

- matrice: polyesterová pryskyřice,
- výztuž: skelná vlákna – „E“ sklo, obsah 70%,
- orientace vláken: jednosměrná,
- tloušťka 12 mm.

Tab. 8.1 Mechanické vlastnosti – sklo-polyesterový kompozit [64].

Materiál	Pevnost v podélném směru [MPa]			Pevnost v příčném směru [MPa]			Střih [MPa]
	Tah	Tlak	Ohyb	Tah	Tlak	Ohyb	
Sklo-polyesterový kompozit	240	240	240	60	150	190	21
	–	–	–	–	–	–	
	700	450	1000	95	170	220	

### 8.1.2 Uhlíko-epoxidový kompozit

V současné době je hlavním použitím uhlíko-epoxidového kompozitu ve formě lamel dodatečné externí zesílení konstrukcí. Tento materiál ovšem pro své vlastnosti nabízí široké využití v nejrůznějších průmyslových odvětvích.



Obr. 8.4 Vzorek kompozitního materiálu.

Hlavní výhodou uhlíkových vláken je jejich tepelná roztažnost, která má zápornou hodnotu. Matrice (epoxidová pryskyřice) má ovšem znaménko tepelné roztažnosti opačné. Rozměry profilu lamel jsou 50x1,4 mm s délkou 120 mm.

Kompozitní materiál má následující vlastnosti:

- matrice: epoxidová pryskyřice,
- výztuž: uhlíková vlákna, obsah 70%,
- orientace vláken: jednosměrná.

Tab. 8.2 Mechanické vlastnosti – uhlíko-epoxidový kompozit [64].

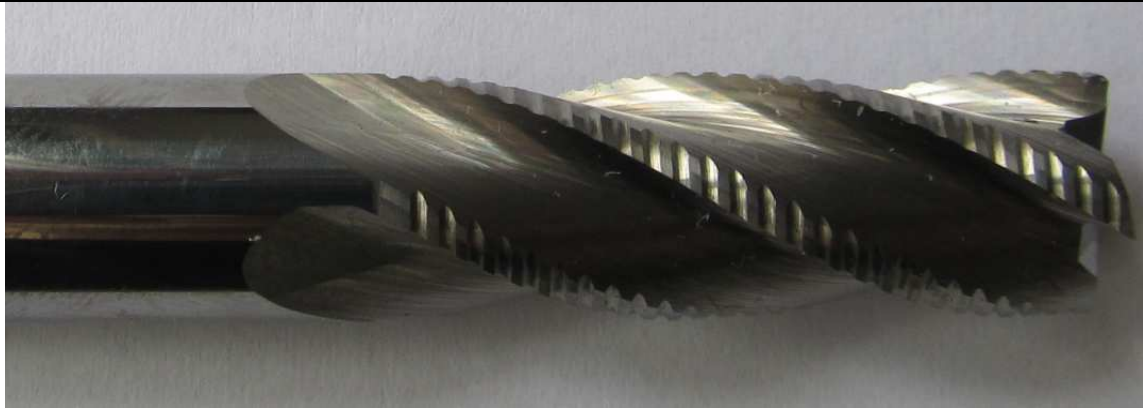
Materiál	Pevnost lamely v tahu [MPa]	Modul pružnosti v tahu [GPa]	Koeficient teplotní roztažnosti [K <sup>-1</sup> ]	Hustota [kg/m <sup>3</sup> ]
uhlíko-epoxidový kompozit	3000	155	6·10 <sup>-6</sup>	1,6

## 8.2 Specifikace nástrojů použitých pro obrábění kompozitů

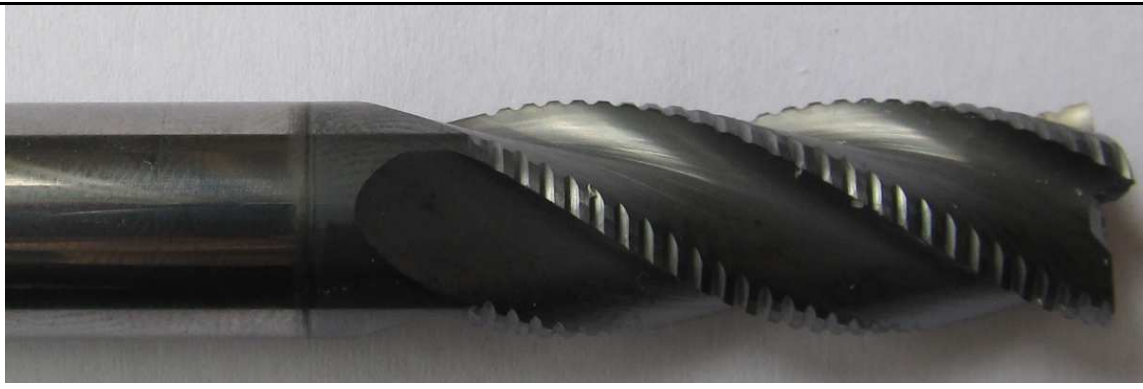
Pro testování kompozitních materiálů byly zvoleny nástroje ze slinutých karbidů (SK) s různými typy povlaků a jeden nástroj z rychlořezné oceli (HSS) s povlakem na bázi (Al,Ti,Cr)N. Nástroje byly deponovány povlaky metodou PVD ve firmách LISS a.s. (povlaky (Al,Ti,Cr)N, AlTiN, nAlCo) a CemeCon s.r.o (povlak DLC). Měření byla převážně prováděna s nástrojem ze SK, na kterém byl nanesen diamantový povlak, u tohoto nástroje byla předpokládána řádově delší trvanlivost (až 100×) než u ostatních nástrojů ze SK. Nástroje ze SK měly obdobné geometrické vlastnosti, lišily se pouze typy nanesených povlaků a lamači třísky na obvodu fréz. Charakteristika nástrojů z SK je následující:

- 4-břítá fréza  $\varnothing 10$  mm s jedním zubem přes střed,
- slinutý karbid skupiny K 05 s velikostí zrna více než 1 $\mu$ m,
- šroubovice pravá – stoupání 60°,
- pevnost v ohybu 3400MPa,
- tvrdost 2125 HV,
- složení 94% WC, 6% Co.

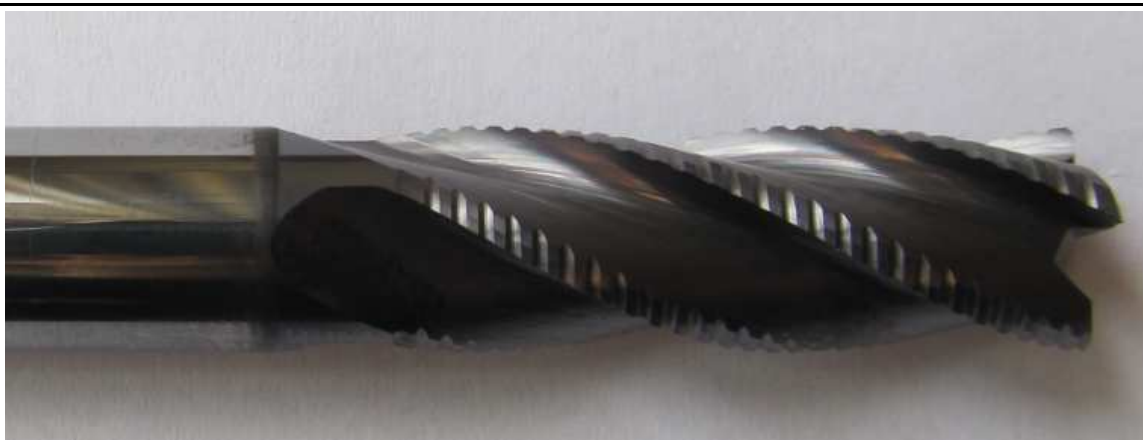
Tab. 8.3 Další vlastnosti válcové frézy – SK bez povlaku

	
Mikrotvrdost [HV]	2125
Maximální pracovní teplota [°C]	800

Tab. 8.4 Další vlastnosti válcové frézy – SK s povlakem AlTiN

	
Mikrotvrdost [HV]	3300
Maximální pracovní teplota [°C]	900

Tab. 8.5 Další vlastnosti válcové frézy – SK s povlakem nACO

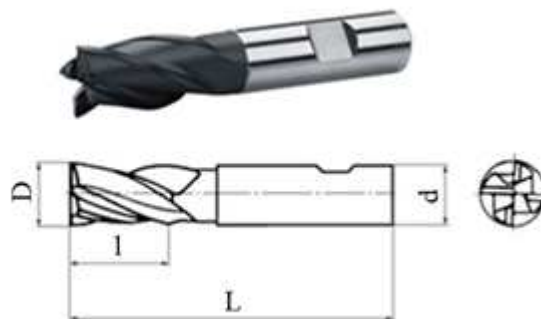
	
Mikrotvrdost [HV]	2510
Maximální pracovní teplota [°C]	1200

Tab. 8.6 Další vlastnosti válcové frézy – SK s povlakem DLC

	
Pevnost v tlaku [GPa]	4,8
Mikrotvrдость [HV]	7000 – 10000
Maximální pracovní teplota [°C]	700 – 800

Pro měření vlivu opotřebení na velikosti měrných řezných sil byla zvolena čelní válcová HSS fréza s povlakem na bázi (Al,Ti,Cr)N. Tento povlak je určen pro náročné frézování materiálů s vysokou odolností proti otěru za tepla [86] (charakteristika povlaku je uvedena v tab. 8.7). Frézovací nástroj pro obrábění dodala firma ZPS FRÉZOVACÍ NÁSTROJE, a. s. Jedná se o 4-břitou frézu  $\varnothing 16$  mm krátkou s jedním zubem přes střed.

ČSN 22 2130  
(DIN 844-N)  
(AlTiCr)N  
D=16 mm  
l=32 mm  
L=92 mm  
z= 4  
 $\lambda_s= 30^\circ$



Obr. 8.5 Vlastnosti HSS frézy [86].

Tab. 8.7 Charakteristika povlaku (Al,Ti,Cr)N [86].

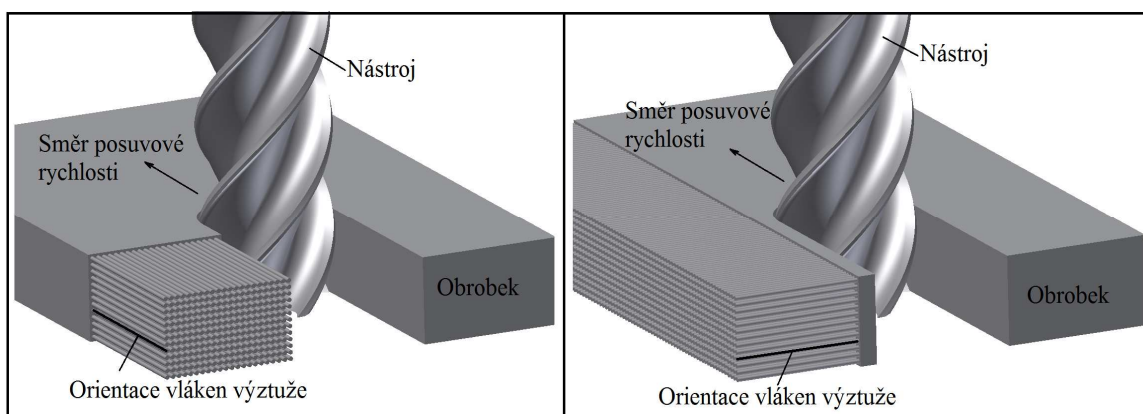
Povlak	Skupina	Struktura	Tvrđost [GPa]	Max. pracovní teplota[°C]	Koef. tření [ $\mu\text{m}$ ]	Tl. [ $\mu\text{m}$ ]
(Al,Ti,Cr)N	Supernitrid	monovrstva	40	900	0,55	2 - 4

### 8.3 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, šířky záběru hlavního ostří a řezné rychlosti. Všechna měření byla realizována pro nastavení orientace vláken výztuže  $0^\circ$  a  $90^\circ$  vůči posuvové rychlosti (viz obr. 8.6), protože mechanické vlastnosti vláken a mechanismus oddělování třísky jsou v těchto směrech rozdílné.

Pro měření byl vybrán nástroj ze SK s diamantovým povlakem. Zbývajícím nástroji ze SK byla provedena měření, která měla za cíl porovnání velikostí měrných řezných sil při obrábění s nástroji, na kterých jsou deponovány vybrané typy povlaků (viz kapitola 8.5).

Velikosti průřezů třísek byly vypočteny dle vztahu (4.13) pro konkrétní nástroje a nastavení řezných podmínek.

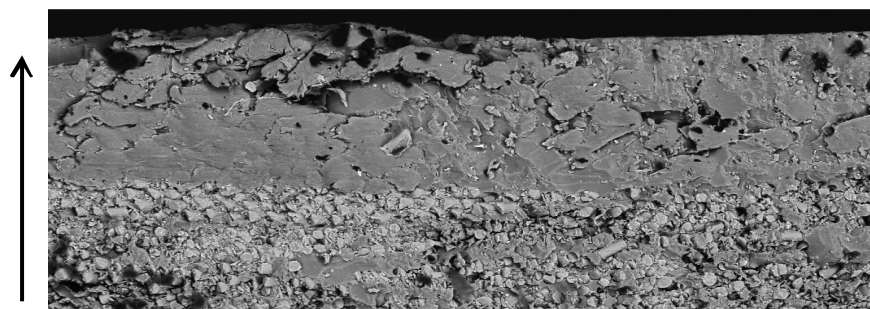


Obr. 8.6 Nastavení orientace vláken výztuže vůči vektoru řezné rychlosti.

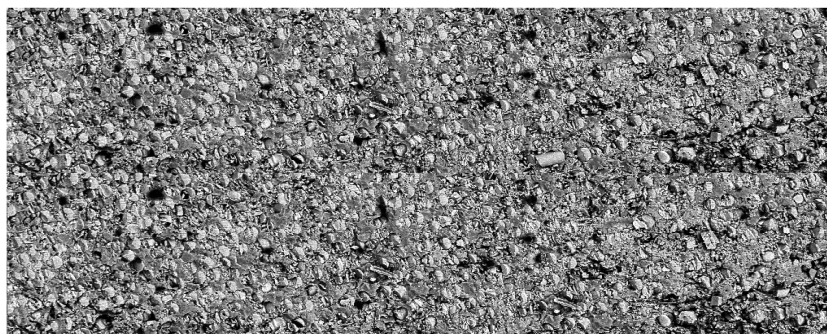
### 8.3.1 Změna posuvu

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 (dle vztahu 4.15) velikosti měrných řezných sil. Měření byla prováděna pro oba testované kompozitní materiály. Tabulka 8.7 a 8.8 ukazují nastavené řezné podmínky, vypočtené průřezy třísek a hodnoty měrných řezných sil.

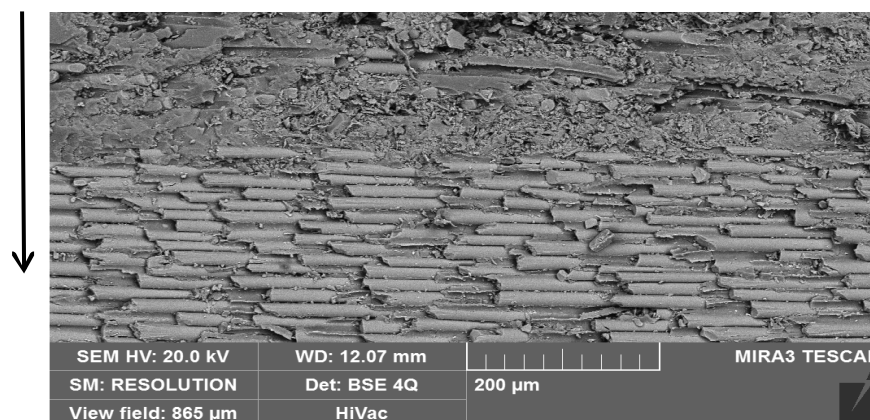
Hodnota šířky záběru hlavního ostří  $a_p$  byla při obrábění sklo-polyesterového kompozitu zvolena 5 mm z toho důvodu, aby byly obráběny současně všechny složky kompozitního materiálu (obalová fólie, skelná vlákna v pojivu, pás rovingu). Struktura jednotlivých vrstev materiálu je zobrazena na obr. 8.7.



Přechod mezi obalovou fólií a skelnými vlákny v polyesterovém pojivu

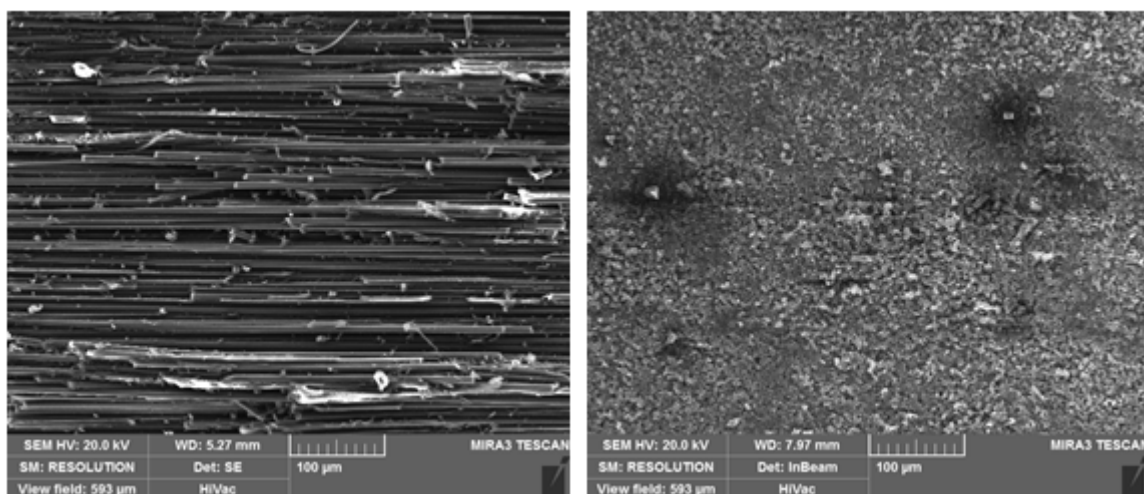


Přechod mezi skelnými vlákny v polyesterovém pojivu a vrstvou rovingu



Obr. 8. 7 Řez sklo-polyesterovým kompozitním materiálem 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. 8.8.

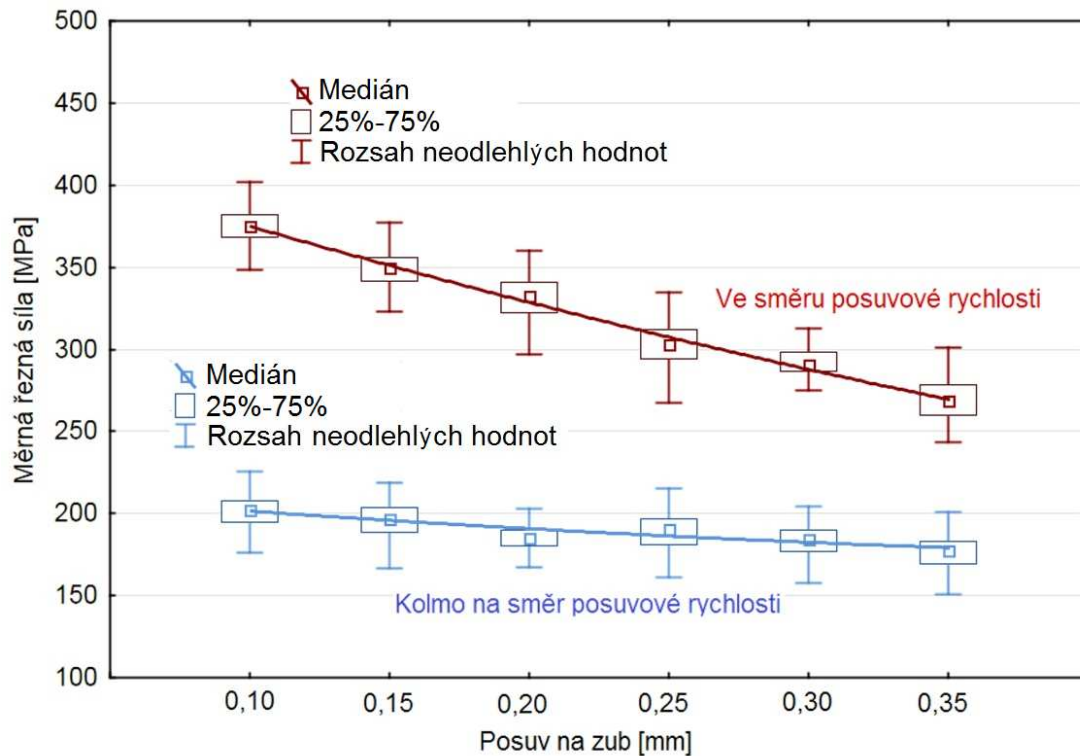


Obr. 8. 8 Řez uhlíkovou lamelou po směru vláken (vlevo) a kolmo na směr vláken výztuže (vpravo).

Tab. 8.7 Řezné podmínky a výsledné hodnoty  $k_c$  pro sklo-polyesterový kompozit.

Kompozitní materiál	Šířka záběru ostří $a_p$ [mm]	Otáčky $n$ [ot/min]	Orientace vláken	Posuv na zub [mm]	Průřez třísky [mm <sup>2</sup> ]	Měrná řezná síla [MPa]
Sklenná vlákna v polyesterové pryskyřici	5	2000	Kolmo na směr posuvové rychlosti	0,10	0,532	204
				0,15	0,799	196
				0,20	1,065	185
				0,25	1,333	190
				0,30	1,600	183
				0,35	1,868	177
	5	2000	Ve směru posuvové rychlosti	0,10	0,532	375
				0,15	0,799	349
				0,20	1,065	332
				0,25	1,333	302
				0,30	1,600	291
				0,35	1,868	268

Při obrábění s orientací vláken  $0^\circ$  (směr vláken rovnoběžný se směrem posuvové rychlosti) byly zaznamenány nižší hodnoty měrných řezných sil při obrábění obou kompozitních materiálů v porovnání s orientací vláken  $90^\circ$  (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. 8.9.



Obr. 8.9 Vývoj měrných řezných sil se změnou posuvu při obrábění sklo-polyesterového kompozitu.

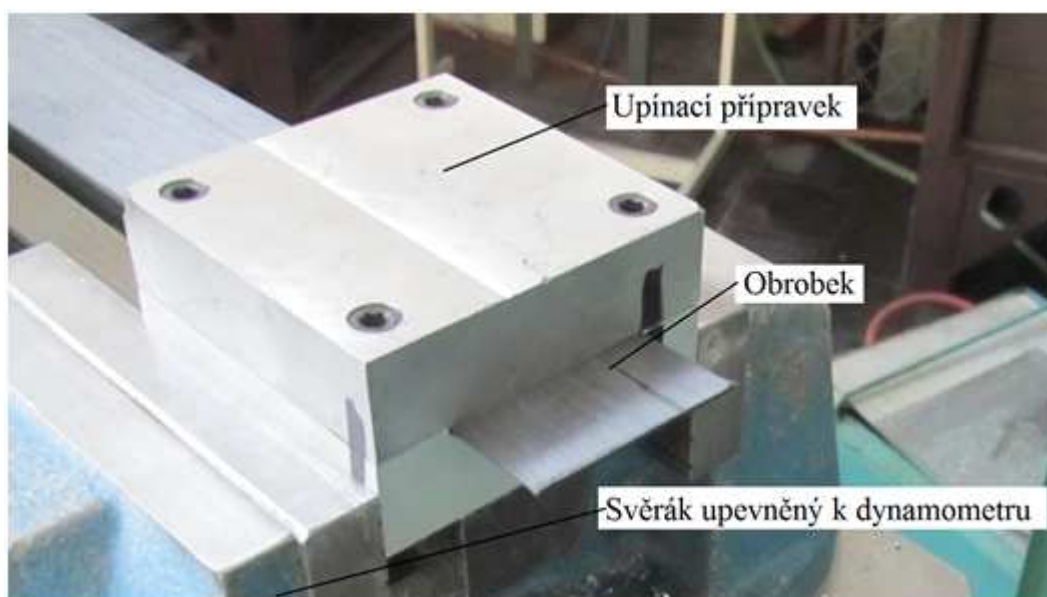
Rostoucí hodnota posuvu se projeví poklesem měrných řezných sil, tento pokles je výraznější pro případ nastavení vláken rovnoběžně se směrem posuvové rychlosti. Změna posuvu nemá výrazný vliv na rozsahy neodlehých hodnot vypočtených měrných řezných sil. Z grafu je patrné, že nejvyšší rozdíl je ve velikostech  $k_c$  (171 MPa) při hodnotě  $f_z=0,1$  mm pro různá nastavení vláken. S rostoucí hodnotou posuvu se tento rozdíl postupně snižuje až na hodnotu 91 MPa při hodnotě posuvu  $f_z=0,35$  mm.

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

Tab. 8.8 Řezné podmínky a výsledné hodnoty  $k_c$  pro uhlíko-epoxidový kompozit.

Kompozitní materiál	Šířka záběru ostří $a_p$ [mm]	Otáčky $n$ [ot/min]	Orientace vláken	Posuv na zub [mm]	Průřez třísky [mm <sup>2</sup> ]	Měrná řezná síla [MPa]
Uhlíková vlákna v epoxidové pryskyřici	1,4	2000	Kolmo na směr posuvové rychlosti	0,10	0,149	230
				0,15	0,224	199
				0,20	0,298	206
				0,25	0,373	184
				0,30	0,448	170
				0,35	0,523	149
			Ve směru posuvové rychlosti	0,1	0,149	388
				0,2	0,298	272
				0,3	0,448	167
				0,4	0,598	141

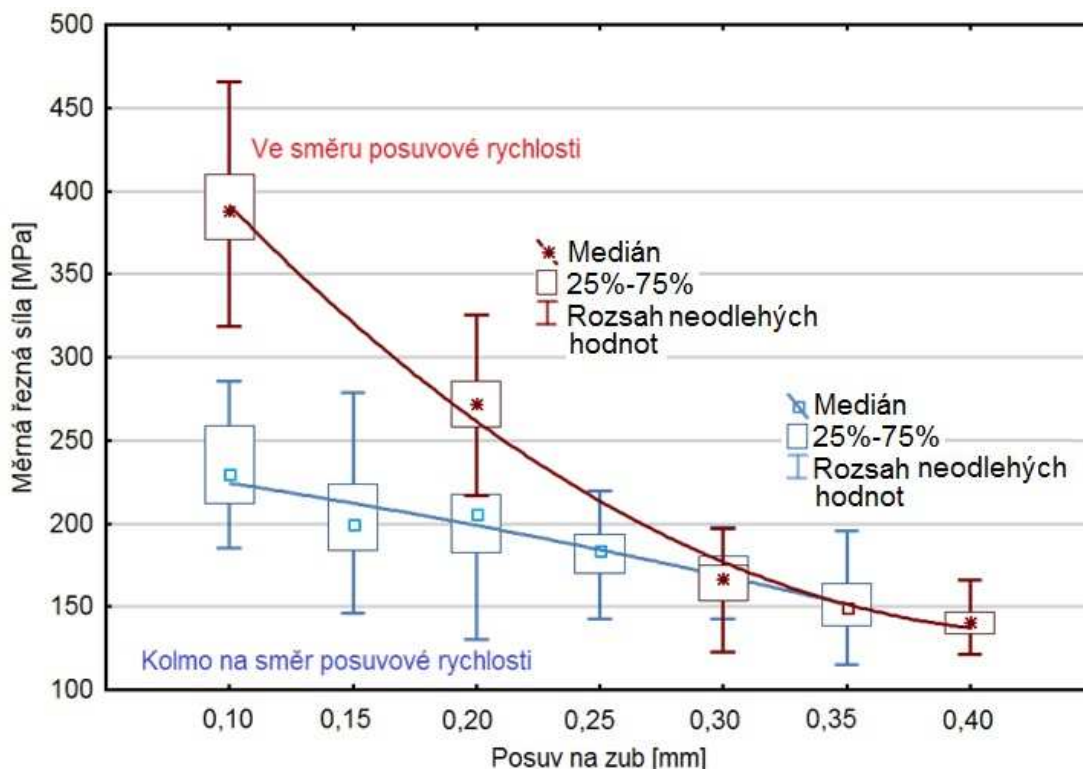
Při obrábění uhlíko-epoxidového kompozitu nebylo možné stabilní upnutí pouze pomocí svěráku, navíc při dotahování čelistí svěráku docházelo k praskání lamel. Z tohoto důvodu byl v laboratoři ÚST vyroben speciální upínací přípravek (viz obr. 8.10), pomocí kterého bylo možné rychlé a stabilní upnutí obrobku ve formě lamel.



Obr. 8.10 Upínací přípravek.

Šířka záběru ostří  $a_p$  byla při obrábění uhlíko-epoxidového kompozitu zvolena 1,4 mm (což odpovídá tloušťce lamely). Při frézování ve směru vláken výztuže byly provedeny pouze čtyři průjezdy materiálem pro zachycení vývoje měrných řezných sil, protože při tomto způsobu obrábění vznikalo větší množství dále nevyužitelného odpadového materiálu. Na šířce lamely mohly být vyfrézovány pouze dvě drážky, aby nedocházelo

k praskání stěn lamely. Následně musel být materiál zarovnán a až poté se mohlo experimentální obrábění opakovat. Obr. 8.11 znázorňuje vývoj měrných řezných sil při obrábění uhlíko-epoxidového kompozitu se změnou posuvu na zub. Je zde patrný výraznější rozdíl (158 MPa) při nejnižší hodnotě posuvu ( $f_z=0,1$  mm), postupně se tento rozdíl ovšem zmenšuje, až u hodnoty posuvu  $f_z=0,35$  mm mizí zcela a velikost  $k_c$  je pro oba případy nastavení orientace vláken téměř shodná. Při obrábění s úhlem nastavení vláken  $0^\circ$  je dále parné postupné zmenšení rozsahů neodlehých hodnot s rostoucí velikostí posuvu. Při úhlu nastavení  $90^\circ$  není vývoj rozsahu neodlehých hodnot  $k_c$  s rostoucí velikostí posuvu jednoznačný.



Obr. 8.11 Vývoj měrných řezných sil se změnou posuvu při obrábění uhlíko-epoxidového kompozitu.

Ze srovnání průběhů měrných řezných sil obou testovaných kompozitních materiálů vyplývá, že větší měrné řezné síly vznikají při obrábění uhlíko-epoxidového kompozitu, ovšem jen při nízkých hodnotách posuvu na zub. S orientací vláken  $0^\circ$  (orientace vláken ve směru posuvové rychlosti) jsou hodnoty  $k_c$  vyšší u uhlíko-epoxidového kompozitu pouze při hodnotě posuvu na zub  $f_z=0,1$  mm. S orientací vláken  $90^\circ$  (orientace vláken kolmá na směr posuvové rychlosti) jsou hodnoty  $k_c$  vyšší u uhlíko-epoxidového kompozitu do hodnoty posuvu na zub  $f_z=0,25$  mm. Porovnání naměřených měrných řezných sil získaných při obrábění obou testovaných kompozitních materiálů je souhrnně uvedeno v tabulce 8.9.

Tab. 8.9 Porovnání vybraných naměřených hodnot měrných řezných sil

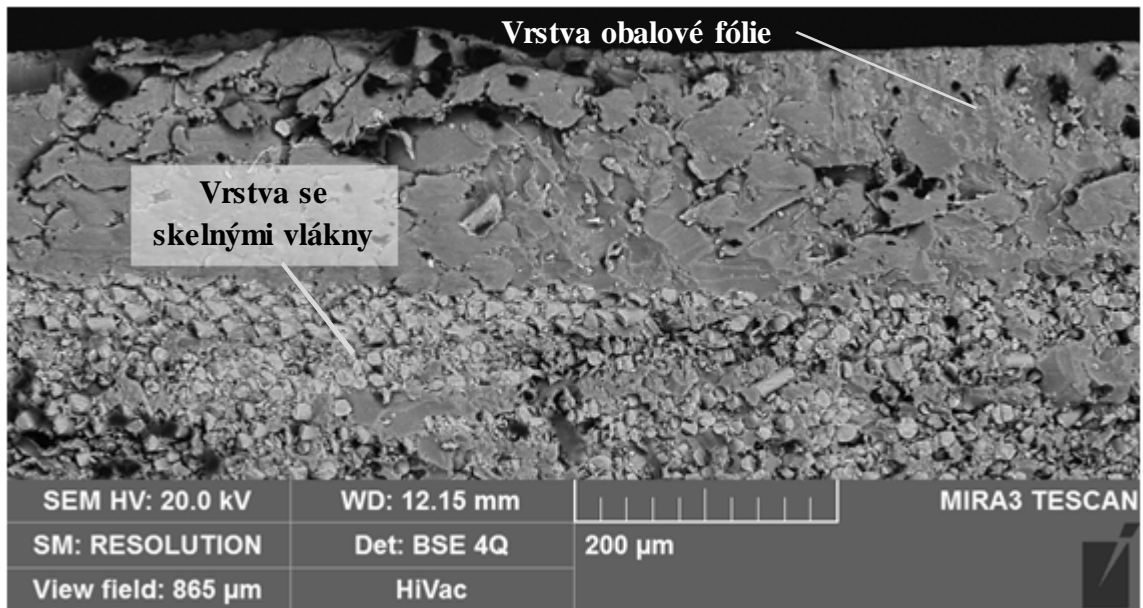
Orientace vláken	Posuv na zub [mm]	Měrná řezná síla při obrábění uhlíko-epoxidového kompozitu [MPa]	Měrná řezná síla při obrábění sklo-polyesterového kompozitu [MPa]
Kolmo na směr posuvové rychlosti	0,10	230	204
	0,15	199	196
	0,20	206	185
	0,25	184	190
	0,30	170	183
	0,35	149	177
Ve směru posuvové rychlosti	0,10	388	375
	0,20	272	332
	0,30	167	291
	0,40	141	252

### 8.3.2 Změna šířky záběru ostří

Dalším parametrem, který ovlivňuje hodnoty měrných řezných sil, je šířka záběru ostří nástroje. Bylo provedeno experimentální obrábění sklo-polyesterového kompozitu, při kterém byla postupně zvyšována velikost šířky záběru ostří  $a_p$  (viz obr. 8.14). Obrábění probíhalo pro nastavení vláken pod úhly  $0^\circ$  a  $90^\circ$  obdobě jako v předchozím případě.

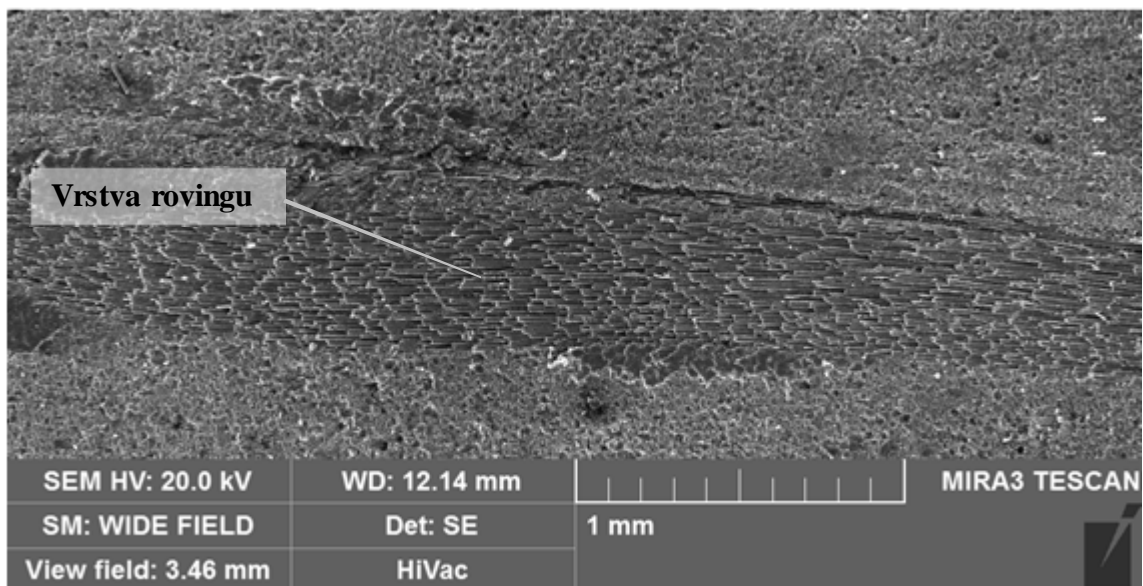
Měření nebylo provedeno pro uhlíko-epoxidový kompozit, protože tloušťka testovaných lamel byla pouze 1,4 mm. Rozsah měření by byl tedy výrazně omezený a získaná data by neměla patřičnou vypovídající hodnotu. Dalším důvodem byl předpoklad, že hodnota šířky záběru ostří nástroje by při frézování uhlíkových lamel podobných rozměrů v naprosté většině případů odpovídala tloušťce obráběné lamely.

Při obrábění sklo-polyesteru byly hodnoty  $a_p$  voleny tak, aby nástroj nejdříve odebíral pouze obalovou fólii a menší množství polyesterového pojiva se skelnými vlákny ( $a_p=1$  mm). Při tomto úběru materiálu byl předpokládán minimální rozdíl ve velikostech měrných řezných sil pro oba úhly nastavení směru vláken výztuže.

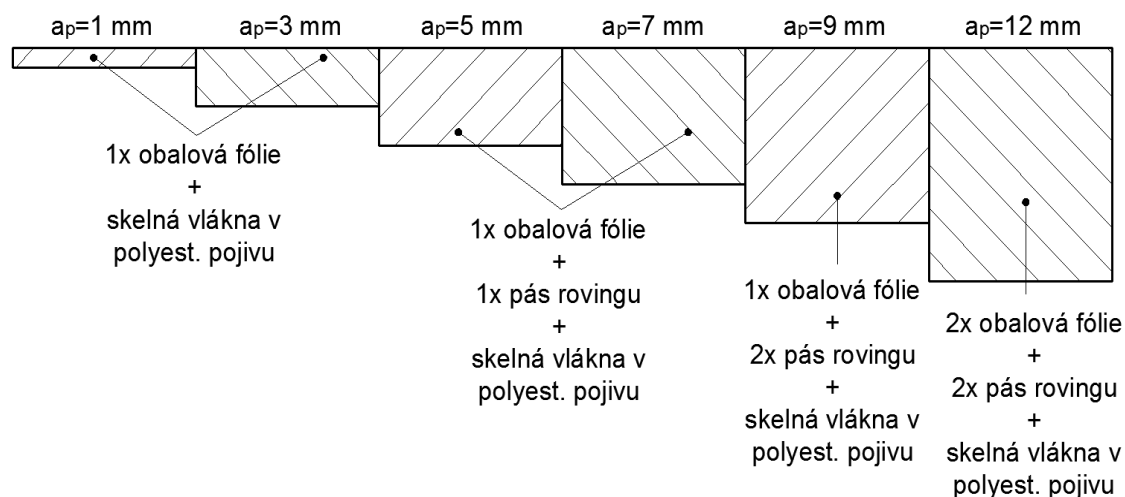


Obr. 8.12 Odebírané vrstvy sklo-polyesterového kompozitu při hodnotě  $a_p=1$  mm.

S dalším zvýšením hodnoty šířky záběru ostří ( $a_p=3$  mm), začal nástroj obrábět převážně matici s výztuží a byl tak předpokládán výraznější rozdíl ve velikostech  $k_c$ . Nad hodnotou  $a_p=3$  mm začala fréza odebírat nejdříve jednu a následně dvě vrstvy pásů rovingů (viz obr. 8.14). Maximální hodnota šířky záběru ostří odpovídala tloušťce profilu kompozitního materiálu ( $a_{p,max}=12$  mm). Nastavené řezné podmínky, vypočtené hodnoty průřezů třísek a měrných řezných sil jsou uvedeny v tab. 8.10.



Obr. 8.13 Vrstva rovingu v řezu sklo-polyesterovým kompozitním materiálem.

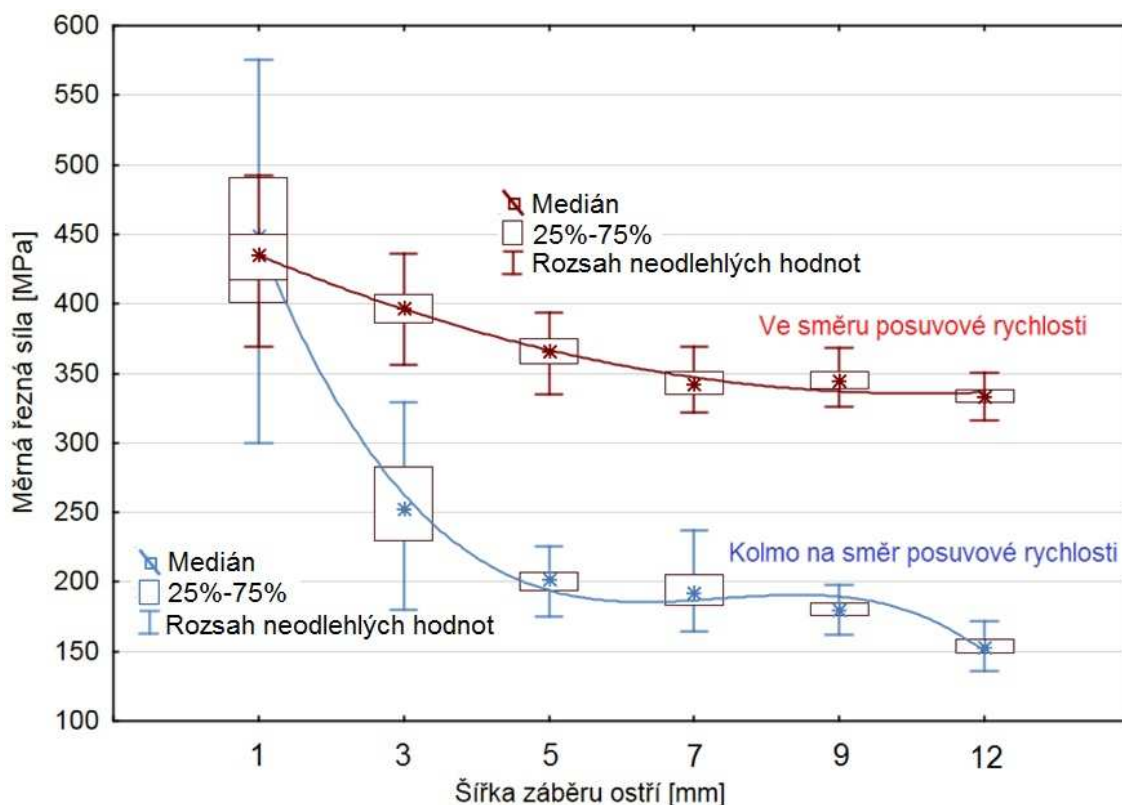


Obr. 8.14 Odebírané vrstvy sklo-polyesterového kompozitu s rostoucí hodnotou  $a_p$ .

Složení jednotlivých vrstev odebíraného materiálu bylo proměnlivé. Pásky rovingů neprocházely maticí rovnoběžně s povrchem profilu, ale v některých případech vybočovaly z ideální linie až o 1,5 milimetru (viz obr. 8.3).

Tab. 8.10 Řezné podmínky a výsledné hodnoty  $k_c$  pro sklo-polyesterový kompozit.

Kompozitní materiál	Posuv na zub [mm]	Otáčky $n$ [ot/min]	Orientace vláken	Šířka záběru ostří $a_p$ [mm]	Průřez třísky [mm <sup>2</sup> ]	Měrná řezná síla [MPa]
Skelná vlákna v polyesterové pryskyřici	0,1	2000	Kolmo na směr posuvové rychlosti	1	0,106	449
				3	0,319	397
				5	0,532	366
				7	0,745	342
				9	0,958	344
				12	1,277	333
			Ve směru posuvové rychlosti	1	0,106	435
				3	0,319	252
				5	0,532	201
				7	0,745	192
				9	0,958	180
				12	1,277	153



Obr. 8.15 Vývoj měrných řezných sil se změnou šířky záběru hlavního ostří.

S rostoucí velikostí šířky záběru hlavního ostří je patrná klesající tendence měrných řezných sil pro oba případy nastavení orientace vláken. Při hodnotě  $a_p=1$  mm, jsou velikosti měrných řezných sil téměř shodné (rozdíl 14 MPa). To je dáno skutečností, že nástroj při této hodnotě  $a_p$  obrábí obalovou fólii s menším množstvím skelných vláken. Ovšem následující hodnoty měrných řezných sil (pro nastavení  $a_p=3$  mm) jsou výrazněji odlišné (rozdíl 145 MPa), to je dáno skutečností, že jsou již ve větší míře obráběna skelná vlákna pod rozdílnými úhly. S dalším růstem  $a_p$  jsou rozdíly ve velikostech měrných řezných sil stále výraznější (v maximu až 180 MPa), což je způsobeno neustálým nárůstem množství obráběných skelných vláken. Všechny hodnoty měrných řezných sil jsou souhrnně uvedeny v tab. 8.11.

Tab. 8.11 Hodnoty měrných řezných sil pro sklo-polyesterový kompozit.

Šířka záběru ostří $a_p$ [mm]	Měrná řezná síla [MPa]		Rozdíl měrných řezných sil odlišných orientací vláken [MPa]
	Orientace vláken pod úhlem $0^\circ$	Orientace vláken pod úhlem $90^\circ$	
1	449	435	14
3	397	252	145
5	366	201	165
7	342	192	150
9	344	180	164
12	333	153	180

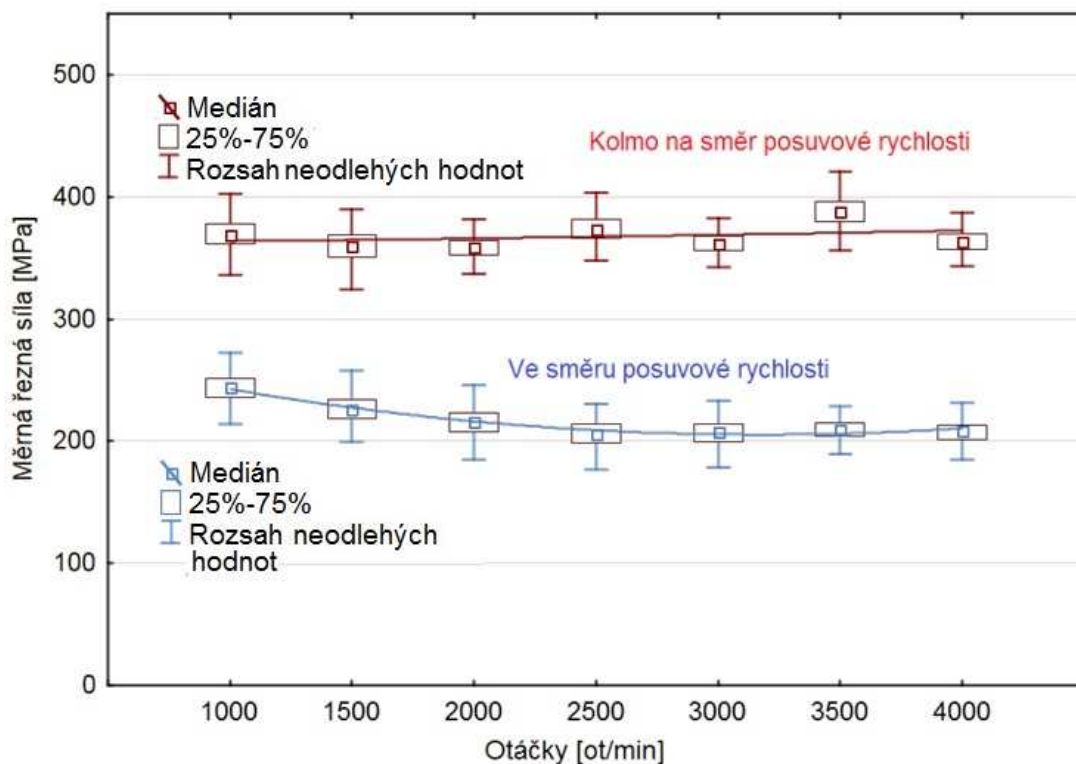
### 8.3.3 Změna řezné rychlosti

Posledním parametrem, u něhož byl sledován vliv na velikost měrných řezných sil, byla řezná rychlost (otáčky vřetene). Experimentální obrábění bylo provedeno pro oba testované kompozitní materiály s úhlem nastavení vláken  $0^\circ$  a  $90^\circ$ . Rozsah řezné rychlosti byl zvolen  $v_c=31-126$  m/min (otáčky vřetene 1000–4000 ot/min). Šířka záběru ostří byla opět zvolena  $a_p=5$  mm pro sklo-polyesterový a 1,4 mm pro uhlíko-epoxidový kompozitní materiál ze stejných důvodů jako v kapitole 8.3.1 (Změna posuvu). Řezné podmínky a naměřené hodnoty měrných řezných sil jsou uvedeny v tabulkách 8.12 a 8.13. Průřez třísky zůstává při obrábění obou kompozitních materiálů konstantní.

Tab. 8.12 Řezné podmínky a výsledné hodnoty  $k_c$  pro sklo-polyesterový kompozit.

Kompozitní materiál	Posuv na zub [mm]	Šířka záběru ostří $a_p$ [mm]	Orientace vláken	Otáčky n [ot/min]	Řezná rychlost [m/min]	Průřez třísky [mm <sup>2</sup> ]	Měrná řezná síla [MPa]
Sklenná vlákna v polyesterové pryskyřici	0,1	5	Kolmo na směr posuvové rychlosti	1000	31,42	0,532	369
				1500	47,12		360
				2000	62,83		359
				2500	78,54		373
				3000	94,25		361
				3500	109,95		388
			Ve směru posuvové rychlosti	4000	125,66		363
				1000	31,42		244
				1500	47,12		227
				2000	62,83		216
				2500	78,54		206
				3000	94,25		208
				3500	109,95		209
				4000	125,66		208

Krok zvolený pro zvyšování řezné rychlosti byl zvolen 15,71 m/min (500 ot/min) u sklo-polyesterového kompozitu a 31,42 m/min (1000 ot/min) u uhlíko-epoxidového kompozitu. Tyto velikosti kroků byly zvoleny s ohledem na menší množství uhlíko-epoxidového kompozitu, nicméně pro zachycení vývojového trendu měrných řezných sil se ukázal tento krok jako přijatelný. Vývoje měrných řezných sil jsou znázorněny na obr. 8.16 a 8.17.

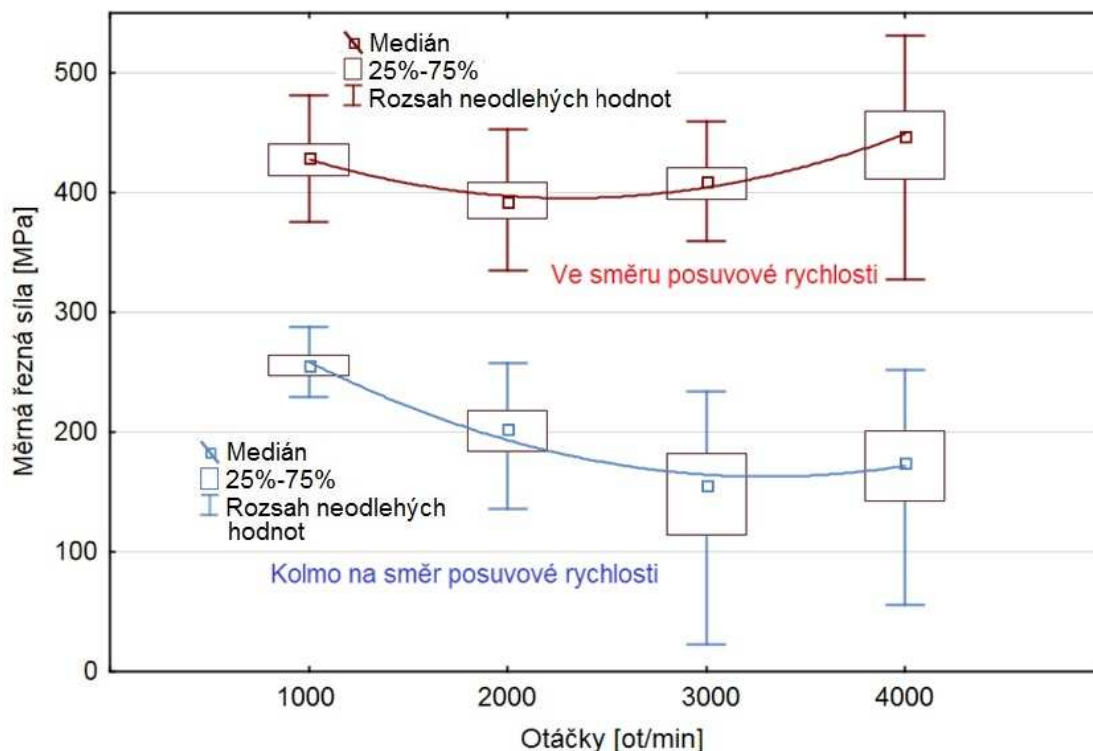


Obr. 8.16 Vývoj měrných řezných sil se změnou řezné rychlosti při obrábění sklo-polyesterového kompozitu.

Hodnoty měrných řezných sil naměřené při obrábění sklo-polyesterového kompozitu ukazují, že při nastavení vláken ve směru posuvové rychlosti jsou hodnoty  $k_c$  vyšší o 54–66% než při nastavení vláken kolmo ke směru posuvové rychlosti. Trend vývoje měrných řezných sil je ve srovnání se změnami ostatních parametrů ( $a_p$ ,  $f_z$ ) mírný a nelze jednoznačně říci, zda se měrná řezná síla s nárůstem řezné rychlosti při obrábění sklo-polyesterového kompozitu snižuje či zvyšuje.

Tab. 8.13 Řezné podmínky a výsledné hodnoty  $k_c$  pro uhlíko-epoxidový kompozit.

Kompozitní materiál	Posuv na zub [mm]	Šířka záběru ostří [mm]	Orientace vláken	Otáčky [ot/min]	Řezná rychlost [m/min]	Průřez třísky [mm <sup>2</sup> ]	Měrná řezná síla [MPa]
Uhlíková vlákna v epoxidové pryskyřici	0,1	1,4	Ve směru posuvové rychlosti	1000	31,42	0,149	429
				2000	62,83		392
				3000	94,25		409
				4000	125,66		447
			Kolmo na směr posuvové rychlosti	1000	31,42		256
				2000	62,83		203
				3000	94,25		155
				4000	125,66		175



Obr. 8.17 Vývoj měrných řezných sil se změnou řezné rychlosti při obrábění uhlíko-epoxidového kompozitu.

Při testování uhlíko-epoxidového kompozitu byly opět naměřeny vyšší hodnoty měrných řezných sil (o 38–60%) při nastavení vláken ve směru posuvové rychlosti. Na rozdíl od hodnot měrných řezných sil získaných při obrábění sklo-polyesterového kompozitu je zde lépe patrný vývojový trend měrných řezných sil u obou případů nastavení orientace vláken. Dále lze pozorovat postupně se rozšiřující rozsahy neodlehých hodnot a rozptýlů se vzrůstající hodnotou řezné rychlosti.

Tab. 8.14 Porovnání měrných řezných sil testovaných kompozitů.

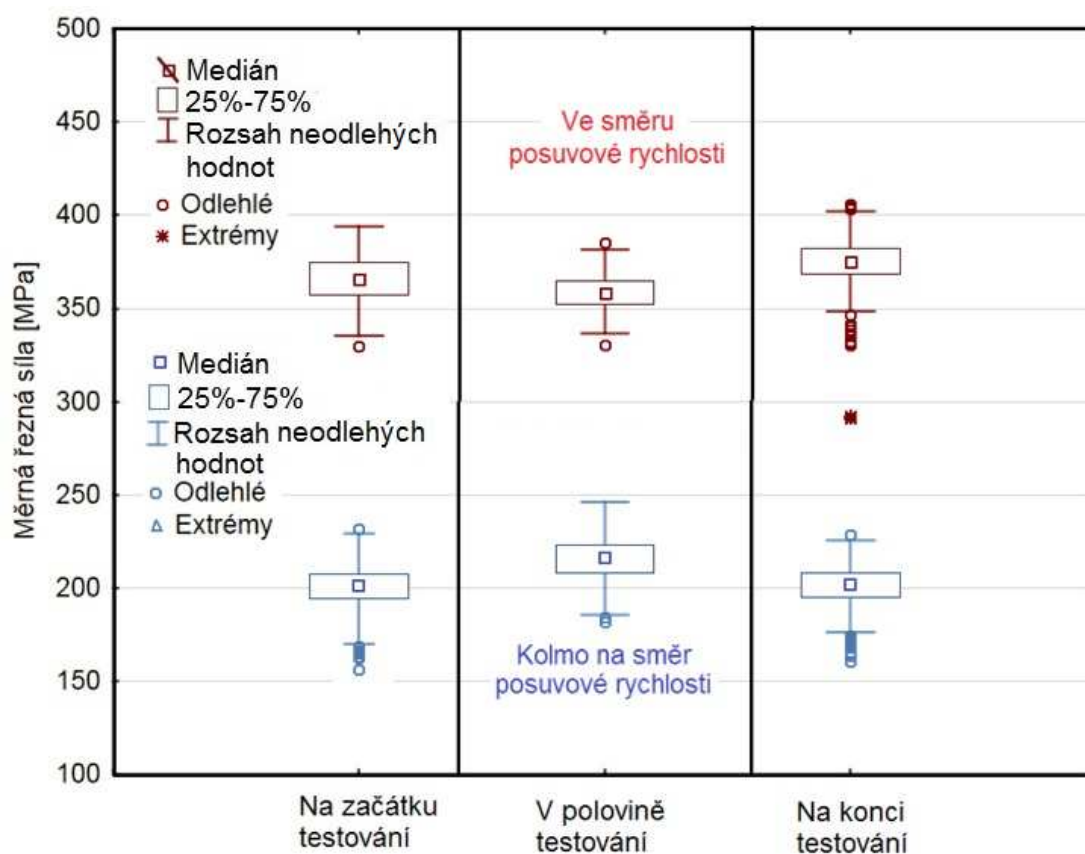
Orientace vláken	Otáčky n [ot/min]	Řezná rychlost [m/min]	Měrná řezná síla při obrábění sklo-polyesterového kompozitu [MPa]	Měrná řezná síla při obrábění uhlíko-epoxidového kompozitu [MPa]
Ve směru posuvové rychlosti	1000	31,42	369	429
	2000	62,83	359	392
	3000	94,25	361	409
	4000	125,66	363	447
Kolmo na směr posuvové rychlosti	1000	31,42	244	256
	2000	62,83	216	203
	3000	94,25	208	155
	4000	125,66	208	175

### 8.3.4 Kontrolní měření

Vzhledem ke skutečnosti, že experimentální obrábění popsané v kapitole 8.3 probíhalo celé pouze s jedním nástrojem ze SK s diamantovým povlakem. 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 (viz obr. 8.18). Řezné podmínky byly nastaveny:

- šířka záběru ostří  $a_p=5\text{ mm}$ ,
- otáčky  $n=2000\text{ ot/min}$  ( $v_c=62,83\text{ m/min}$ ),
- posuv na zub  $f_z=0,1\text{ mm}$
- pracovní záběr ostří  $a_e=10\text{ mm}$ .

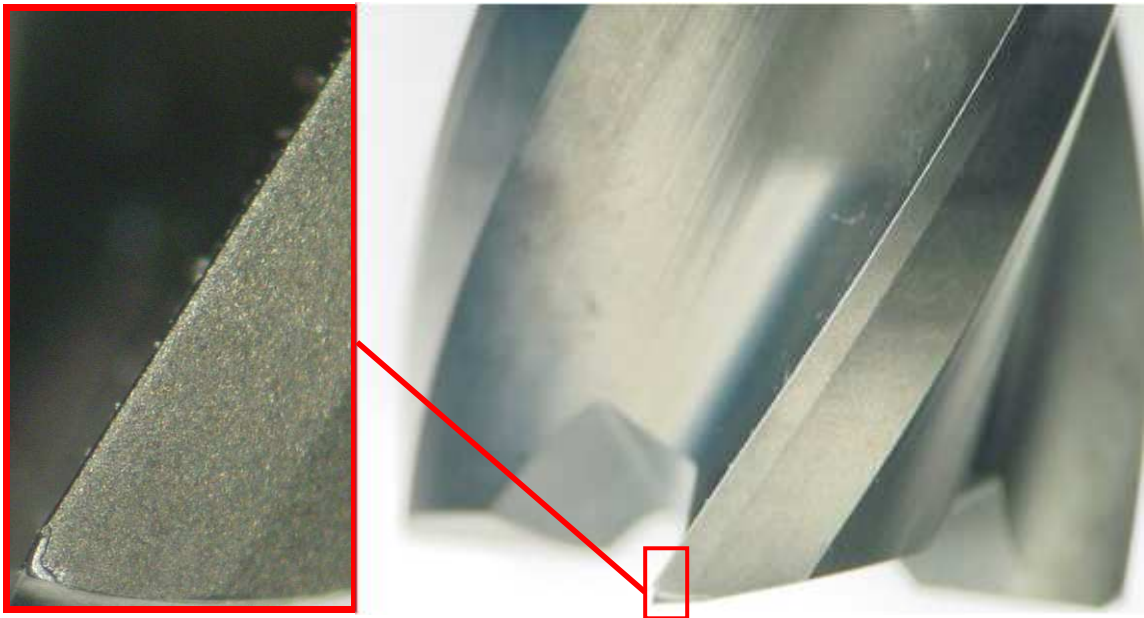
Cílem měření bylo zjistit, zda nedošlo k růstu silového zatížení (vypočtených měrných řezných sil) v průběhu testování vlivem opotřebení nástroje. Opotřebení břitu frézy je zobrazeno na obr. 8.19, 8.20 a 8.21.



Obr. 8.18 Měrné řezné síly v průběhu testování.

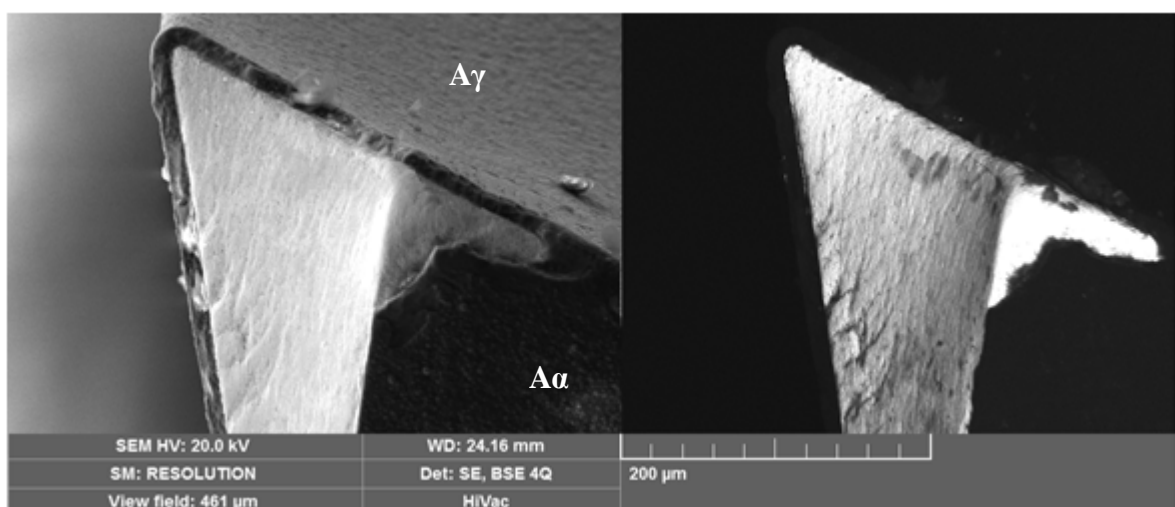
Srovnáním naměřených hodnot měrných řezných sil lze pozorovat drobné odchylky v průběhu testování, způsobené pravděpodobně nestejnou strukturou obráběného materiálu a nerovnoměrně rozprostřenou vrstvou rovingu. Maximální změna velikosti  $k_c$  (9 MPa) byla zaznamenána při obrábění vláken pod úhlem  $0^\circ$  (ve směru posuvové

rychlosti). Při obrábění s orientací vláken  $90^\circ$  (kolmo na směru posuvové rychlosti) byl rozdíl pouze 1 MPa. Lze tedy konstatovat, že nedošlo k nárůstu získaných hodnot měrných řezných sil při obrábění nástrojem ze SK s diamantovým povlakem v průběhu testování popsaném v kapitole 8.3 (Vývoj měrných řezných sil při změně řezných podmínek).

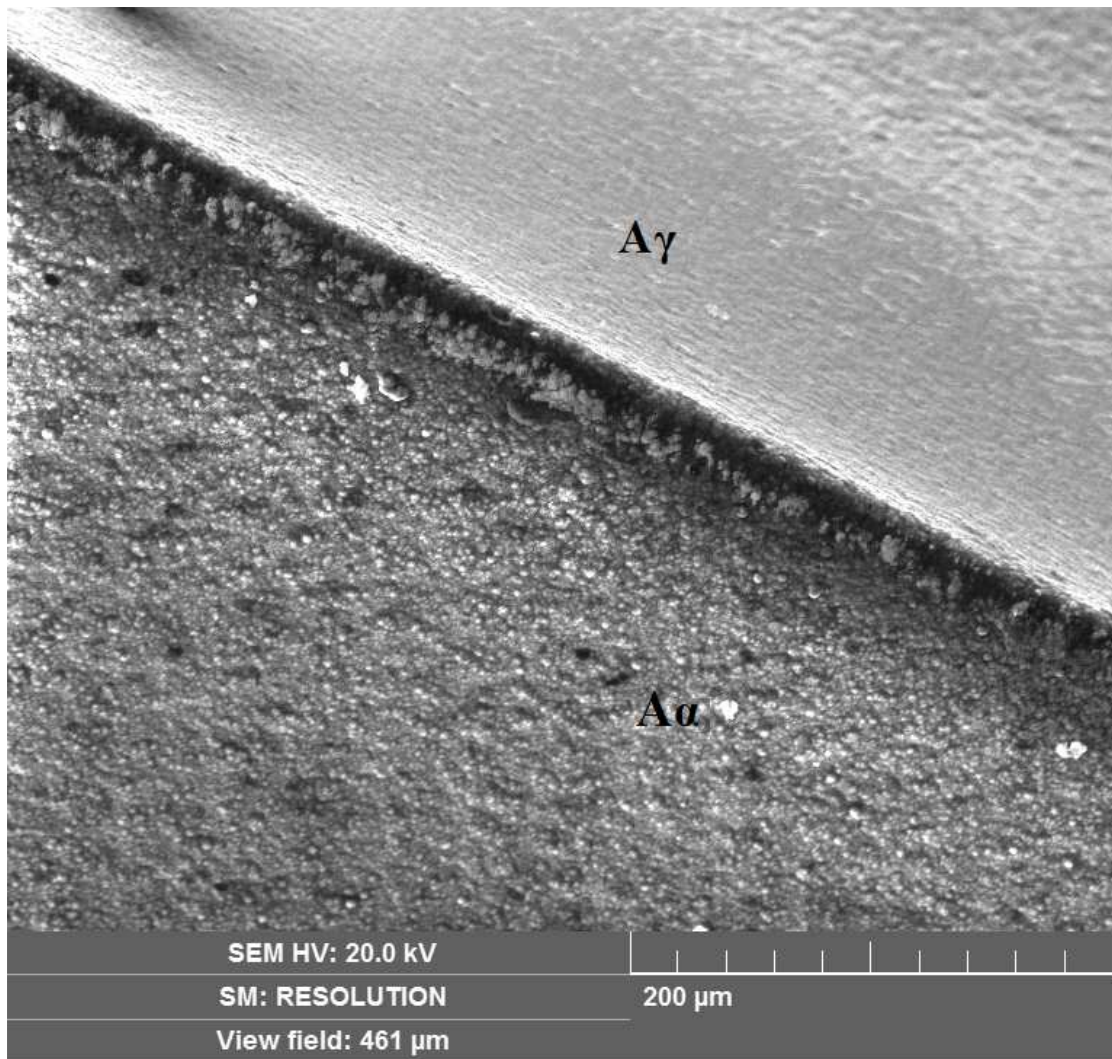


Obr. 8.19 Opatření nástroje po skončení experimentálního obrábění.

Na jednotlivých břitech nástroje nebylo po skončení experimentálního obrábění patrné téměř žádné poškození povlaku. Hřbetní opotřebení nástroje nepřesáhlo hodnotu  $VB=0,02$  mm. Na nástroji ovšem došlo v průběhu testování k poškození povlaku na špicích ostří nástroje (viz obr. 8.20). Stav povlaku na ostří nástroje je zobrazen na obr. 8.21.



Obr. 8.20 Opatření špičky nástroje po testování.



Obr. 8.21 Opotřebenění nástroje po testování.

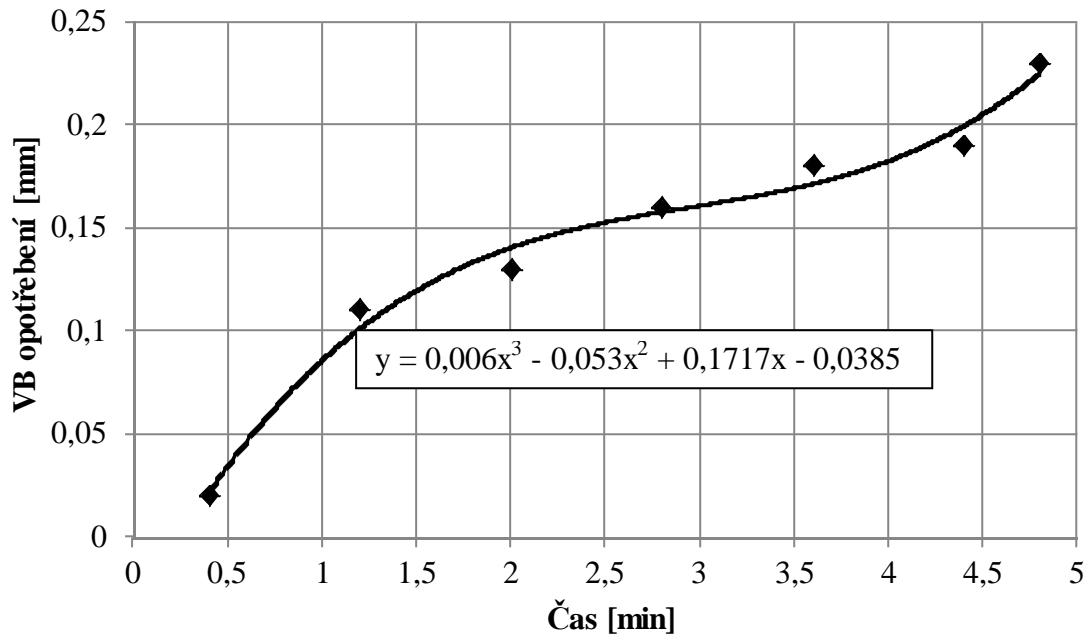
#### 8.4 Vliv opotřebenění nástroje na hodnoty měrných řezných sil

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-břítá HSS fréza krátká (s jedním zubem přes střed) s povlakem (Al,Ti,Cr)N (vlastnosti nástroje a naneseného povlaku jsou popsány 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. Hodnota horní hranice VB opotřebenění nástroje byla stanovena na  $VB=0,2\text{ mm}$ . Ve chvíli, kdy nástroj dosáhl této hodnoty opotřebenění, bylo testování zastaveno. Rozvoj VB opotřebenění nástroje v čase je znázorněn na obr. 8.22.

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.

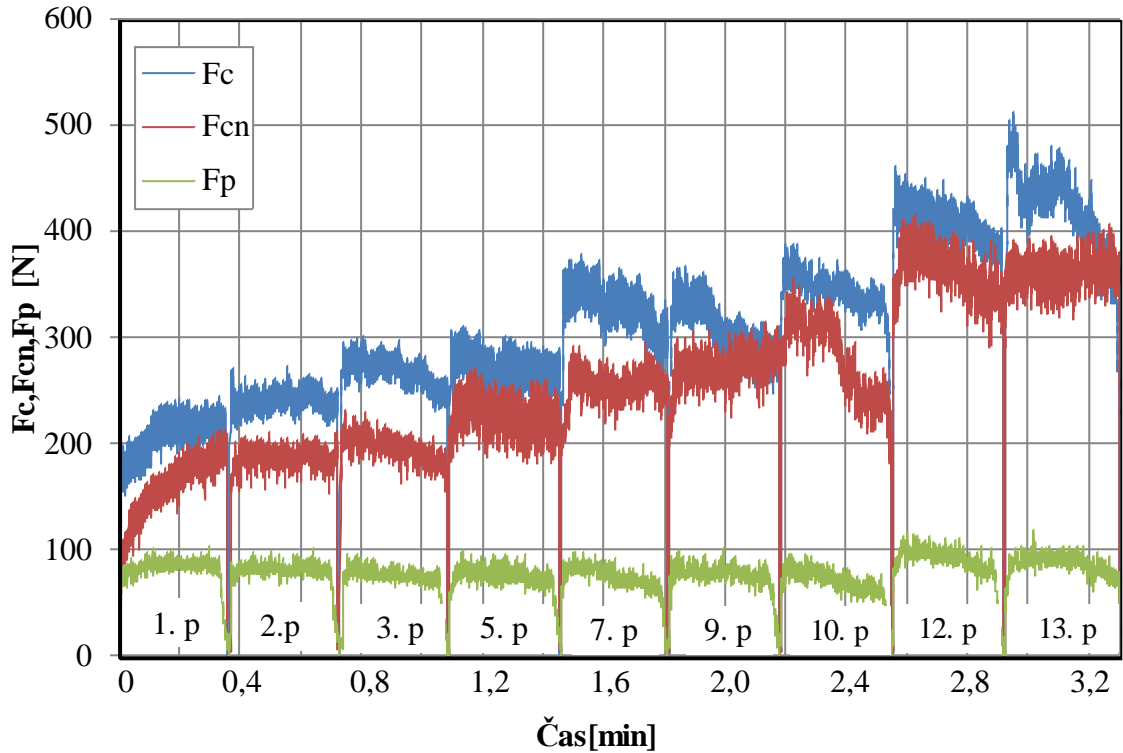


Obr. 8.22 Rozvoj VB opotřebení nástroje.

Jako materiál obrobku byl zvolen sklo-polyesterový kompozit. Obrábění probíhalo s nastaveným úhlem vláken  $0^\circ$  (směr vláken rovnoběžný se směrem posuvové rychlosti). Jak bylo zjištěno v předcházejících kapitolách, při tomto nastavení vláken mají měrné řezné síly působící na nástroj vyšší hodnoty než při nastavení vláken pod úhlem  $90^\circ$ .

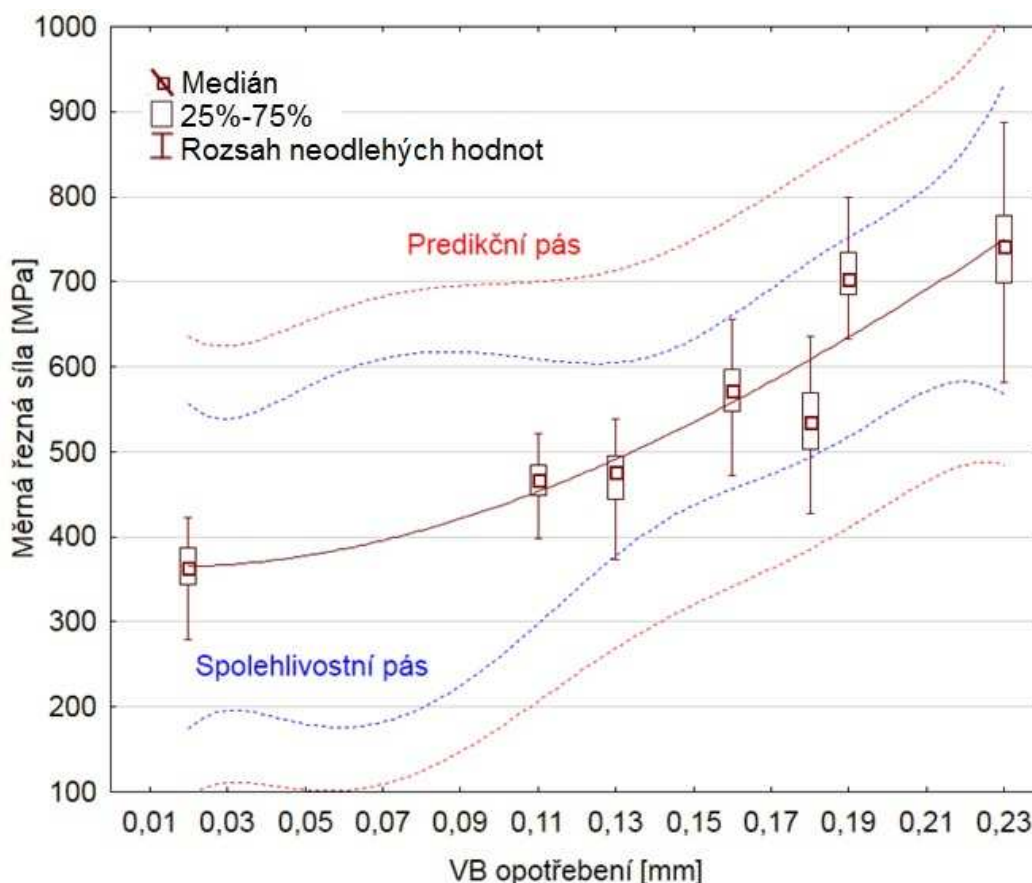
Vzhledem k vysoké rychlosti zahřívání řezného nástroje z HSS byla po každém průjezdu materiálem (délka průjezdu 160 mm) 5 minutová prodleva, které byla využita k měření VB opotřebení nástroje na dílenském mikroskopu. Při vyjímání nástroje z vřetene musela obsluha použít žáruvzdornou rukavici, aby nedošlo k popálení obsluhy. Řezný nástroj dosáhl stanovené hodnoty opotřebení po 13. průjezdu materiálem, což odpovídá cca 5 min obrábění. Vzhledem k rychlosti a rozsahu opotřebení bylo možné v prodlevách sledovat nárůst VB opotřebení pouhým okem. Na hřbetech jednotlivých břitů byly patrné drobné rýhy způsobené třením přerušovaných vláken výztuže.

Nárůst jednotlivých složek výsledné síly působící na řezný nástroj je znázorněn na obr. 8.23. Je zde patrný výrazný nárůst řezné síly  $F_c$  a normálové síly  $F_{cn}$ , pasivní síla  $F_p$  zůstává v průběhu obrábění bez výraznějších změn.



Obr. 8.23 Vývoj silového zatížení s rostoucím opotřebením nástroje.

Pro stanovení měrných řezných sil dle vztahu (4.15) bylo nutné vypočítat velikost průřezu třísky  $A_D$  pro dané řezné podmínky dle vzorce (4.13). Vývoj měrných řezných sil s rostoucím opotřebením nástroje je uveden na obr. 8.24, který je dále doplněn o regresní křivku, predikční pás a pás spolehlivosti.



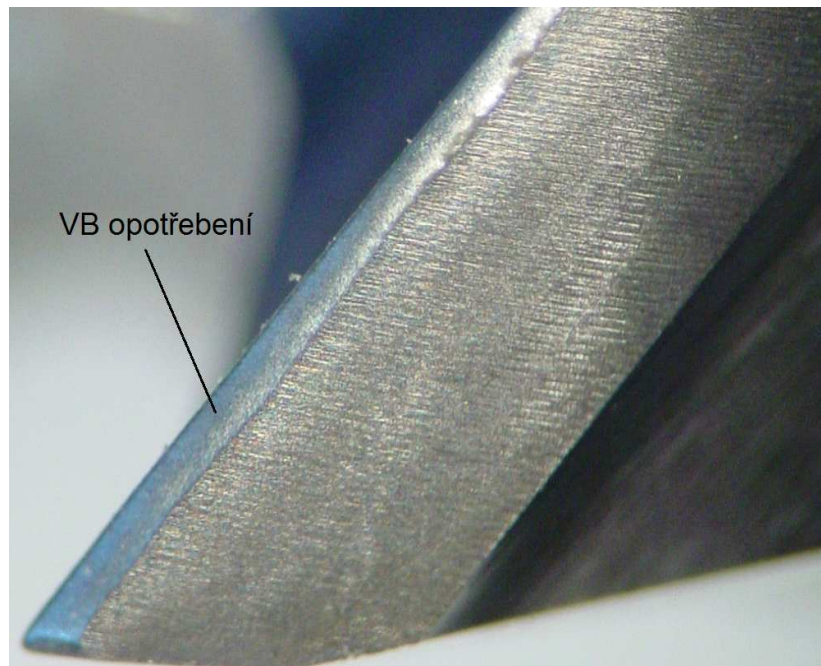
Obr. 8.24 Vývoj velikostí měrných řezných sil s rostoucím opotřebením nástroje.

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. Rozdíl tedy činil 378 MPa. Všechny hodnoty  $k_c$  a VB opotřebení jsou uvedeny v tab. 8.15.

Predikční a spolehlivostní pás ukazují, že vzhledem k velkému skoku ve velikosti opotřebení po prvním a třetím průjezdu (z  $VB_1=0,02$  mm na  $VB_3=0,11$  mm), není v tomto úseku grafu průběh regresní křivky příliš spolehlivý. Nad hodnotou opotřebení  $VB_3=0,11$  mm se pásy zužují, což znamená, že v této oblasti je průběh regresní křivky přesnější. Na konci grafu dochází opět k rozšíření pásů spolehlivosti, tentokrát ovšem v důsledku většího rozsahu neodlehých hodnot měrné řezné síly.

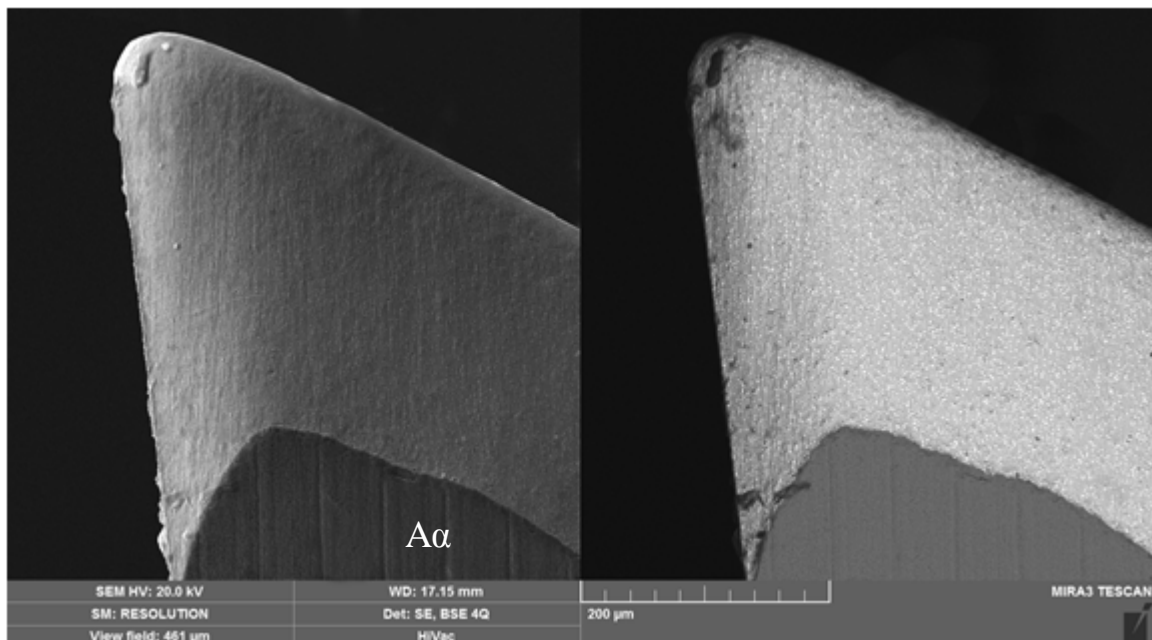
Tab. 8.15 Naměřené hodnoty opotřebení a měrných řezných sil.

Průjezd č.	1	3	5	7	9	11	13
VB opotřebení [mm]	0,02	0,11	0,13	0,16	0,18	0,19	0,23
Měrná řezná síla [MPa]	334	467	477	572	535	704	742

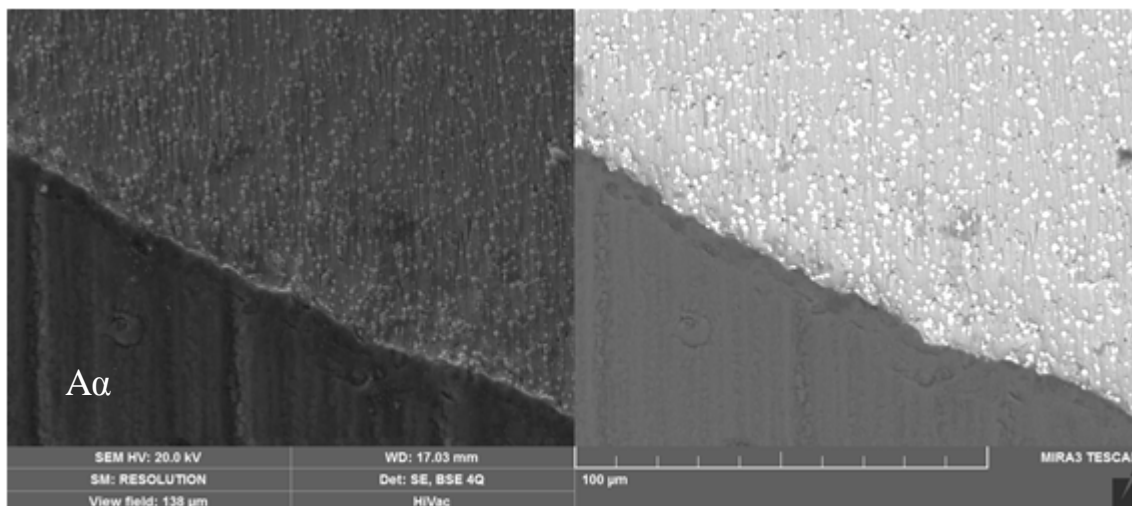


Obr. 8.25 VB opotřebení HSS nástroje

Opotřebení frézy bylo primárně způsobeno abrazivním třením přerušovaných 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 obr. 8.26 a 8.27).



Obr. 8.26 Hřbetní opotřebení nástroje na špici ostří.



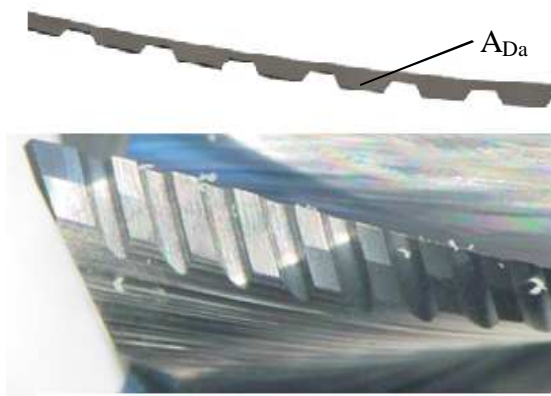
Obr. 8.27 Hranice VB opotřebení na hřbetu nástroje.

## 8.5 Měrné řezné sily při obrábění nástroji s rozličnými typy povlaků

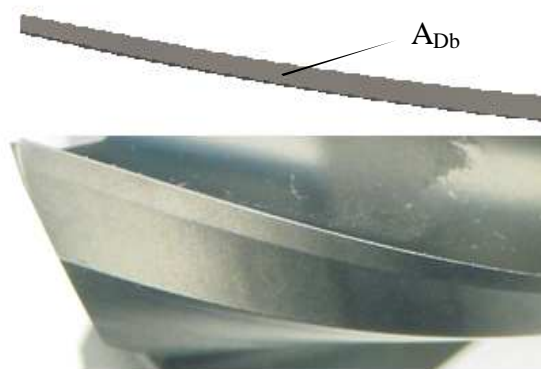
Dalším faktorem, který ovlivňuje velikosti měrných řezných sil, je typ nástroje použitého pro obrábění. V této kapitole je zkoumán vliv aplikace rozličných typů povlaků nanesených na nástroje ze SK na velikosti měrných řezných sil. Pro porovnání nástrojů bylo provedeno více experimentálních měření, aby 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 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 předcházejících kapitolách. 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. Obrábění probíhalo opět s nastavením orientace vláken pod úhlem  $0^\circ$  (ve směru posuvové rychlosti) a  $90^\circ$  (kolmo na směru posuvové rychlosti) pro sklo-polyesterový a uhlíko-epoxidový kompozitní materiál. Pro výpočet měrných řezných sil bylo nutné znovu stanovit velikosti průřezů třísek pro obrábění s různými řeznými podmínkami pro nástroje A, B a C, protože tyto nástroje byly po obvodu vybaveny utvařeči třísky (viz obr. 8.28a). Vztah (4.13) nebylo tedy v tomto případě možné použít, proto byl pro stanovení průřezů třísek použit software Autodesk Inventor Professional 2013, ve kterém byly průřezy třísek vymodelovány a z vytvořených modelů byly následně odečteny obsahy ploch  $A_D$ .



Obr. 8.28a Průřez třísky a břit nástroje s utvařečem třísky.



Obr. 8.28b Průřez třísky a břit nástroje bez utvařeče třísky.

### 8.5.1 Porovnání $k_c$ při změně velikosti posuvu

Zvýšení hodnoty posuvu se projeví poklesem velikostí měrných řezných sil. Cílem této kapitoly bylo porovnat hodnoty  $k_c$  získané při obrábění vybranými nástroji s různými typy povlaků. Měření probíhalo pro hodnoty posuvu na zub  $f_z=0,1$  mm a  $f_z=0,35$  mm při obrábění sklo-polyesterového kompozitu a  $f_z=0,1$  mm a  $f_z=0,4$  mm při obrábění uhlíko-epoxidového kompozitu. Podrobný průběh  $k_c$  při změně velikosti posuvu byl popsán v kapitole 8.3.1 (Změna posuvu). Řezné podmínky, které zůstávaly v průběhu testování konstantní, byly nastaveny:

- šířka záběru ostří  $a_p=5$  mm (sklo/polyester) a  $a_p=1,4$  mm (uhlíko-epoxid),
- otáčky  $n=2000$  ot/min ( $v_c=62,83$  m/min),
- pracovní záběr ostří  $a_e=10$  mm.

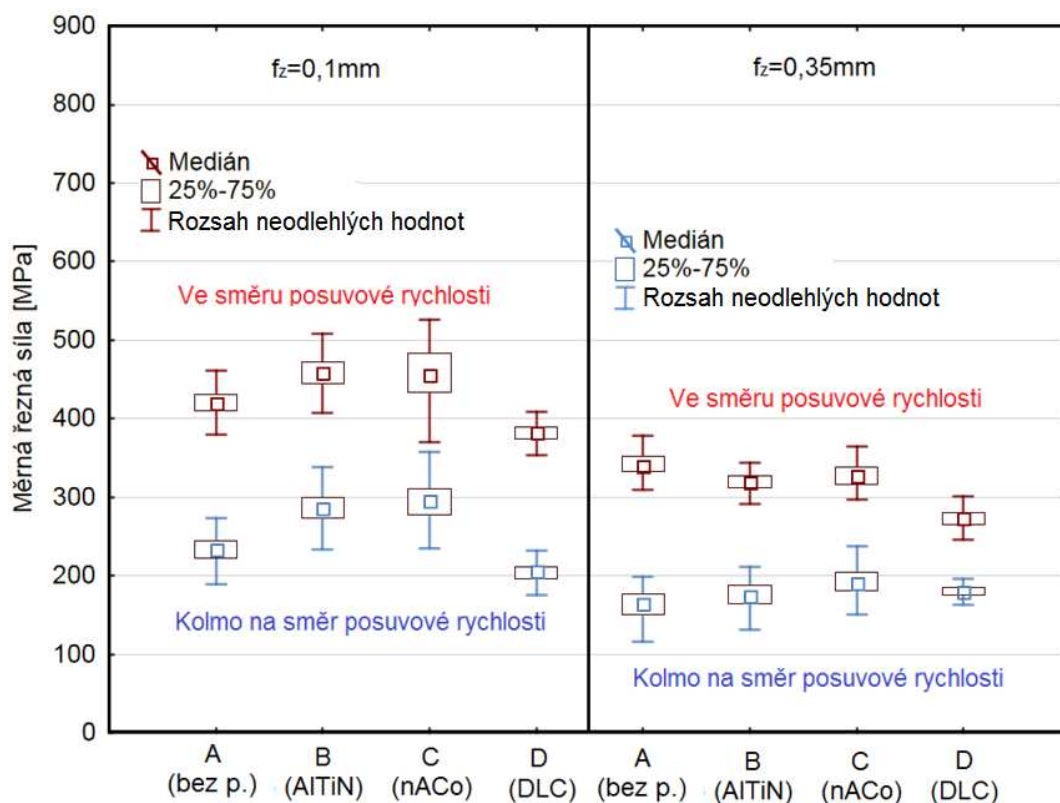
Vypočtené hodnoty průřezů třísek a měrných řezných sil pro sklo-polyesterový kompozit jsou uvedeny v tab. 8.16 a pro uhlíko-epoxidový kompozit v tab. 8.17. Porovnání měrných řezných sil při zvolených hodnotách posuvu jsou zobrazeny na obr. 8.29 (sklo-polyester) a 8.30 (uhlíko-epoxid). Testování v kapitole 8.5 probíhalo pouze s nástroji A, B a C. Hodnoty  $k_c$  pro nástroj D (SK s povlakem na bázi DLC) byly převzaty z kapitoly 8.3 (Vývoj měrných řezných sil při změně řezných podmínek), jednalo se vždy o hraniční hodnoty měnících se řezných podmínek.

Tab. 8.16 Vypočtené hodnoty měrných řezných sil sklo-polyesterového kompozitu.

Směr orientace vláken	Posuv na zub [mm]	Nástroj A		Nástroj B		Nástroj C		Nástroj D	
		$A_D$ [mm <sup>2</sup> ]	$k_c$ [MPa]	$A_D$ [mm <sup>2</sup> ]	$k_c$ [MPa]	$A_D$ [mm <sup>2</sup> ]	$k_c$ [MPa]	$A_D$ [mm <sup>2</sup> ]	$k_c$ [MPa]
Ve směru posuvové rychlosti	0,10	0,310	420	0,310	460	0,310	456	0,523	375
	0,35	1,446	340	1,446	318	1,446	327	1,868	268
Kolmo na směr posuvové rychlosti	0,10	0,310	233	0,310	286	0,310	295	0,523	204
	0,35	1,446	164	1,446	174	1,446	191	1,868	177

Zvýšení hodnoty posuvu způsobilo při obrábění sklo-polyesterového kompozitu u všech testovaných nástrojů pokles hodnot měrných řezných sil. Hodnoty, o které poklesly velikosti  $k_c$ , byly při změně posuvu rozdílné pro každý nástroj. Pokles byl zaznamenán jak při obrábění s úhlem nastavení vláken  $0^\circ$  (vlákna jsou orientována ve směru posuvové rychlosti – průměrný pokles o 114 MPa), tak i při nastavení vláken s úhlem  $90^\circ$  (vlákna jsou orientována kolmo na směr posuvové rychlosti – průměrný pokles o 78 MPa). Je možné konstatovat, že se zvýšení hodnoty posuvu projevilo snížením rozsahů neodlehých hodnot u všech testovaných nástrojů.

Nejvyšší hodnoty  $k_c$  byly naměřeny při obrábění s úhlem vláken  $0^\circ$  ( $f_z=0,1$  mm) u nástrojů B ( $k_{cb}=460$  MPa) a C ( $k_{cc}=456$  MPa), nejnižší hodnota  $k_c$  byla sledována u nástroje D ( $k_{cD}=375$  MPa). Rozdíl měrných řezných sil při obrábění s nástrojem B a D činil 85 MPa. Po zvýšení hodnoty posuvu na  $f_z=0,35$  mm, byl zaznamenán nejvýznamnější pokles  $k_c$  u nástroje B (pokles o 142 MPa). Při takto nastaveném posuvu byly nejvyšší hodnoty měrné řezné síly tentokrát zaznamenány u nástroje A ( $k_{cA}=340$  MPa), naopak nejnižší byly naměřeny opět pro nástroj D ( $k_{cD}=268$  MPa).



Obr. 8.29 Porovnání měrných řezných sil při obrábění sklo-polyesterového kompozitu.

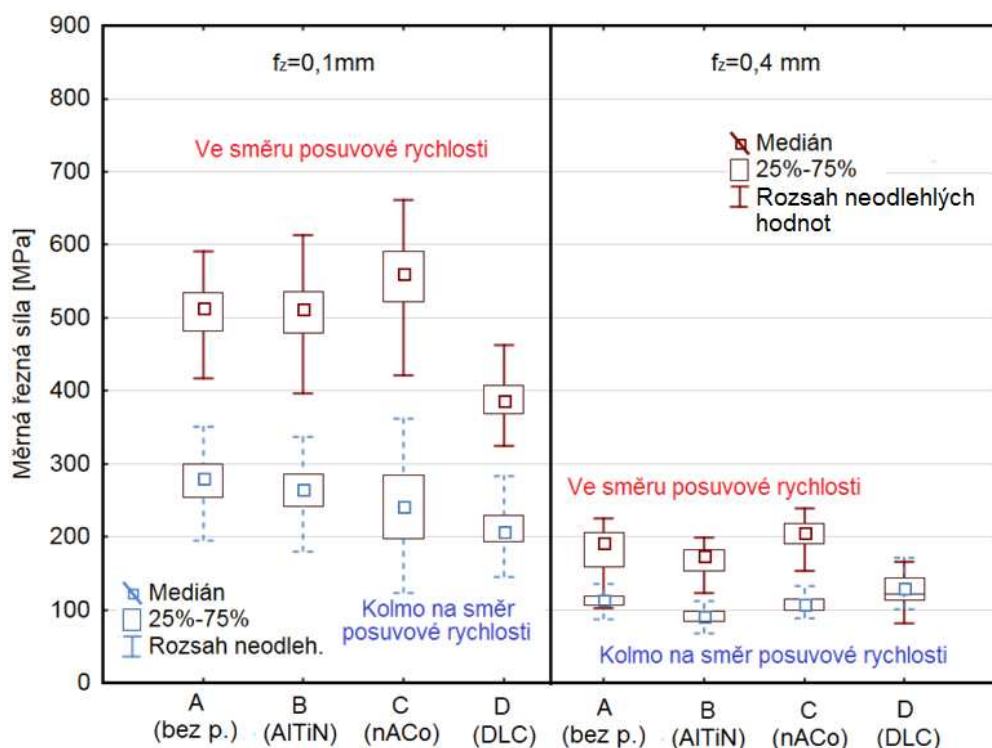
Odlíšná situace nastala při obrábění s úhlem nastavení vláken  $90^\circ$  a hodnotou posuvu  $f_z=0,35\text{ mm}$ . Při tomto měření byla nejvyšší hodnoty  $k_c$  naměřena u nástroje C ( $k_{cC}=191\text{ MPa}$ ) a nejnižší u nástroje A ( $k_{cA}=164\text{ MPa}$ ). Tento výsledek je odlišný od předcházejících měření.

Další měření  $k_c$  probíhalo při obrábění uhlíko-epoxidového kompozitu, opět byla nastavena orientace vláken  $0^\circ$  a  $90^\circ$ . Změny v nastavení řezných podmínek oproti předchozímu měření spočívaly v jiné hodnotě šířky záběru ostří  $a_p=1,4\text{ mm}$  (tloušťka lamely) a maximální hodnotě posuvu  $f_z=0,40\text{ mm}$ .

Tab. 8.17 Vypočtené hodnoty měrných řezných sil uhlíko-epoxidového kompozitu.

Směr orientace vláken	Posuv na zub [mm]	Nástroj A		Nástroj B		Nástroj C		Nástroj D	
		$A_D$ [mm <sup>2</sup> ]	$k_c$ [MPa]	$A_D$ [mm <sup>2</sup> ]	$k_c$ [MPa]	$A_D$ [mm <sup>2</sup> ]	$k_c$ [MPa]	$A_D$ [mm <sup>2</sup> ]	$k_c$ [MPa]
Kolmo na směr posuvové rychlosti	0,10	0,08	513	0,08	512	0,08	560	0,149	388
	0,40	0,477	192	0,477	174	0,477	206	0,598	141
Kolmo na směr posuvové rychlosti	0,10	0,08	280	0,08	264	0,08	242	0,149	230
	0,40	1,446	113	0,477	92	0,477	107	0,598	149

V tomto případě byl oproti obrábění sklo-polyesterového kompozitu výraznější rozdíl v poklesu hodnot  $k_c$  se zvýšením hodnoty posuvu. Průměrně poklesly hodnoty měrných řezných sil o 414 MPa (pro nastavení vláken pod úhlem 0°) a o 139 MPa (pro směr nastavení vláken pod úhlem 90°). Při zvýšení posuvu došlo opět ke zmenšení rozsahů neodlehých hodnot, tentokrát byl oproti obrábění sklo-polyesterového kompozitu pokles výraznější (až dvojnásobě).



Obr. 8.30 Porovnání měrných řezných sil při obrábění uhlíko-epoxidového kompozitu.

Ze srovnání hodnot  $k_c$  při obrábění s testovanými nástroji je patrné, že při obrábění s orientací vláken ve směru posuvové rychlosti dosahuje nejvyšších hodnot  $k_c$  opět

nástroj C ( $k_{cf01}=560$  MPa a  $k_{cf04}=206$  MPa) a nejnižších nástroj D. ( $k_{cf01}=388$  MPa a  $k_{cf04}=141$  MPa). Při obrábění s úhlem nastavení vláken  $90^\circ$  byly zjištěny nejvyšší hodnoty  $k_c$  při obrábění s nástrojem A ( $k_{cf01}=280$  MPa) při posuvu  $f_z=0,1$  mm a s nástrojem D ( $k_{cf04}=149$  MPa) při posuvu  $f_z=0,4$  mm. Naopak nejnižší hodnoty byly zaznamenány s nástroji D ( $k_{cf01}=230$  MPa) při posuvu  $f_z=0,1$  mm a B ( $k_{cf04}=92$  MPa) při posuvu  $f_z=0,4$  mm.

Z celkového srovnání velikostí měrných řezných sil zjištěných při obrábění s vybranými nástroji vyplývá, že nejvyšší hodnoty  $k_c$  byly zaznamenány pro nástroj C (SK s povlakem nACo) a naopak nejnižší pro nástroj D (SK s povlakem DLC).

### 8.5.2 Porovnání $k_c$ při změně šířky záběru ostří

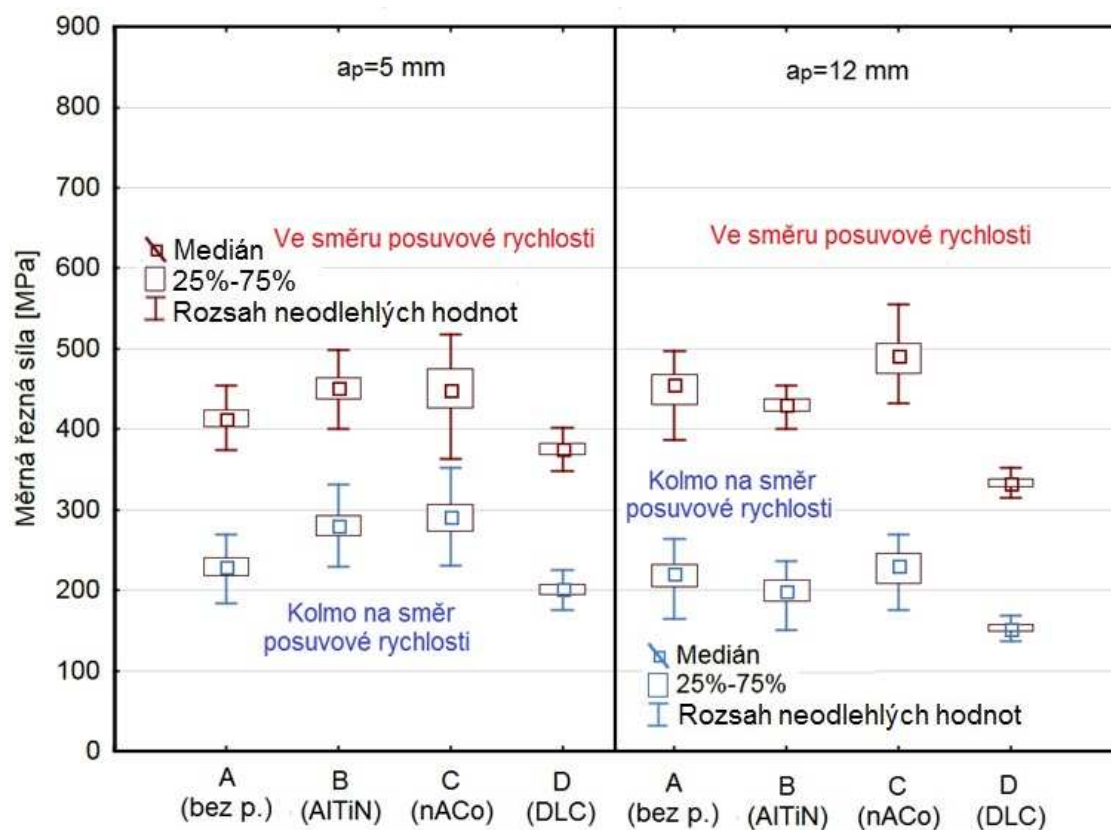
Další porovnávání hodnot měrných řezných sil získaných při obrábění s testovanými nástroji probíhalo pro dvě různé hodnoty šířky záběru ostří  $a_p=5$  mm a  $a_p=12$  mm (odpovídá tloušťce profilu testovaného kompozitního materiálu). Se zvyšováním velikosti  $a_p$  docházelo i ke změnám ve velikostech měrných řezných sil. Podrobně je průběh  $k_c$  se změnou  $a_p$  popsán v kapitole 8.3.2 (Změna šířky záběru ostří). Hodnoty průřezů třísek a měrných řezných sil jsou uvedeny v tabulce. 8.18. Řezné podmínky, které byly v průběhu tohoto testování konstantní, byly nastaveny:

- posuv na zub  $f_z=0,1$  mm,
- otáčky  $n=2000$  ot/min ( $v_c=62,83$  m/min),
- pracovní záběr ostří  $a_e=10$  mm.

Při zvýšení hodnoty  $a_p$  došlo ve většině případů k poklesu měrných řezných sil, pouze ve dvou případech došlo k jejich růstu. Na obr. 8.31 jsou zobrazeny hodnoty měrných řezných sil pro testované nástroje.

Tab. 8.18 Vypočtené hodnoty měrných řezných sil sklo-polyesterového kompozitu.

Směr vláken	Šířka záběru ostří $a_p$ [mm]	Nástroj A		Nástroj B		Nástroj C		Nástroj D	
		$A_D$ [mm <sup>2</sup> ]	$k_c$ [MPa]	$A_D$ [mm <sup>2</sup> ]	$k_c$ [MPa]	$A_D$ [mm <sup>2</sup> ]	$k_c$ [MPa]	$A_D$ [mm <sup>2</sup> ]	$k_c$ [MPa]
Ve směru posuvové rychlosti	5	0,310	413	0,310	452	0,310	449	0,523	366
	12	0,712	456	0,712	431	0,712	491	1,227	333
Kolmo na směr posuvové rychlosti	5	0,310	230	0,310	280	0,310	292	0,523	201
	12	0,712	221	0,712	199	0,712	231	1,227	153



Obr. 8.31 Porovnání měrných řezných sil při obrábění sklo-polyesterového kompozitu.

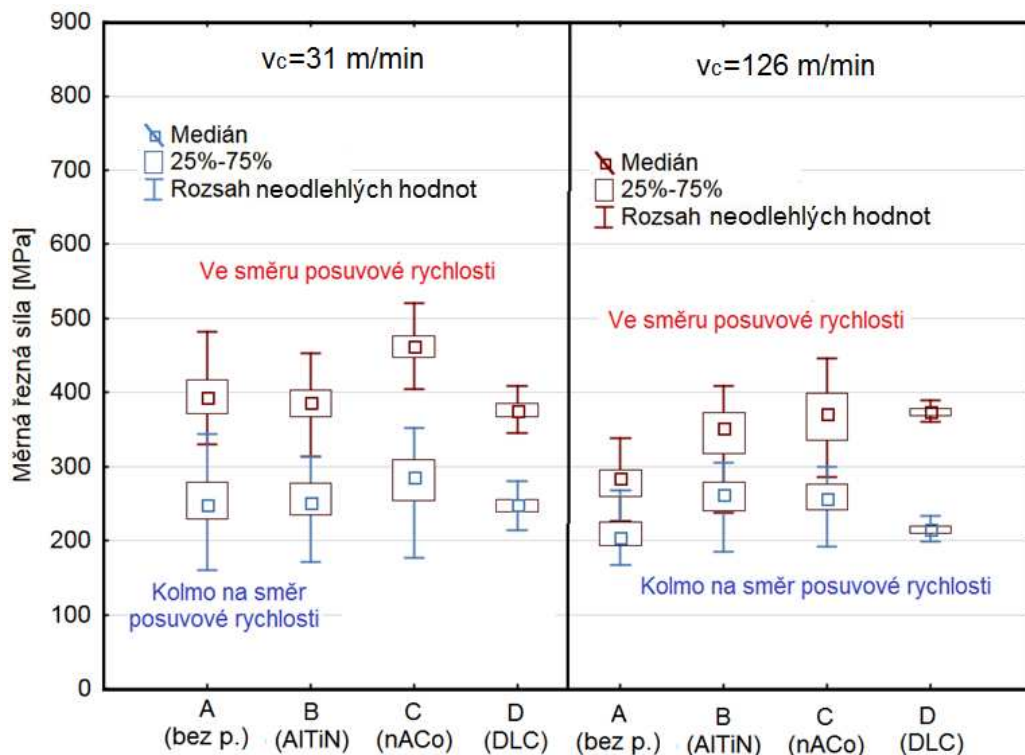
Velikosti měrných řezných sil byly opět vyšší pro případ obrábění s úhlem nastavení vláken  $0^\circ$  (cca o 160 MPa). Porovnání získaných hodnot  $k_c$  ukazuje, že nejvyšších hodnot měrných řezných sil dosahuje ve všech případech nástroj C. Stejně tak nejnižších hodnot dosahuje ve všech případech nástroj D. Rozdíl ve velikosti  $k_c$  nástrojů C a D činil 83 MPa při obrábění s nastavením vláken pod úhlem  $0^\circ$  a 91 MPa pro obrábění s nastavením vláken pod úhlem  $90^\circ$ . Pokles velikosti  $k_c$  s růstem šířky záběru ostří se u testovaných nástrojů pohybuje pouze v rozmezí 9–61 MPa.

### 8.5.3 Porovnání $k_c$ při změně řezné rychlosti

Poslední testování, které mělo za cíl porovnat velikosti měrných řezných sil při obrábění s různými nástroji, proběhlo pro dvojice hodnoty řezné rychlosti 31 m/min a 126 m/min (1000 ot/min a 4000 ot/min). Podrobně je průběh  $k_c$  se změnou řezné rychlosti v kapitole 8.3.3 (Změna řezné rychlosti). Obráběny byly oba testované kompozitní materiály s úhlem nastavení vláken  $0^\circ$  a  $90^\circ$ . Další řezné podmínky, které byly v průběhu tohoto testování konstantní, byly nastaveny:

- posuv na zub  $f_z = 0,1 \text{ mm}$ ,
- šířka záběru ostří  $a_p = 5 \text{ mm}$  (sklo/polyester) a  $a_p = 1,4 \text{ mm}$  (uhlíko-epoxid),
- pracovní záběr ostří  $a_e = 10 \text{ mm}$ .

Zvýšení řezné rychlosti se projevilo při testování obou kompozitních materiálů mírným snížením velikostí měrných řezných sil. V obou případech byly naměřeny vyšší hodnoty  $k_c$  pro frézování s úhlem  $0^\circ$  (nastavení vláken ve směru posuvové rychlosti). Vypočtené hodnoty měrných řezných sil a průřezů třísek jsou uvedeny v tabulkách 8.19 (sklo-polyester) a 8.20 (uhlíko-epoxid). Grafické znázornění naměřených hodnot měrných řezných sil je zobrazeno na obr. 8.32 (sklo-polyesterový kompozitní materiál) a 8.33 (uhlíko-epoxidový kompozitní materiál).



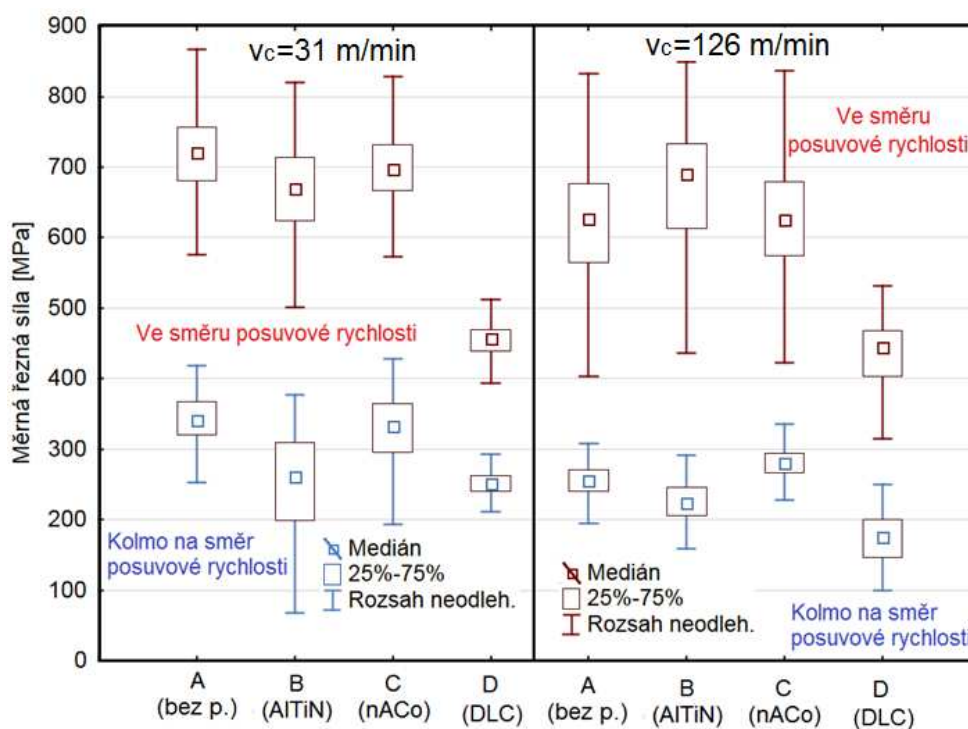
Obr. 8.32 Porovnání měrných řezných sil při obrábění sklo-polyesterového kompozitu.

Při obrábění sklo-polyesterového kompozitu byly při nastavení  $v_c=31$  m/min zaznamenány nejvyšší hodnoty  $k_c$  při obrábění s nástrojem C (pro oba případy nastavení vláken). Při zvýšení řezné rychlosti byly nejvyšší hodnoty  $k_c$  zjištěny pro nástroj C (úhel vláken  $0^\circ$ ) a nástroj B (úhel vláken  $90^\circ$ ). Při nastavení vláken kolmo na směr posuvové rychlosti byla hodnota  $k_c$  u nástroje B vyšší pouze o 4 MPa než u nástroje C, lze tedy konstatovat, že nejvyšší měrné řezné síly působí v tomto případě na nástroj C. Naopak nejnižších hodnot  $k_c$  dosahovaly střídavě nástroje A a D. Při nastavení řezné rychlosti na  $v_c=126$  m/min se u nástrojů A, B a C rozsahy neodlehých hodnot částečně překrývaly.

Tab. 8.19 Vypočtené hodnoty měrných řezných sil sklo-polyesterového kompozitu.

Směr vláken	Otáčky [ot/min]	Nástroj A		Nástroj B		Nástroj C		Nástroj D	
		$A_D$ [mm <sup>2</sup> ]	$k_c$ [MPa]	$A_D$ [mm <sup>2</sup> ]	$k_c$ [MPa]	$A_D$ [mm <sup>2</sup> ]	$k_c$ [MPa]	$A_D$ [mm <sup>2</sup> ]	$k_c$ [MPa]
Ve směru posuvové rychlosti	1000	0,310	394	0,310	386	0,310	463	0,523	369
	4000	0,310	285	0,310	351	0,310	371	0,523	363
Kolmo na směr posuvové rychlosti	1000	0,310	249	0,310	251	0,310	285	0,523	244
	4000	0,310	204	0,310	262	0,310	258	0,523	208

Při obrábění uhlíko-epoxidového kompozitu byly v porovnání se sklo-polyesterovým kompozitem vypočteny vyšší hodnoty měrných řezných sil. Pro případ nastavení vláken 0° byl největší rozdíl ve velikosti  $k_c$  až 326 MPa, při nastavení vláken s úhlem 90° byl nejvyšší rozdíl 92 MPa (v obou případech u nástroje A).



Obr. 8.33 Porovnání měrných řezných sil při obrábění uhlíko-epoxidového kompozitu.

Nejvyšších hodnot  $k_c$  dosahoval při testování uhlíko-epoxidového kompozitu při řezné rychlosti  $v_c=31$  m/min nástroj A (pro oba případy nastavení vláken). Při zvýšení řezné rychlosti na  $v_c=126$  m/min byla situace odlišná, nejvyšší hodnoty  $k_c$  byly naměřeny pro nástroj B (uhel nastavení vláken  $0^\circ$ ) a C (uhel nastavení vláken  $90^\circ$ ). Nejnižší hodnoty měrných řezných sil byly ve všech případech naměřeny pro nástroj D.

Porovnáním nástrojů při obrábění obou kompozitních materiálů za daných řezných podmínek lze konstatovat, že nejlepších výsledků  $k_c$  bylo dosaženo při obrábění s nástrojem D (SK s povlakem DLC). Naopak nejhorších výsledků dosahoval nástroj C (SK s povlakem nACo).

Tab. 8.20 Vypočtené hodnoty měrných řezných sil uhlíko-epoxidového kompozitu.

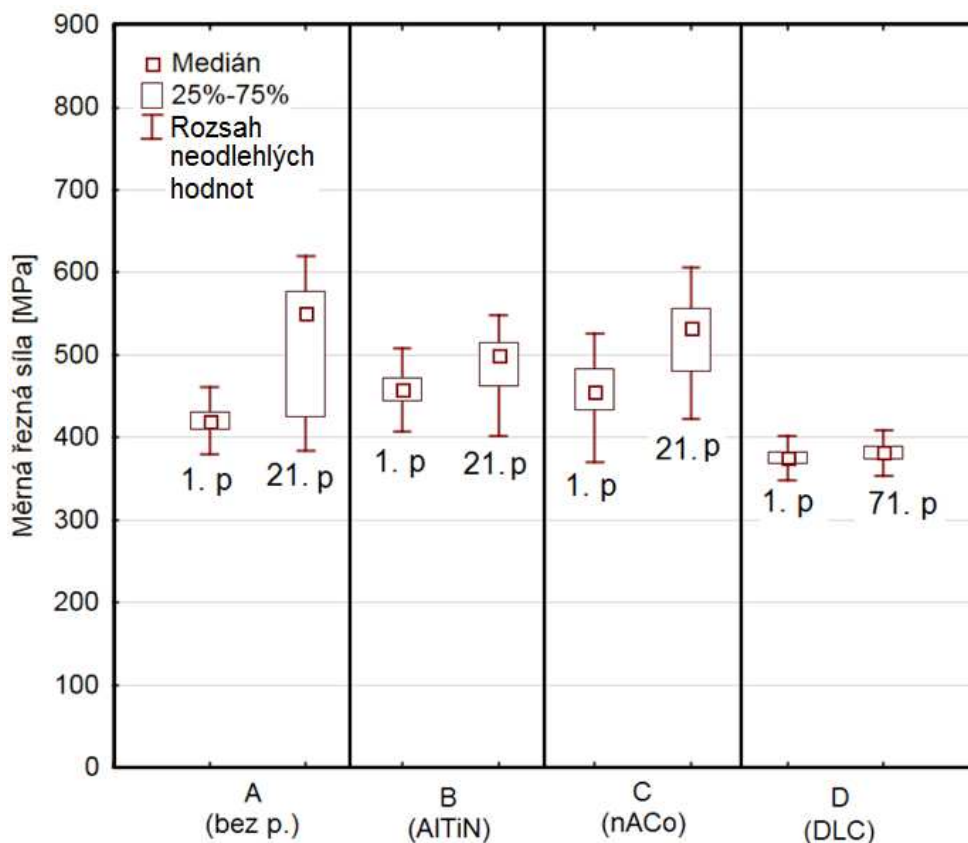
Směr vláken	Otáčky [ot/min]	Nástroj A		Nástroj B		Nástroj C		Nástroj D	
		$A_D$ [mm <sup>2</sup> ]	$k_c$ [MPa]	$A_D$ [mm <sup>2</sup> ]	$k_c$ [MPa]	$A_D$ [mm <sup>2</sup> ]	$k_c$ [MPa]	$A_D$ [mm <sup>2</sup> ]	$k_c$ [MPa]
Ve směru posuvové rychlosti	1000	0,08	720	0,08	670	0,08	698	0,149	429
	4000	0,08	626	0,08	690	0,08	625	0,149	477
Kolmo na směr posuvové rychlosti	1000	0,08	341	0,08	261	0,08	332	0,149	256
	4000	0,08	256	0,08	224	0,08	280	0,149	175

### 8.5.4 Kontrolní měření

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 měrných řezných sil. Při tomto měření byly nastaveny stejné řezné podmínky jako při prvním průjezdu materiálem (kapitola 8.5.1) testovanými nástroji. Kontrolní měření nástroje D bylo provedeno již v kapitole 8.3.4, pro celkové porovnání všech nástrojů byla použita data získaná z tohoto měření. Kontrolní měření probíhalo při obrábění sklo-polyesterového kompozitu s úhlem nastavení vláken  $0^\circ$  (směr vláken ve směru posuvové rychlosti), řezné podmínky byly nastavené pro kontrolní měření nástrojů A, B a C následující:

- šířka záběru ostří  $a_p=5$  mm,
- otáčky  $n=2000$  ot/min ( $v_c=62,83$  m/min),
- posuv na zub  $f_z=0,1$  mm
- pracovní záběr ostří  $a_e=10$  mm.

Cílem měření bylo zjistit, zda nedošlo k růstu silového zatížení (vypočtených měrných řezných sil) v průběhu testování vlivem opotřebení použitých nástrojů. Změny v hodnotách  $k_c$  na začátku a na konci testování jsou uvedeny na obr. 8.34. Srovnání hřbetních opotřebení vybraných břitů testovaných fréz je zobrazeno na obr. 8.35.



Obr. 8.34 Porovnání měrných řezných sil při prvním a posledním (kontrolním) průjezdu materiálem.

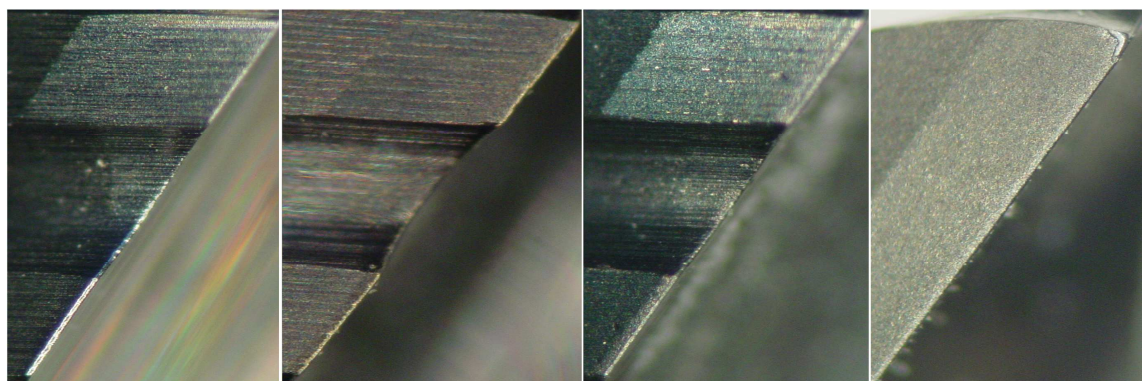
Z porovnání rozdílů měrných řezných sil je patrné, že u nástroje A (SK bez povlaku) došlo v průběhu testování k nejvyššímu nárůstu hodnot  $k_c$  (o 130 MPa) a zvýšení rozptylu neodlehých hodnot (o cca 300%). Nástroje B a C dosáhly zvýšení o 40 MPa a 77 MPa, přičemž rozptýl se, v porovnání s nástrojem A, výrazněji nezměnil. Všechny hodnoty  $k_c$  jsou uvedeny v tab. 8.21.

Nejlepšího výsledku dosáhl dle očekávání nástroj D (SK s povlakem z DLC). S tímto nástrojem bylo provedeno o 50 průjezdů materiálem více a přes to u něj došlo k nejnižšímu nárůstu měrné řezné síly (7 MPa).

Tab. 8.21 Porovnání měrných řezných sil prvního a kontrolního průjezdu.

Nástroj	$k_c$ při prvním průjezdu [MPa]	$k_c$ při kontrolním průjezdu [MPa]	Rozdíl měrných řezných sil [MPa]
A – SK bez povlaku	420	550	130
B – SK s AlTiN	460	500	40
C – SK s nACo	456	533	77
D – SK s DLC	375	382	7

U všech testovaných nástrojů nebylo na první pohled patrné výraznější opotřebení, pouze u nástroje D došlo k poškození špicí ostří (viz obr. 8.15 a 8.16). Po prozkoumání nástrojů pomocí dílenského mikroskopu byly odměřeny hodnoty VB opotřebení jednotlivých břitů testovaných nástrojů. Ve všech případech nepřesáhlo hrubební opotřebení břitů nástrojů hodnotu  $VB=0,03$  mm.



SK - bez povlaku

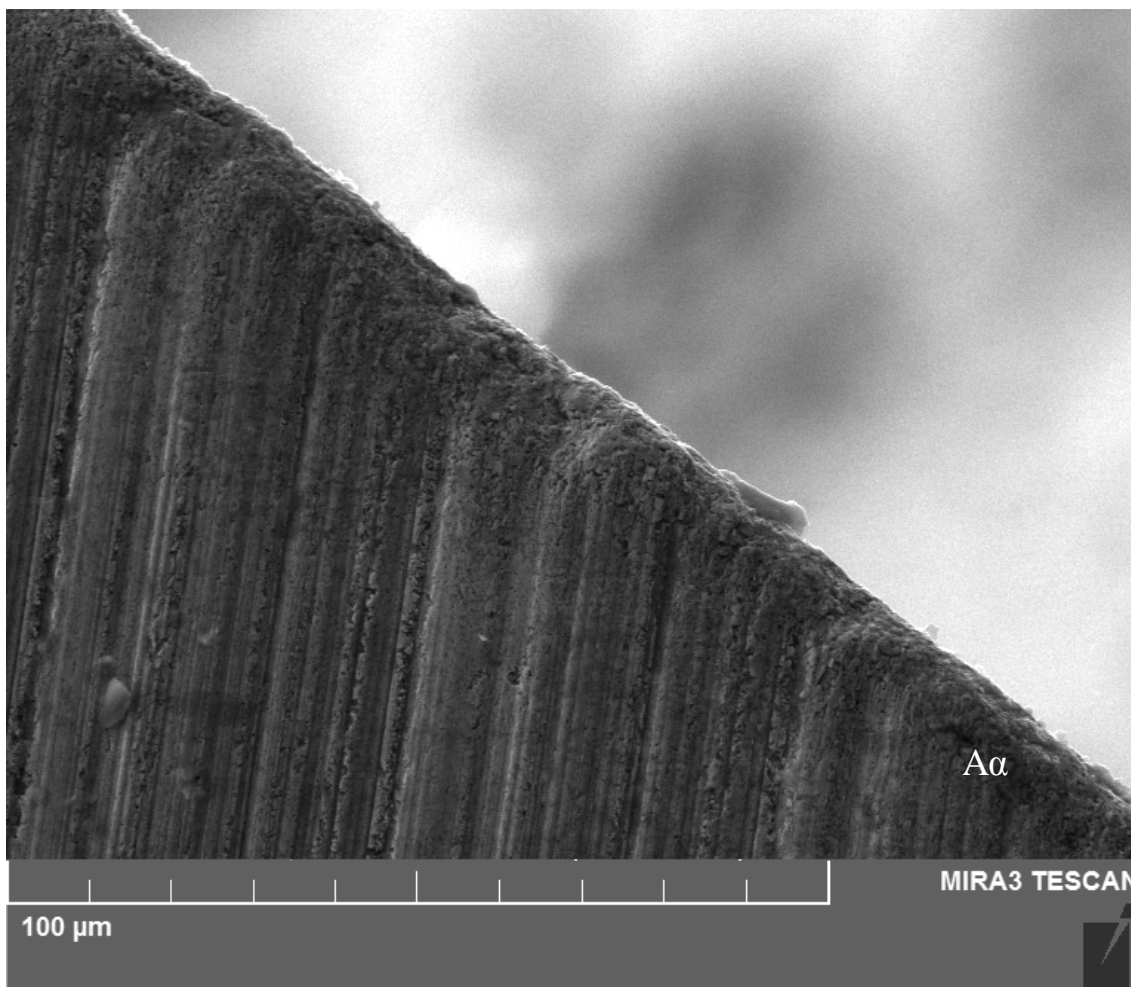
SK - AlTiN

SK - nACo

SK - DLC

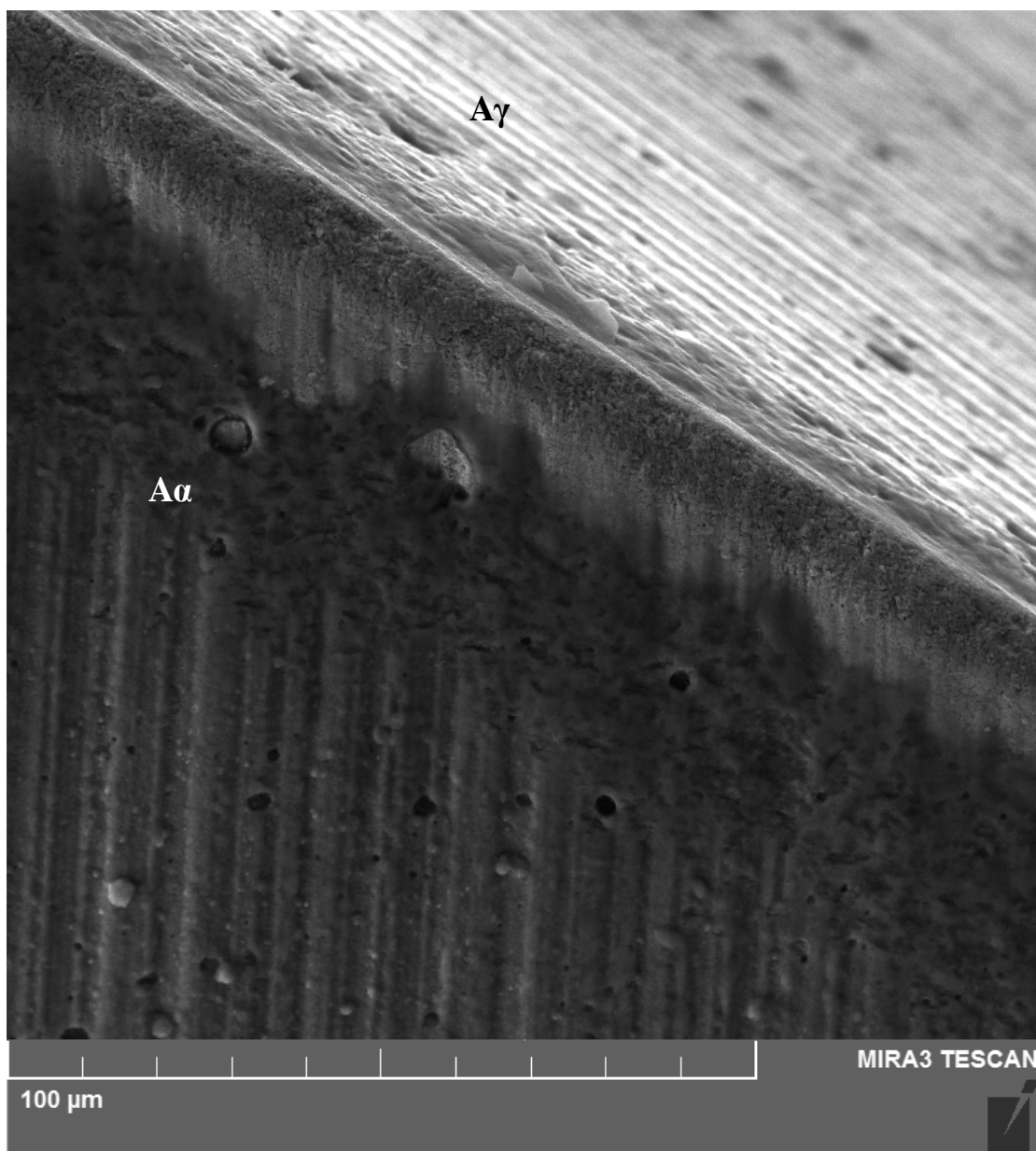
Obr. 8.35 VB opotřebení nástrojů po kontrolním měření.

Podrobnější prozkoumání testovaných frézovacích nástrojů bylo provedeno na elektronovém mikroskopu ve firmě Tescan s. r. o., detaily břitů nástrojů jsou zobrazeny na obr. 8.36–8.39.



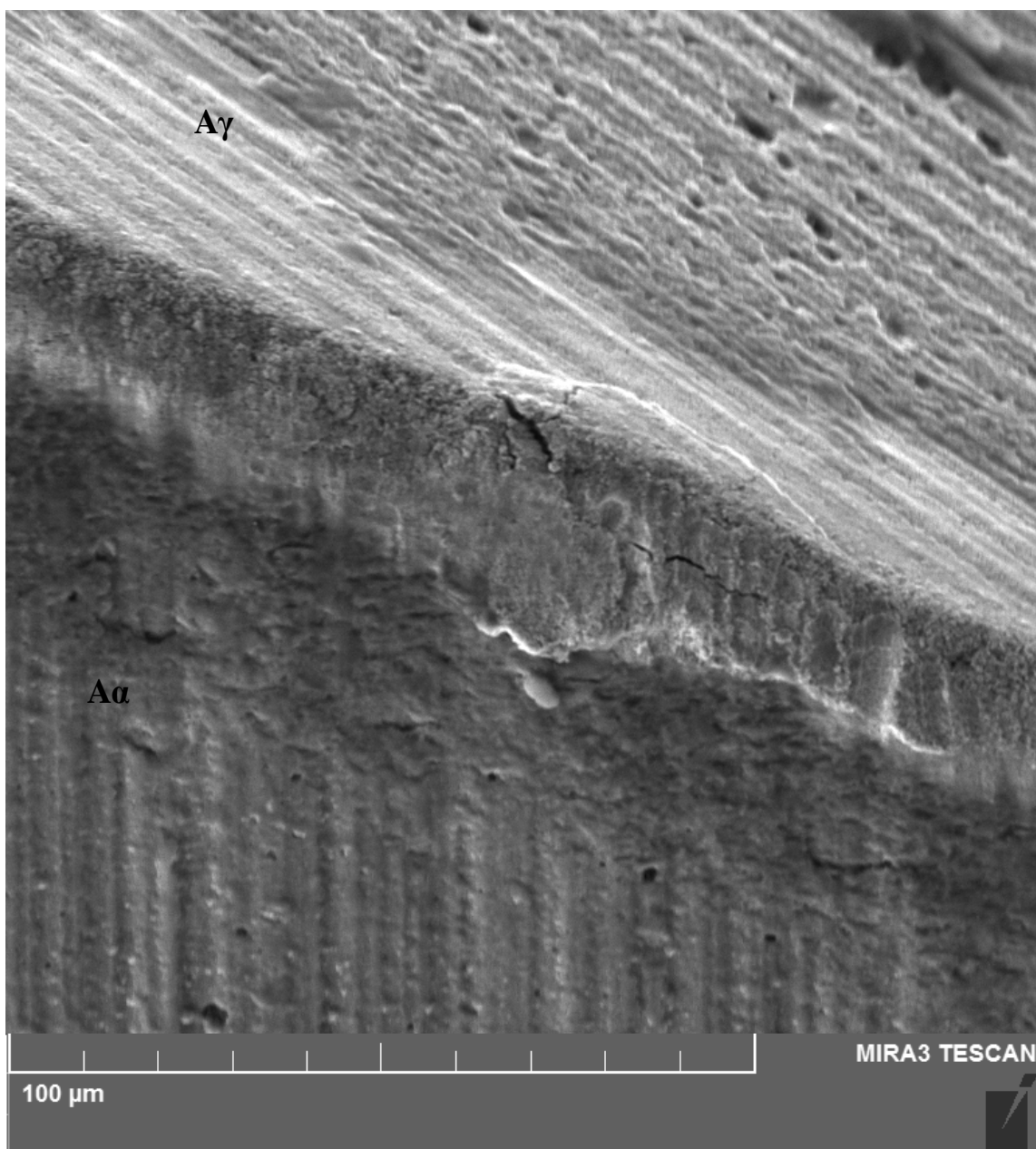
Obr. 8.36 Povrch nástroje ze SK bez povlaku.

Na nástroji A bylo po přiblížení patrné abrazivní opotřebení nástroje, které koresponduje s výrazným nárůstem hodnot měrných řezných sil (130 MPa) v porovnání s ostatními nástroji.



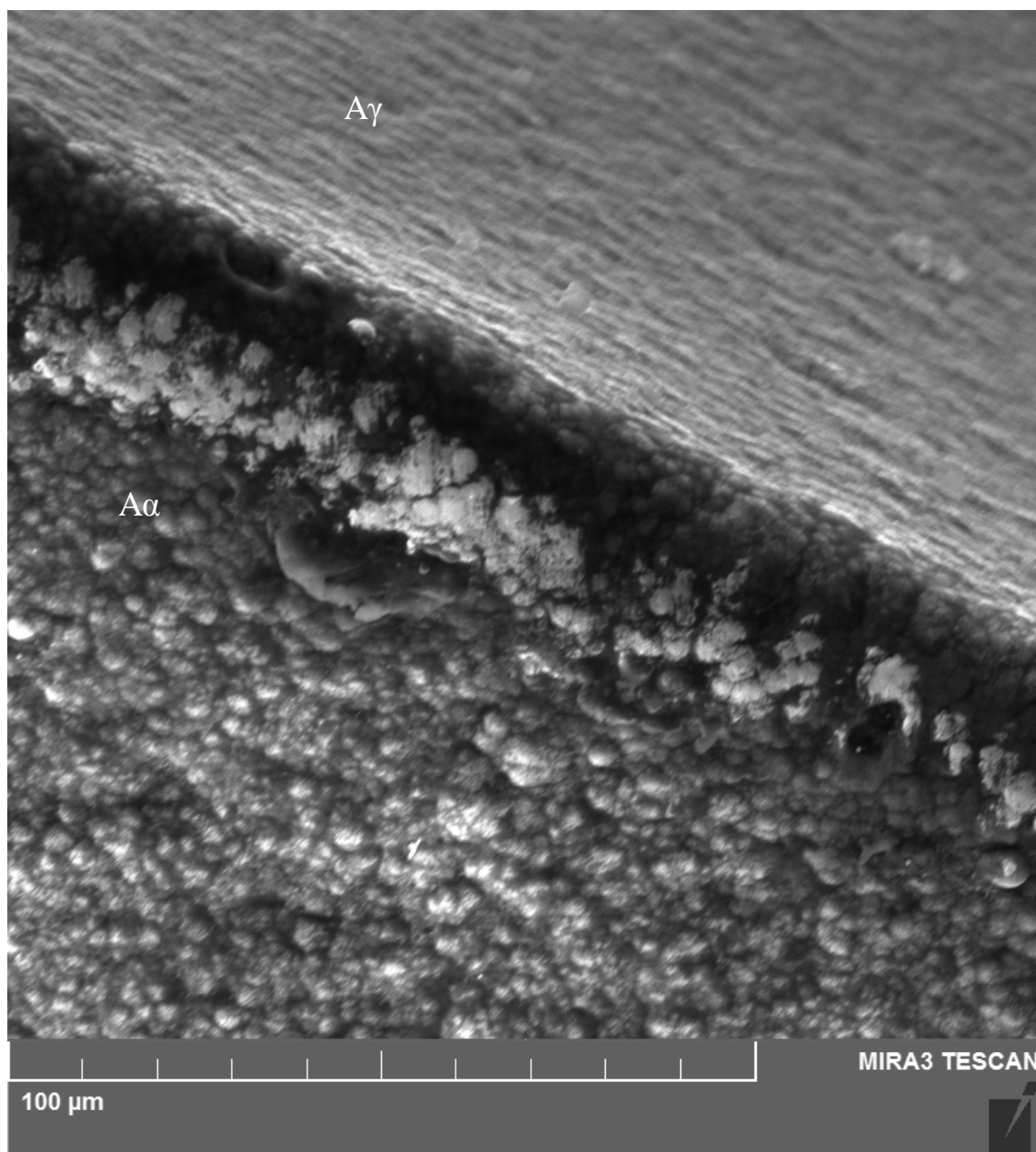
Obr. 8.37 Povrch nástroje ze SK s povlakem AlTiN.

U nástroje B byl patrný úbytek povlaku z oblasti ostří nástroje. Nárůst hodnoty měrné řezné síly při kontrolním obrábění byl méně výrazný oproti nástroji bez povlaku (pouze 40 MPa). Na rozhraní mezi nástrojovým materiálem a vrstvou povlaku je patrná cca 20 μm tlustá přechodová plocha, na které jsou viditelné lokální poruchy povlaku.



Obr. 8.38 Povrch nástroje ze SK s povlakem nACo.

Stejně jako v předchozím případě byl i u nástroje C zaznamenán úbytek povlaku v oblasti ostří nástroje. Na rozdíl od nástroje B je zde patrné poškození části bříty v místě, kde došlo k otěru vrstvy povlaku. Nárůst velikosti měrné řezné síly při kontrolním měření byl nejvyšší (77 MPa) v porovnání s ostatními povlakovanými nástroji.



Obr. 8.39 Povrch nástroje ze SK s povlakem DCL.

U nástroje D došlo v průběhu testování pouze k opotřebení na špicích ostří (viz obr. 8.19 a 8.20). Hřbetní opotřebení a úbytek povlaku byly na celé délce ostří minimální, jak je vidět na obr. 8.39, na kterém je znázorněn vybraný úsek ostří nástroje. V porovnání s ostatními povlakovanými nástroji bylo dle očekávání opotřebení povlaku i nárůst měrných řezných sil nejnižší (7 MPa).

### 8.5.5 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 nestejnou 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 nestejnou strukturou obráběného materiálu.

## 9. Vztah měrná řezná síla – dominantní frekvence obráběcího procesu

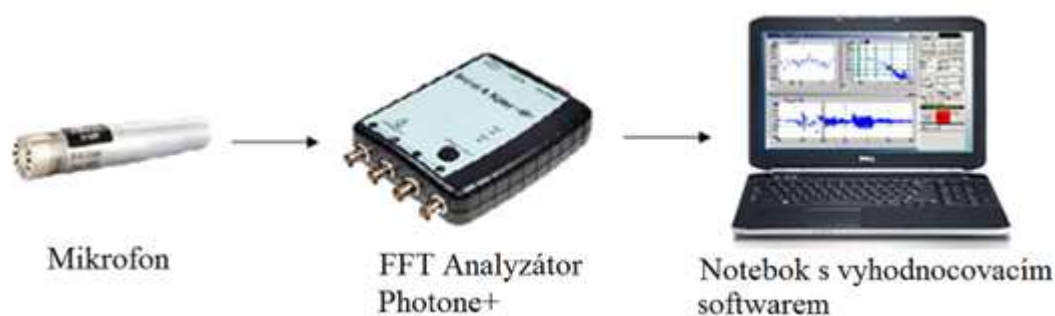
Doprovodným jevem obráběcího procesu je mimo jiné i zvuk o různých frekvencích a intenzitách, ten je závislý nejen na nastavených řezných podmínkách, ale i na stabilitě obráběcího procesu a stavu opotřebení řezného nástroje. Nestabilní obrábění je z pravidla doprovázeno zvukem o jedné dominantní frekvenci (DF), jejíž kmitočet se v průběhu obrábění nemění (viz obr. 9.13). Oproti tomu kmitočet DF zvuku vydávaného opotřebovaným nástrojem (viz obr. 9.17) se s rostoucím opotřebováním průběžně mění.

Cílem této kapitoly bylo mapování zvukových spekter 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 piezoelektrický dynamometr KISTLER, který je vybaven nábojovým zesilovačem. Pomocí naměřených dat bylo možné určit hodnoty řezné, normálové a pasivní složky síly. Právě z velikostí řezných sil se dále stanovovaly hodnoty měrných řezných sil.

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 opotřebovaným nástrojem.

Opotřebovaný nástroj vydává zvuk o vyšších frekvencích, přičemž s rostoucím opotřebováním se zvuk, a s ním i kmitočet a intenzita DF, neustále mění. Cílem tohoto měření, bylo pokusit se nalézt korelaci mezi DF a opotřebováním nástroje, které přímo souvisí s velikostí měrné řezné síly.



Obr. 9.1 Schéma zapojení aparatury pro měření zvukového spektra.

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, dosáhl-li nástroj této úrovně opotřebení, bylo s ním testování ukončeno.

## 9.1 Referenční měření pro ocel 15 260.7

Pro obrábění byla opět použita konzolová frézka FV 25 CNC s řídicím systémem Heidenhain 315 iTNC. V průběhu obrábění nebylo použito vnější chlazení.



Obr. 9.2 Frézka FV 25 CNC a průběh experimentu.

### 9.1.1 Popis materiálu

Jedná se o konstrukční ocel 15 260.7 (~DIN 50CrV4). Tento materiál je vhodný pro velmi namáhané strojní součásti silničních motorových vozidel např. čepy, pružiny, hřídele, vřetena, poloosy a pístnice [87]. Rozměry výchozího polotovaru 200x920x30 mm.

Tab. 9.1 Chemické složení – ocel 15 260.7 [87].

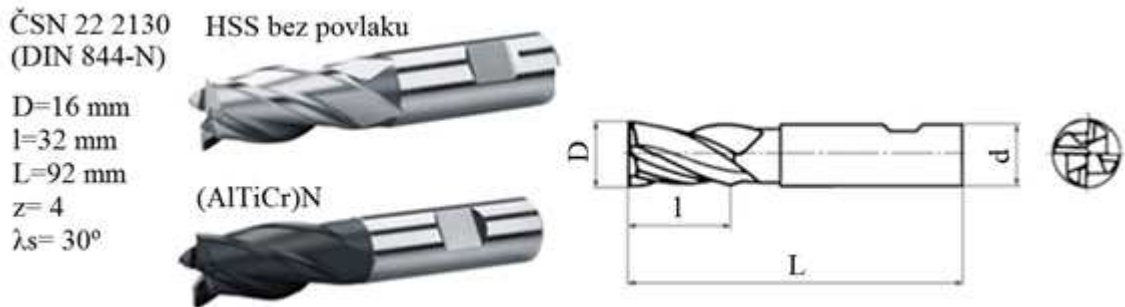
C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	V
0,47	0,66	0,15	max.	max.	0,85	max.	0,08
–	–	–	0,04	0,035	–	0,30	–
0,55	1,15	0,43			1,25		0,27

Tab. 9.2 Mechanické vlastnosti – ocel 15 260.7 [87].

Re <sub>min.</sub> [MPa]	Rm [MPa]	A <sub>min.</sub> [%]	Z <sub>min.</sub> [%]	Kv [J]
800	1000 – 1200	10	45	30

### 9.1.2 Specifikace nástrojů použitých pro obrábění

Pro experimentální obrábění byly zvoleny čelní válcové frézy krátké s jedním zubem přes střed, průměr 16 mm se stopkou (DIN 844), z rychlořezné oceli. Bylo použito celkem šest nástrojů, přičemž tři nástroje byly nepovlakované a na třech byl nanesen povlak na bázi (Al,Ti,Cr)N.



Obr. 9.3 Frézovací nástroj z HSS bez povlaku a s povlakem (Al,Ti,Cr)N [86].

Počáteční řezné podmínky při testování oceli 15 260.7 byly stanoveny na hranici možností testovaných nástrojů, aby byly zajištěny nestabilní podmínky obrábění a mohl tak být navíc sledován i vliv opotřebení na stabilitu obráběcího procesu. Řezné podmínky nastavené v průběhu testování jsou uvedeny v tab. 9.4.

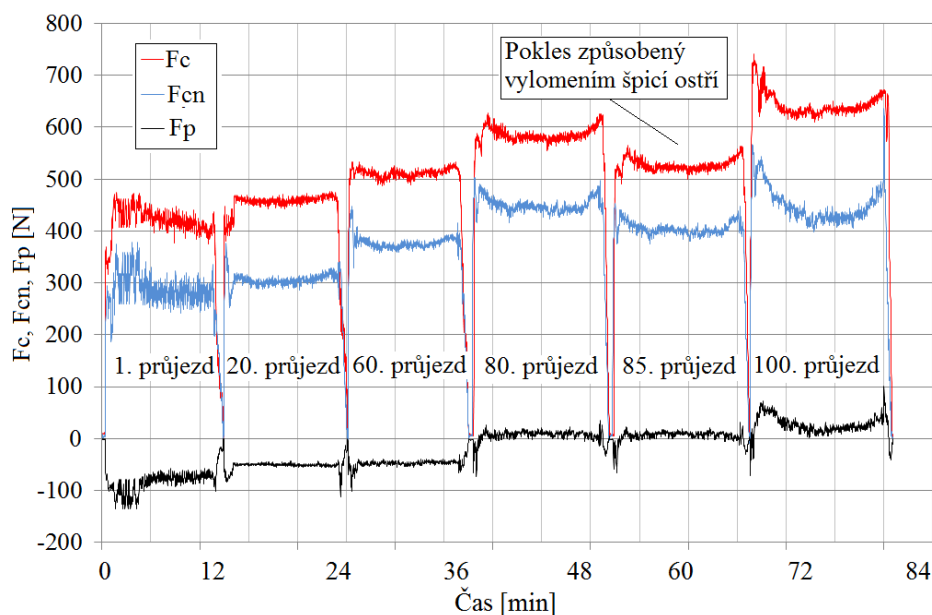
Dalším hlediskem pro volbu řezných podmínek byla životnost povlakované frézy, která při výchozím měření s řeznou rychlostí  $v_c=30$  m/min dosáhla stanovené hranice opotřebení ( $VB=0,2$  mm) až při stém průjezdu materiálem.

Tab. 9.4 Řezné podmínky při obrábění oceli 15 260.7.

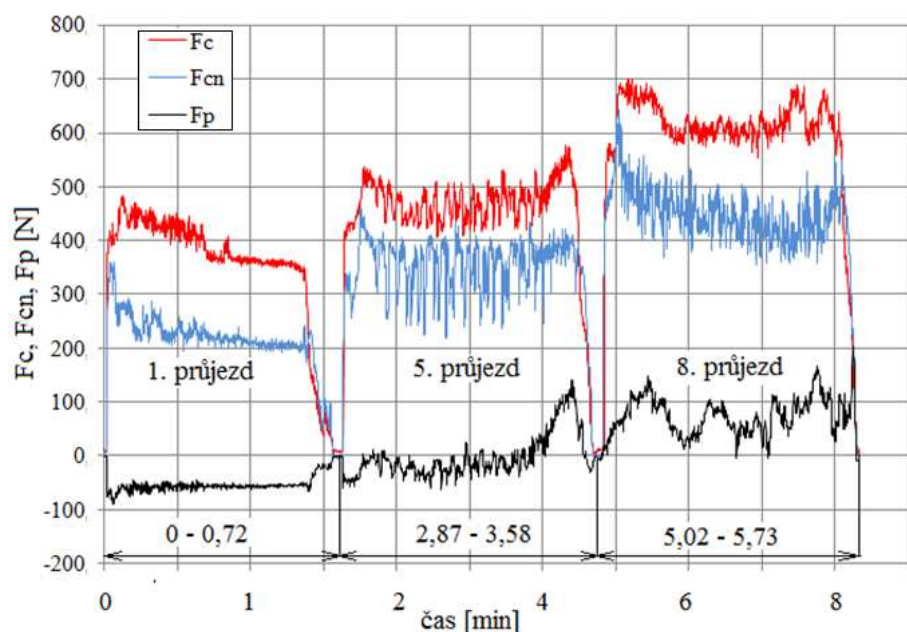
Materiál	Řezná rychlost $v_c$ [m/min]	Posuvová rychlost $v_f$ [mm/min]	Posuv na zub $f_z$ [mm]	Radiální šířka záběru ostří $a_e$ [mm]	Axiální šířka záběru ostří $a_p$ [mm]	Průměr nástroje D [mm]
Ocel 15 260	30	120	0,05	16	2	16
	35	140				
	40	160				

### 9.1.3 Měření silového zatížení – měrné řezné síly

V průběhu testování bylo provedeno měření jednotlivých složek celkové síly pro každý pátý průjezd u povlakovaného nástroje a pro každý jednotlivý průjezd u nástroje nepovlakovaného (viz obr. 9.4 a 9.5). Tato četnost měření byla volena s ohledem na předpokládanou životnost nástrojů. Ze silových průběhů je patrný postupný nárůst všech silových složek, způsobený postupným opotřebením nástroje. V průběhu obrábění povlakovanými nástroji docházelo při určitém stupni opotřebení k vylovení špicí ostří nástrojů, to mělo za následek krátkodobí pokles silového zatížení (viz obr. 9.4).

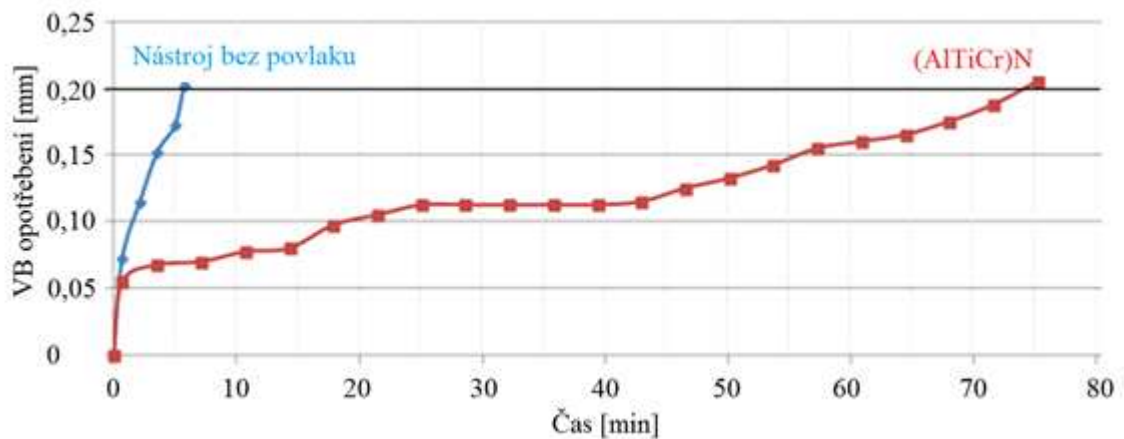


Obr. 9.4 Průběh silového zatížení povlakovaného nástroje ( $v_c=35$  m/min).

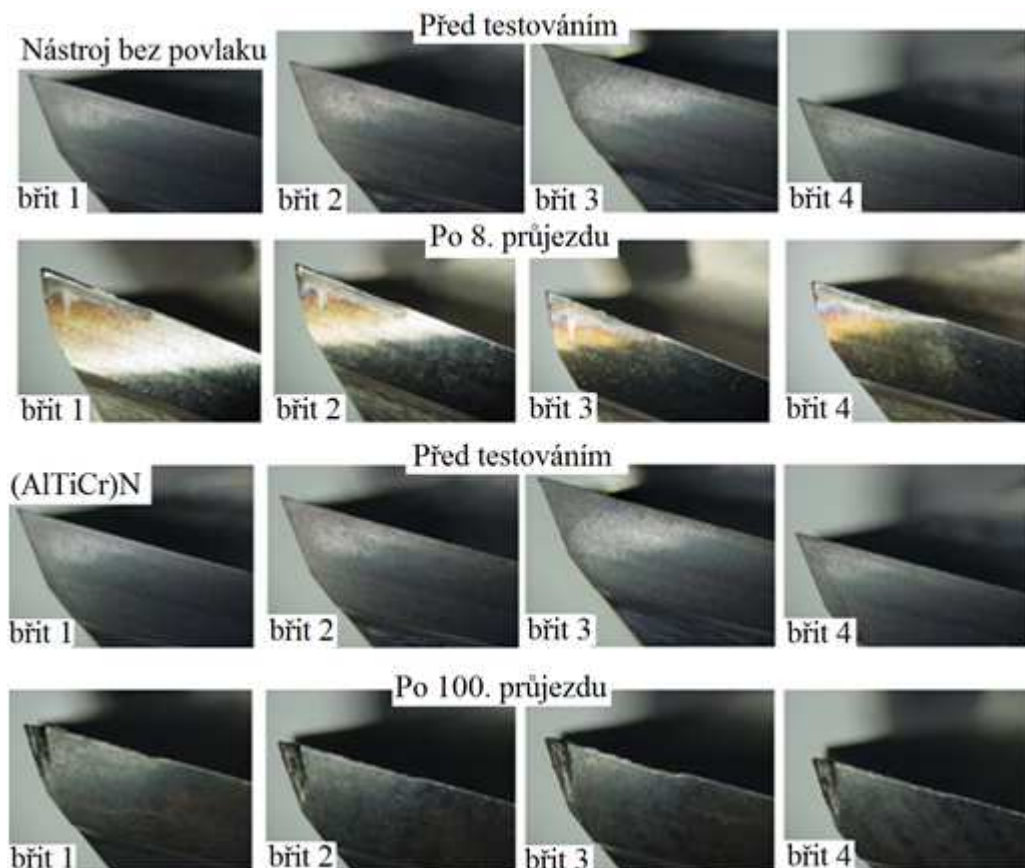


Obr. 9.5 Průběh silového zatížení nepovlakovaného nástroje ( $v_c=35$  m/min).

Velikost opotřebení byla měřena se stejnou četností jako měření silového zatížení, tzn. každý pátý průjezd u povlakovaných nástrojů a každý průjezd u nepovlakovaného.



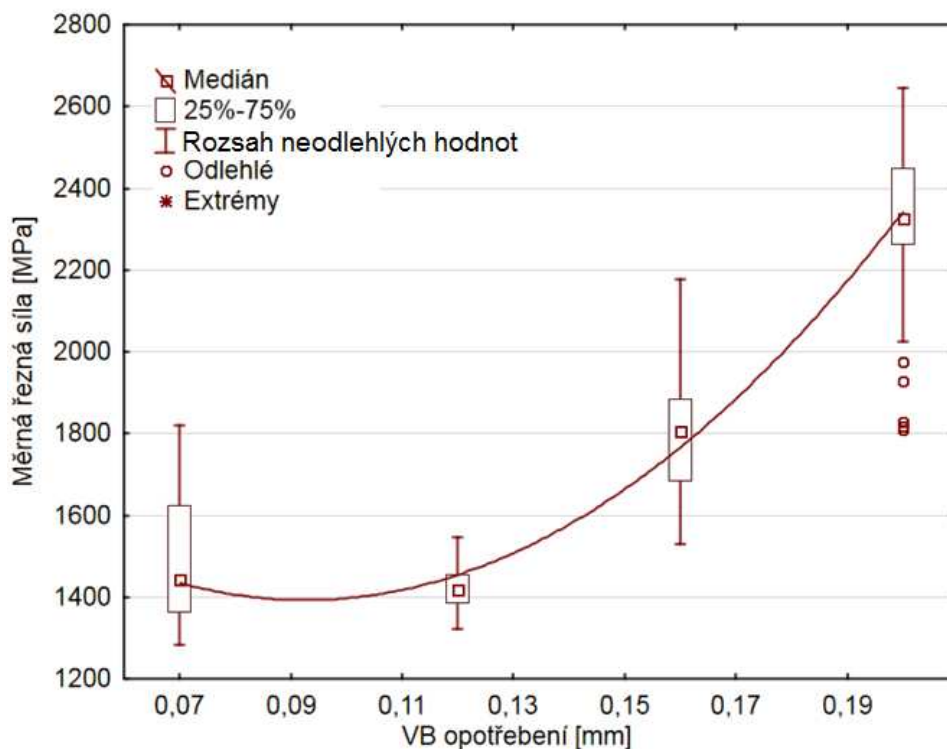
Obr. 9.6 Vývoj VB opotřebení nástrojů v průběhu testování ( $v_c=35$  m/min).



Obr. 9.7 Testované nástroje před testováním a po dosažení opotřebení  $VB=0,2$  mm ( $v_c=35$  m/min).

Ze srovnání opotřebení povlakovaného a nepovlakovaného nástroje je patrné, že u nástroje bez povlaku je hříbetní opotřebení na první pohled výraznější (lépe měřitelné).

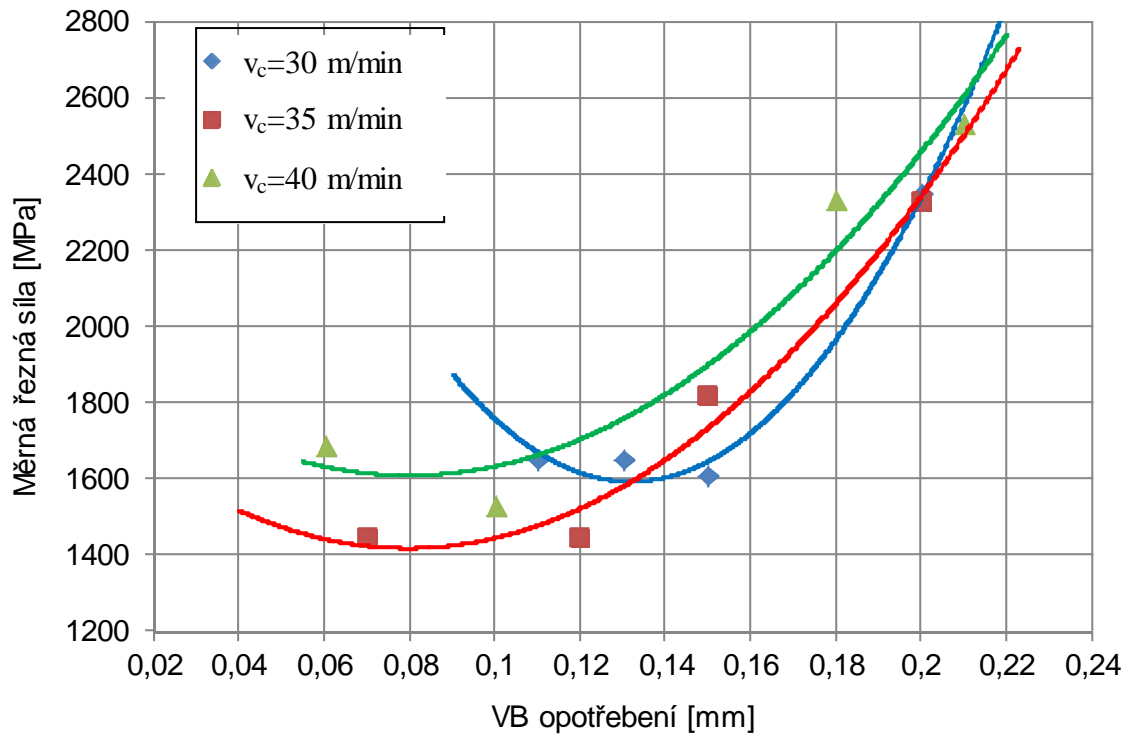
Pro výpočet měrných řezných sil bylo nezbytné stanovit hodnotu průřezu třísky pro použitou frézu ze šroubovici dle vztahu (4.13). Poté následoval výpočet velikostí měrných řezných sil z naměřených hodnot řezných sil dle vztahu (4.15). Vývoje měrných řezných sil s rostoucím opotřebením břitů nástroje jsou zobrazeny na obr. 9.8 a 9.9 pro nepovlakované nástroje a na obr 9.10 a 9.11 pro nástroje povlakované.



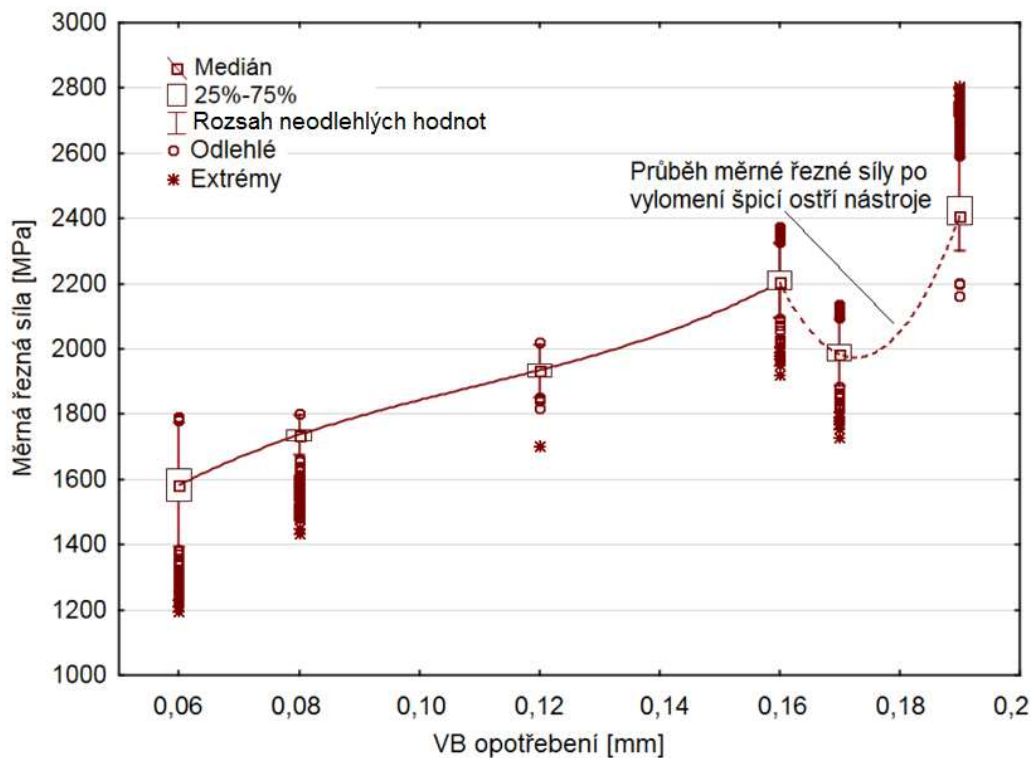
Obr. 9.8 Vývoj měrné řezné síly s rostoucím opotřebením nepovlakovaného nástroje ( $v_c=35$  m/min).

U nepovlakovaných nástrojů došlo nejdříve k mírnému poklesu měrné řezné síly, a poté (kolem hodnoty opotřebení břitů  $VB=0,1$  mm) k jejímu postupnému nárůstu. Rozptyly měrných řezných sil byly u nepovlakovaných nástrojů podstatně vyšší (v některých případech až o 300%), v grafu se ovšem v porovnání s povlakovaným nástrojem vyskytuje menší množství odlehých bodů a extrémů.

Pro přehlednost byly při porovnání průběhů měrných řezných sil při různém nastavení velikosti řezné rychlosti použity hodnoty mediánů vypočtené v softwaru Statistica.



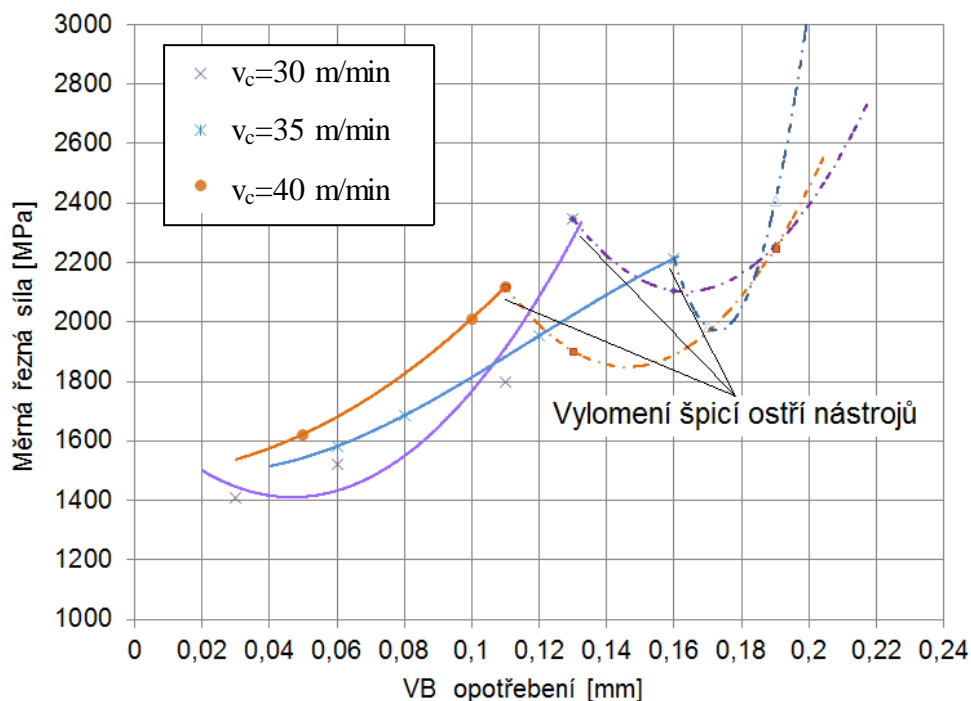
Obr. 9.9 Vývoj měrných řezných sil s rostoucím opotřebením všech nepovlakovaných nástrojů.



Obr. 9.10 Vývoj měrné řezné síly s rostoucím opotřebením povlakovaného nástroje ( $v_c = 35$  m/min).

U povlakovaných nástrojů měrná řezná síla s rostoucím opotřebením nástroje postupně roste, ovšem stejně jako u silového průběhu, dojde náhlému poklesu způsobenému vyložením špicí ostří nástroje; viz obr. 9.10 a 9.11.

Stejný trend byl zaznamenán pro všechny použité řezné rychlosti, pouze k vylovení špicí ostří docházelo při různých hodnotách opotřebení (počtu průjezdů). Hodnoty opotřebení, při kterých došlo k vylovení špicí ostří nástrojů, jsou uvedeny v tab. 9.5.

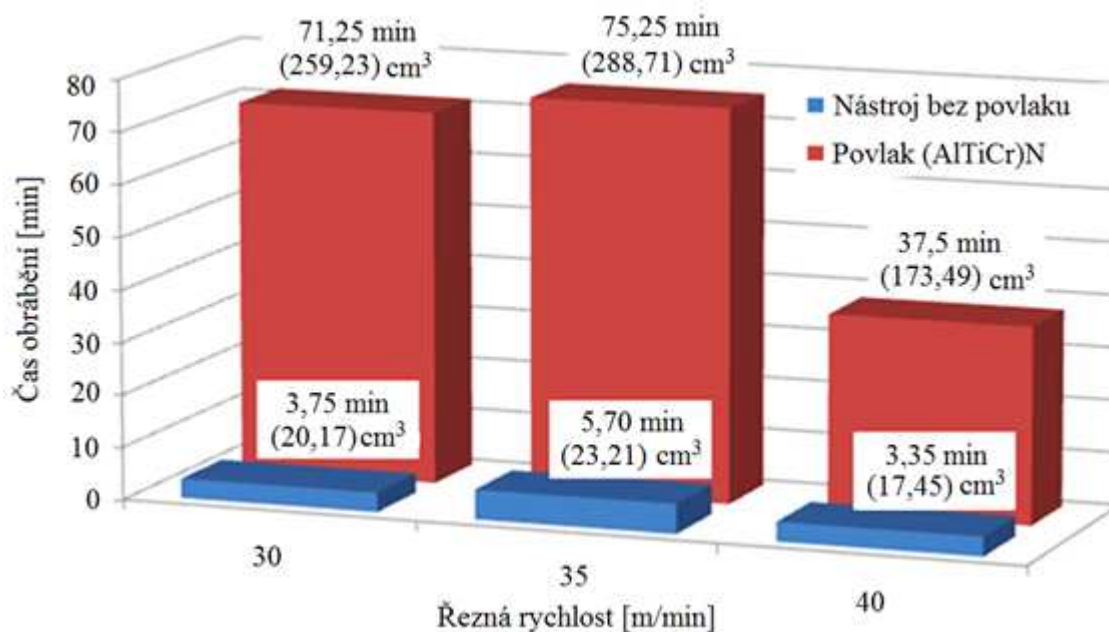


Obr. 9.11 Vývoj měrných řezných sil s rostoucím opotřebením všech testovaných povlakovaných nástrojů.

Tab. 9.5 Vylovení špicí ostří povlakovaných nástrojů.

Řezná rychlost $v_c$ [m/min]	VB opotřebení nástroje [mm]	Počet průjezdů [-]
30	0,13	60
35	0,17	85
40	0,12	40

Z tab. 9.5 je patrné, že nejdéle vydrží povlakovaný nástroj obrábět překvapivě při řezné rychlosti  $v_c=35$  m/min, a ne  $v_c=30$  m/min, jak by se dalo očekávat. Stejně tak dosáhl řezný nástroj při  $v_c=35$  m/min nejlepšího výsledku z hlediska odebraného množství materiálu (před dosažením kritické hodnoty VB opotřebení).



Obr. 9.12 Srovnání trvanlivostí jednotlivých nástrojů a množství odebraného materiálu.

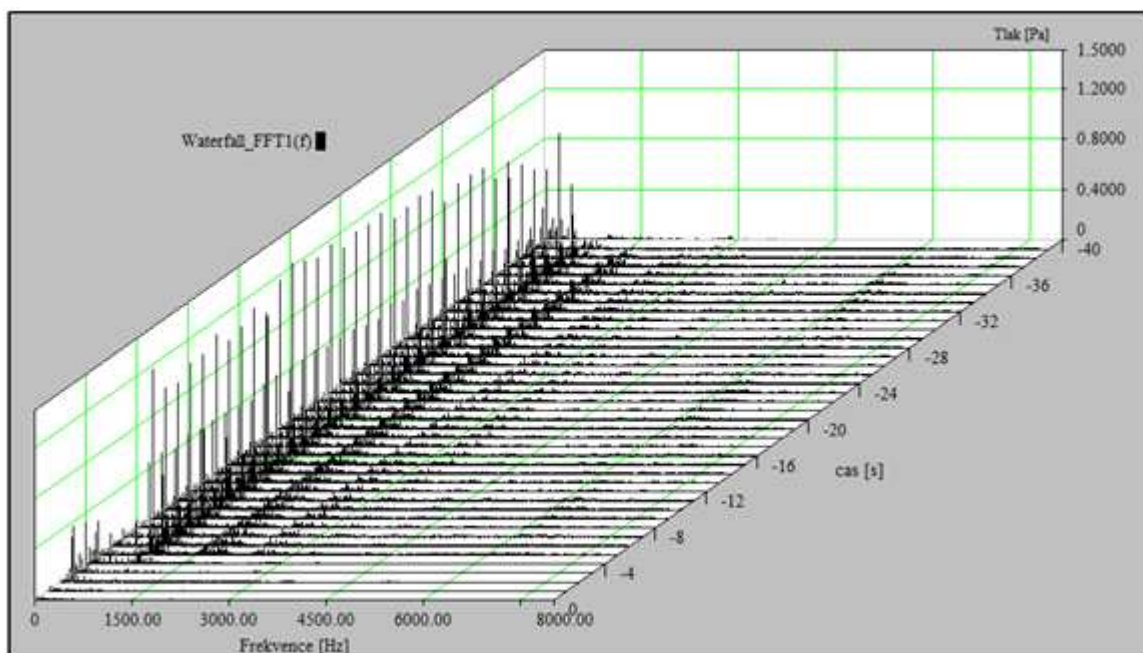
#### 9.1.4 Zvukové mapy testovaných nástrojů

Testované nástroje prošly v průběhu testování postupně třemi fázemi obrábění:

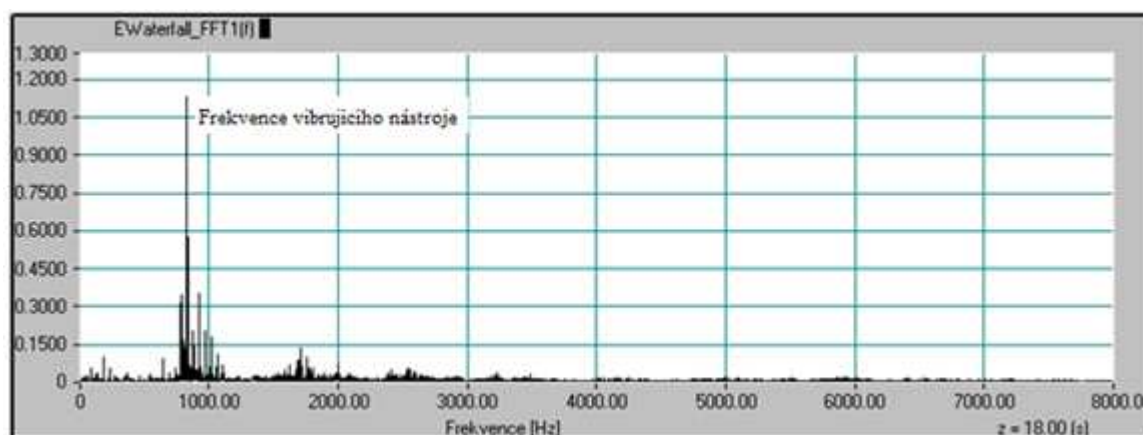
- nestabilním obráběním,
- stabilním obráběním,
- obráběním s vyšší úrovní opotřebení frézovacího nástroje.

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 opotřebením 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, zaznamenaná 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 mikrofonom a následně převáděn FFT analyzátozem 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.



Obr. 9.13 Zaznamenaná zvukové spektra nestabilního obrábění v průběhu 5. průjezdu ( $v_c=35$  m/min) pomocí Waterfall analýzy.



Obr. 9.14 Záznam vybraného zvukového spektra (18. sekunda) nestabilního obrábění v průběhu 5. průjezdu ( $v_c=35$  m/min).

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 obrábějí nástroj zvuk s jednou dominantní frekvencí (viz obr. 9.14), což je typický průvodní jev nestabilního obrábění. Dalším ukazatelem byla kvalita obrobeneé plochy, na které byly patrné vady způsobené vibrujícím nástrojem (viz obr. 9.15).



Obr. 9.15 Nestabilní obrábění.



Obr. 9.16 Stabilní obrábění

Hodnoty opotřebení, při kterých došlo ke stabilizaci obráběcího procesu, jsou uvedeny v tabulce 9.6. U nepovlakovaného nástroje byly zaznamenány vibrace pouze při prvním respektive druhém průjezdu, tato skutečnost byla způsobena rychlým opotřebením nástroje v průběhu každého průjezdu materiálem. Povlakovaný nástroj byl pro tuto měření vhodnější, je zde vidět výraznější rozdíl v počtu průjezdů, při kterých došlo ke stabilizaci obráběcího procesu. S vyšší řeznou rychlostí se zvyšuje i rychlost opotřebení nástroje, což vede v tomto případě k rychlejší stabilizaci obrábění.

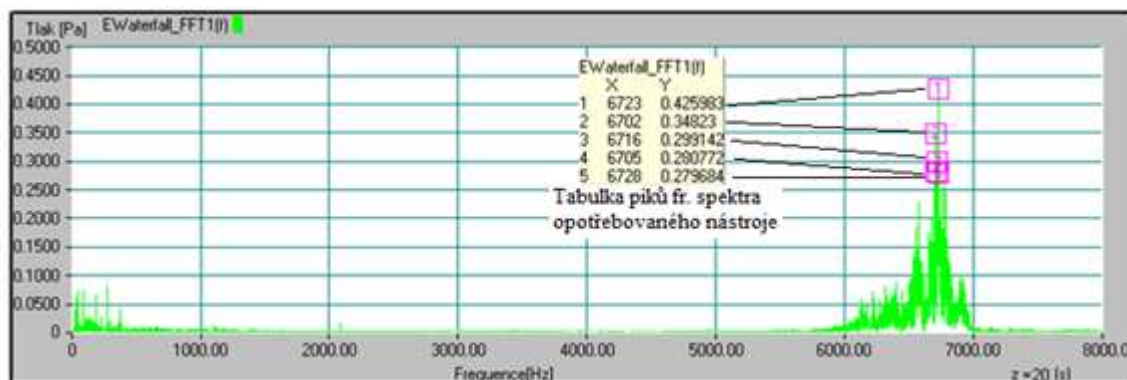
K utlumení vibrací došlo u nepovlakovaných a povlakovaných nástrojů při různé hodnotě opotřebení. Jako hraniční hodnota opotřebení, při které dojde ke stabilizaci procesu, je při daných řezných podmínkách VB opotřebení v rozmezí 0,1–0,11 mm (naměřená u povlakovaných nástrojů), nikoliv 0,07–0,08 mm (naměřená u nepovlakovaných nástrojů). Tato volba byla provedena na základě skutečnosti, že k největšímu opotřebením nepovlakovaného nástroje docházelo při průniku frézy do

materiálu. Nástroj bez povlaku dosáhl hodnoty opotřebení, která vedla ke stabilizaci, při najetí do materiálu u 3. průjezdu ( $v_c=35$  m/min) a 2. průjezdu ( $v_c=40$  m/min) materiálem.

Tab. 9.6 Hraniční hodnoty nestabilního obrábění.

Nástroj	Řezná rychlost [m/min]	VB opotřebení [mm]	Počet průjezdů [-]
Bez povlaku	35	0,08	2
	40	0,07	1
S povlakem (Al,Ti,Cr)N	35	0,11	32
	40	0,10	27

Na obr. 9.17 je znázorněno vybrané zvukové spektrum opotřebovaného nástroje ve frekvenčním spektru. Ve srovnání s vibrujícím ostrým nástrojem (viz obr. 9.14) jsou patrné značné rozdíly.



Obr. 9.17 Vybrané zvukové spektrum ve frekvenční doméně (18. sekunda) povlakovaného nástroje 80. průjezd ( $v_c=35$ m/min).

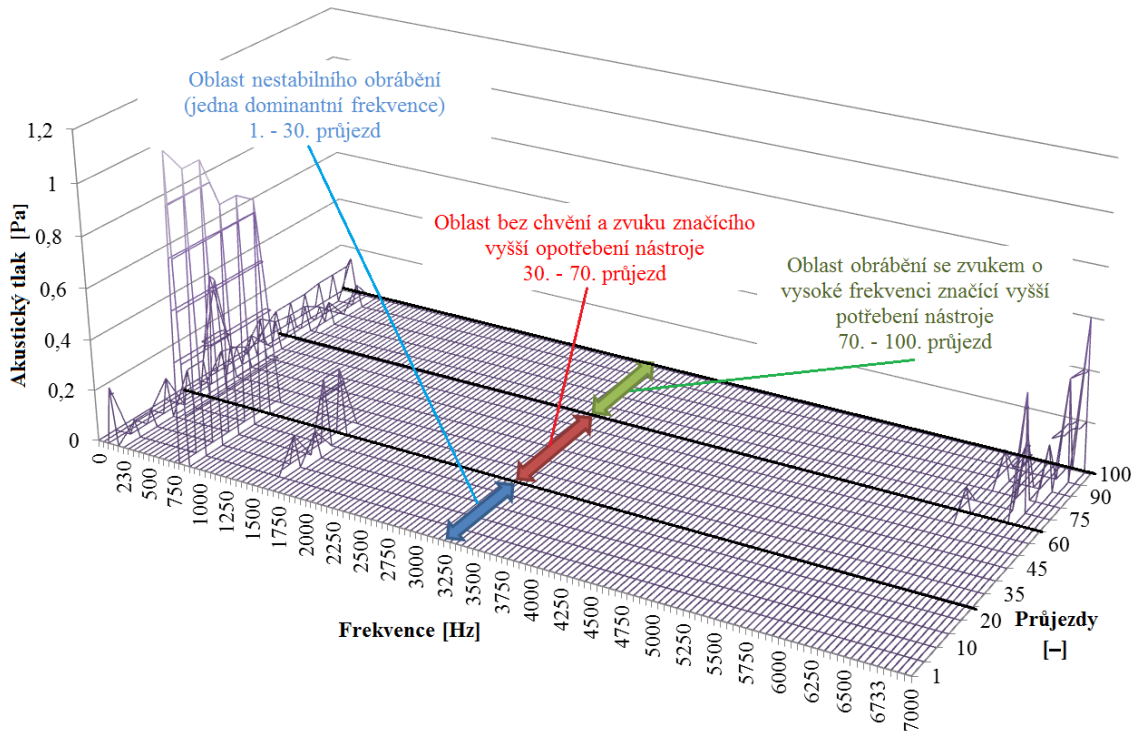
S růstem opotřebení se zvuk neustále mění a s ním i DF ve zvukovém spektru. Tabulka 9.7 obsahuje hodnoty opotřebení (počtu průjezdů), při kterých byla zaznamenána frekvence o vyšším kmitočtu a intenzitě značící zvýšené opotřebení nástroje.

Tab. 9.7 Hraniční hodnoty nadměrného opotřebení.

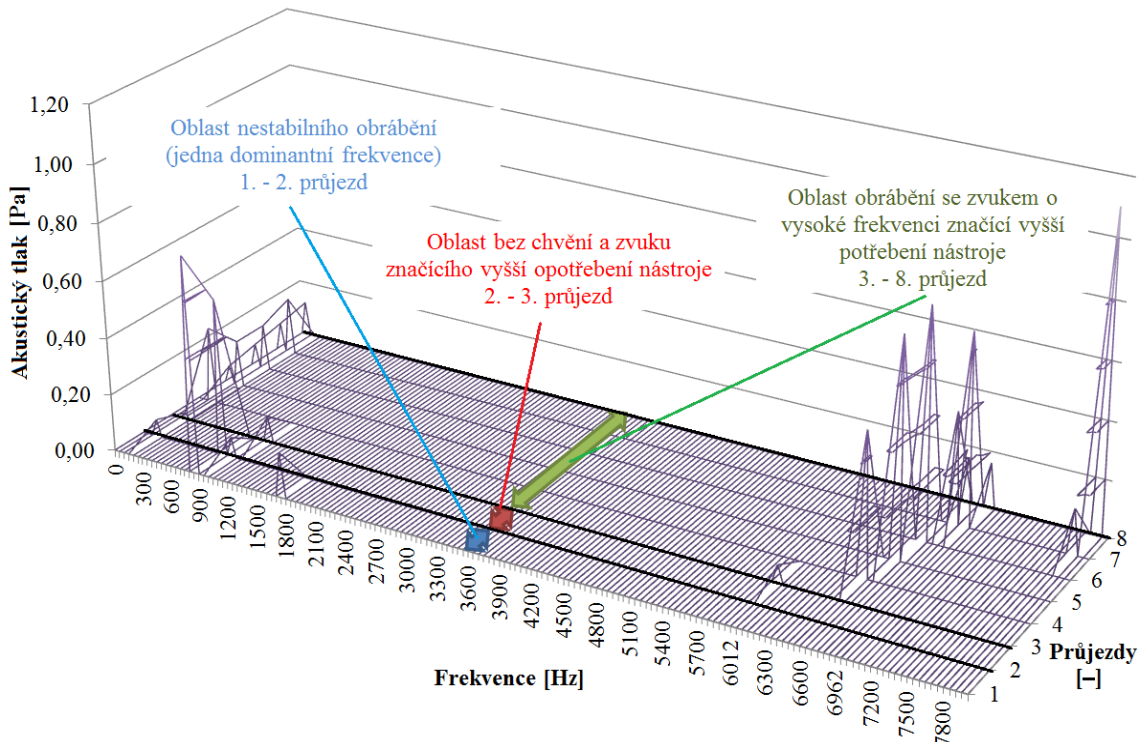
Nástroj	Řezná rychlost [m/min]	VB opotřebení [mm]	Počet průjezdů [-]
Bez povlaku	35	0,12	3
	40	0,11	3
S povlakem (Al,Ti,Cr)N	35	0,13	70
	40	0,14	50

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 (viz obr. 9.13) cca 20 zvukových spekter, ze kterých byly vypočteny mediány intenzit

a kmitočtů. Složením naměřených zvukových spekter vzniknou zvukové mapy (obr. 9.18 – povlakovaný nástroj a 9.19 – nepovlakovaný nástroj).



Obr. 9.18 Zvuková mapa povlakovaného nástroje ( $v_c=35\text{m/min}$ ).



Obr. 9.19 Zvuková mapa nepovlakovaného nástroje ( $v_c=35\text{m/min}$ ).

Na zvukových mapách (obr. 9.18 a obr. 9.19) jsou znázorněna zvuková spektra nástrojů od začátku až do konce testování (mezí 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. Jednoduchým výpočtem lze ověřit, že se nejedná o frekvenci zubovou:

$$f_{zu} = \frac{n}{60} \cdot z \cdot k \quad (9.1)$$

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

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.

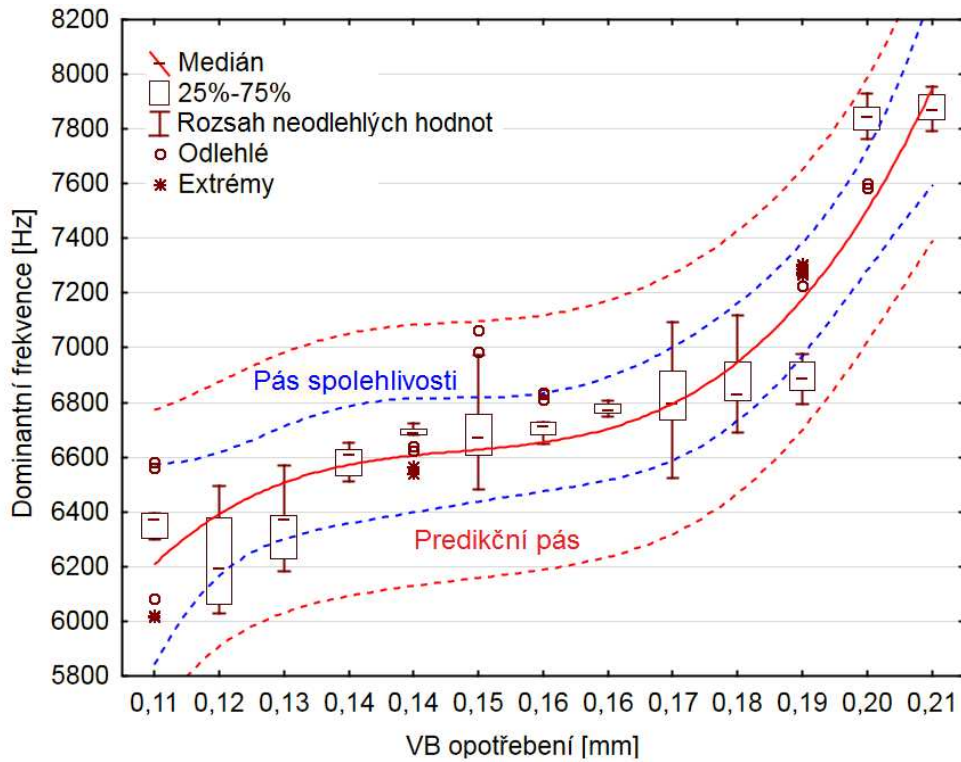
Pomocí zvukových map vytvořených pro testované nástroje bylo možné stanovit intervaly opotřebení (popř. počtu průjezdů), ve kterých bylo obrábění stabilní, a zároveň nástroj nevydával zvuk značící vyšší hodnotu opotřebení.

Tab. 9.8 Intervaly optimálního obrábění.

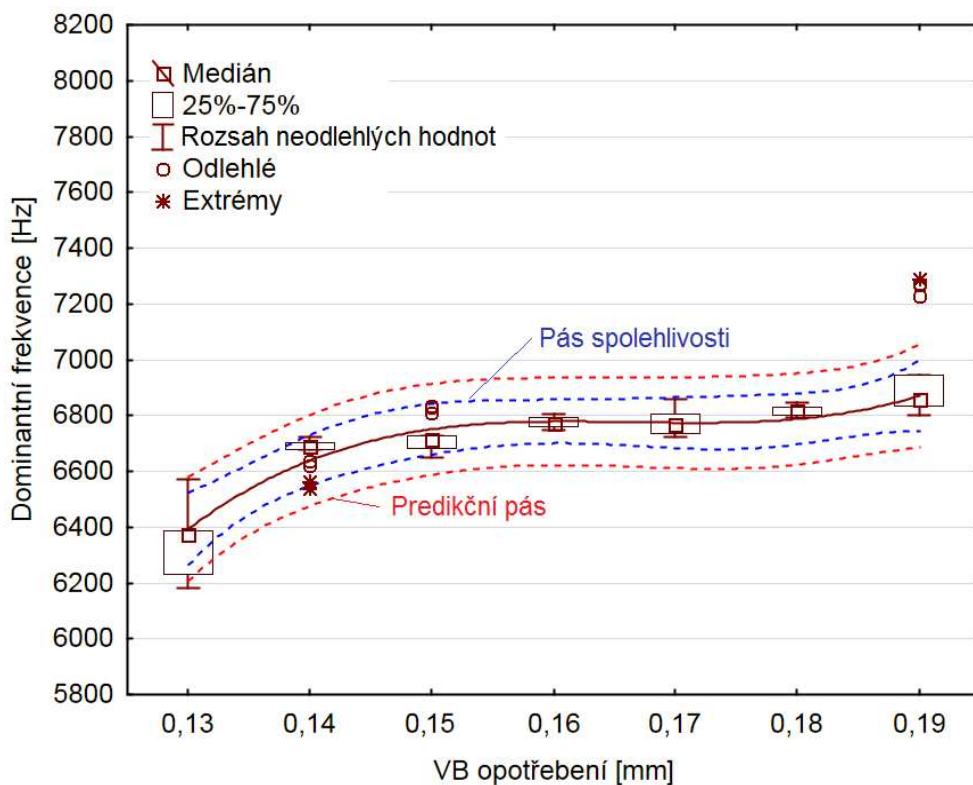
Nástroj	Řezná rychlost [m/min]	Interval – VB opotřebení [mm]	Interval – počet průjezdů
nepovlakovaný	35	<0,08–0,12>	<2–3>
	40	<0,07–0,11>	<1–3>
(Al,Ti,Cr)N	35	<0,11–0,13>	<30–70>
	40	<0,10–0,14>	<25–50>

Závislost DF na opotřebení hřbetu nástroje (průměrná hodnota opotřebení jednotlivých břitů) je zobrazena v grafu na obr. 9.20 kde byly postupně vyneseny hodnoty naměřené u všech testovaných nástrojů (s různými hodnotami řezné rychlosti). Z grafu je patrné, že s růstem opotřebení se zvyšuje kmitočet DF zvuku vydávaného obrábějícím procesem.

Při každém průjezdu bylo naměřeno 20 hodnot kmitočtu a intenzit DF. Ve zvukových spektrech v některých případech objevovalo více dominantních frekvencí, které se lišily až o 800 Hz. Tyto rozdíly byly pravděpodobně způsobeny nerovnoměrným opotřebením jednotlivých břitů nástroje. Pro měření závislosti kmitočtu DF na VB opotřebení byly vhodnější povlakované nástroje, opotřebení všech břitů bylo pozvolnější a současně rovnoměrnější. Na obrázcích 9.20, 9.21 a 9.22 jsou znázorněny naměřená data proložená polynomem třetího stupně, rozptyly hodnot a predikční a spolehlivostní pásy.

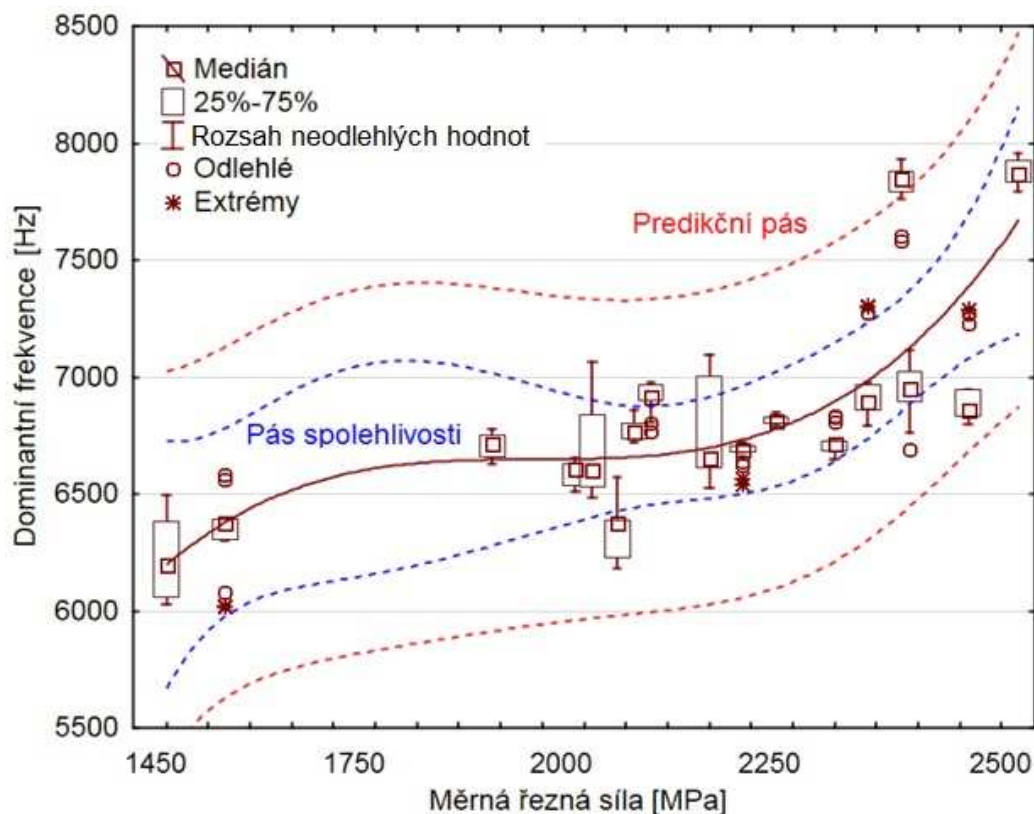


Obr. 9.20 Vztah mezi kmitočtem DF obráběcího procesu a VB opotřebením všech testovaných nástrojů.



Obr. 9.21 Vztah mezi kmitočtem DF zvukového spektra a VB opotřebením povlakovaného nástroje ( $v_c=35\text{m/min}$ ).

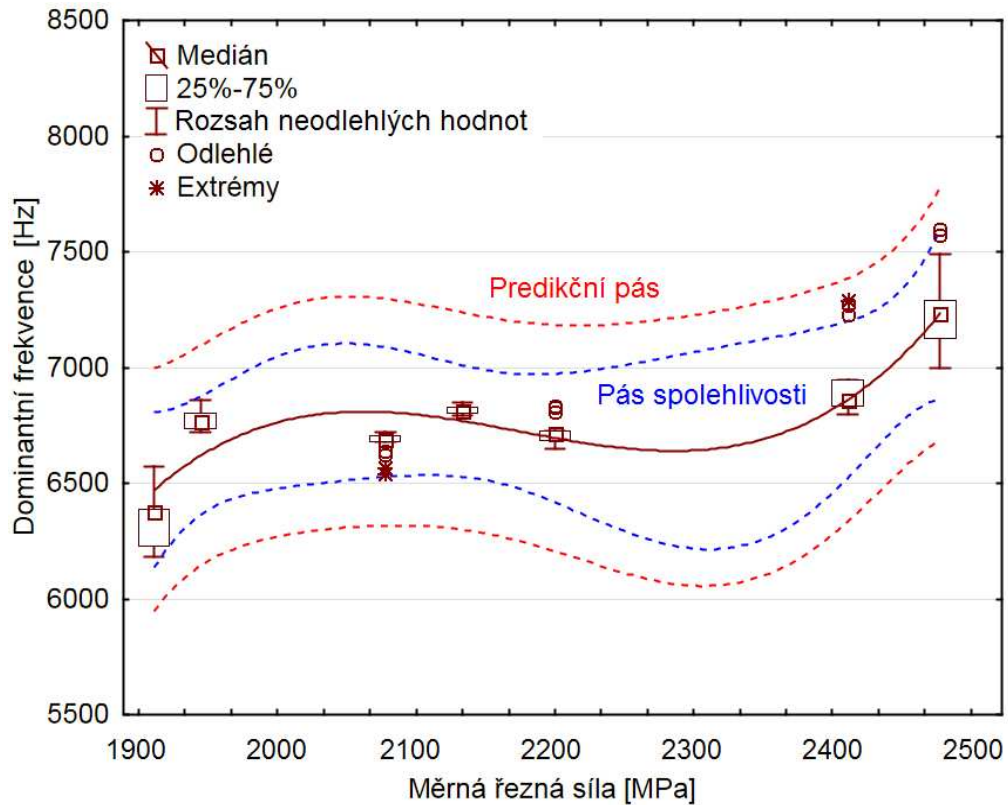
S rostoucím opotřebením nástroje dochází k postupnému zvětšování kontaktní plochy mezi nástrojem a obrobem (na hřbetě nástroje), což vede jak ke zvýšení velikostí jednotlivých složek výsledné síly, tak ke změně kmitočtu a intenzity (postupný nárůst) DF zvuku vydávaného obráběcím procesem. Vztah mezi kmitočtem DF a velikostí měrné řezné síly je další sledovanou závislostí, ta je postupně vynesena na obr. 9.22, 9.23 a 9.24 pro různé případy nastavení experimentálního obrábění.



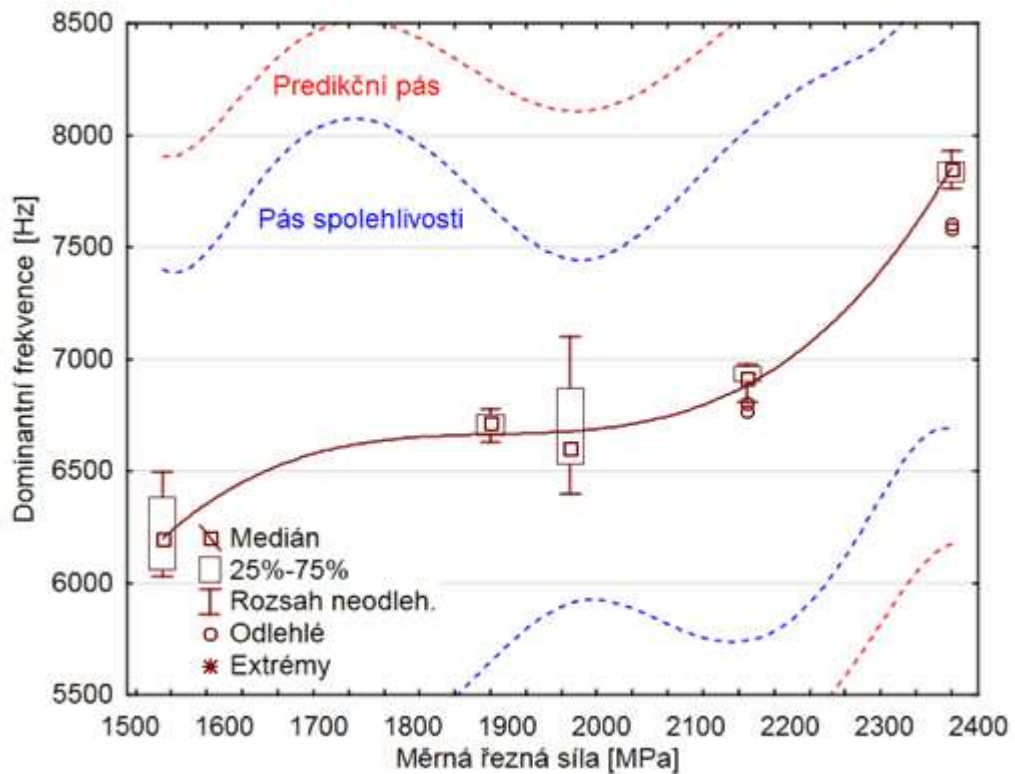
Obr. 9.22 Vztah mezi kmitočtem DF obráběcího procesu a měrnou řeznou silou pro souhrn všech testovaných nástrojů.

Průběh křivky na obr. 9.23 není zcela přesný, protože jak již bylo zmíněno, během testování došlo k vylovení špicí ostří. U povlakovaného nástroje při řezné rychlosti  $v_c=35$  m/min se vylovení špicí nástroje projevilo nejméně, došlo pouze ke drobnému poklesu měrné řezné síly (cca o 150 MPa = 7%). Následný nárůst velikosti  $k_c$  byl pozvolnější než v případě, kdy by k poškození špicí ostří nedošlo.

Z porovnání obr. 9.23 a 9.24 je patrný rozdíl v pásech spolehlivosti. Je to dáno nižším počtem měření (nástroj bez povlaku vydržel při  $v_c=35$  m/min pouze 8. průjezdů materiálem) a vyšším rozptylem hodnot DF způsobeným nerovnoměrným opotřebením jednotlivých břitů nástroje.



Obr. 9.23 Vztah mezi DF obráběcího procesu a měrnou řeznou silou pro povlakovaný nástroj ( $v_c=35\text{m/min}$ ).



Obr. 9.24 Vztah mezi kmitočtem DF obráběcího procesu a měrnou řeznou silou pro nepovlakovaný nástroj ( $v_c=35\text{m/min}$ ).

## 9.2 Měření pro sklo-polyesterový kompozitní materiál

Pro toto měření byl vybrán jako materiál obrobku sklo-polyesterový kompozit, který je podrobně popsán v kapitole 8.1.1 (Pultruzně vyrobený sklo-polyesterový kompozit). Experimentální obrábění probíhalo s úhlem nastavení vláken  $0^\circ$  (orientace vláken ve směru posuvové rychlosti). Jako nástroj byla opět zvolena HSS fréza s povlakem na bázi (Al,Ti,Cr)N, která je popsána v kapitole 9.1.2 (Specifikace nástrojů použitých pro obrábění), protože u ní byla předpokládána i přes aplikaci otěruvzdorného povlaku životnost pouze v řádu jednotek průjezdů (minut obrábění). Mohl tak být sledován rychlý nárůst snadno měřitelného hřbetního opotřebením jednotlivých břitů řezného nástroje.

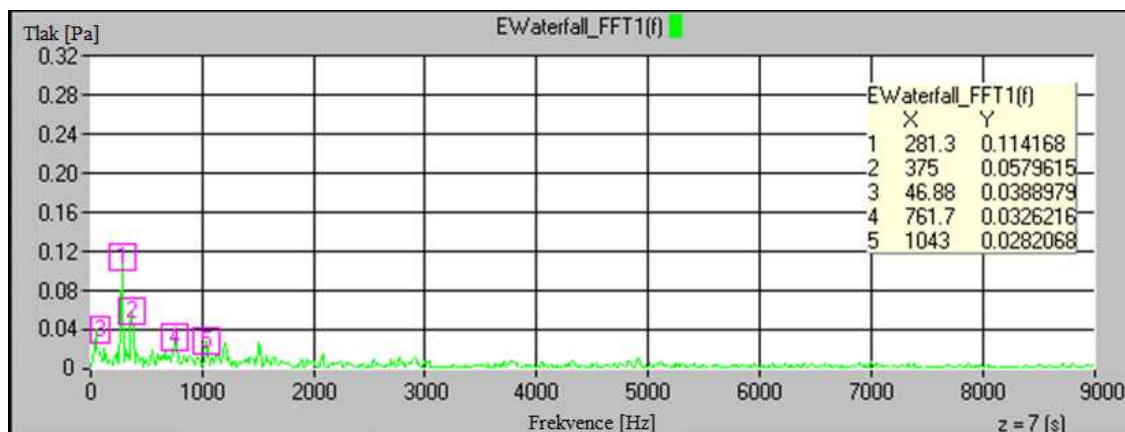
Záznam zvukového spektra opět probíhal současně s měřením silového zatížení, které sloužilo pro další výpočet měrných řezných sil (viz kapitola 8.4 Vliv opotřebením na hodnoty měrné řezné síly). Hranice VB opotřebením pro ukončení testování byla taktéž zvolena  $VB=0,2$  mm.

Měření zvukového spektra obráběcího procesu probíhalo obdobným způsobem jako v předchozí kapitole. Experimentální měření bylo realizováno pro dvojí nastavení řezných podmínek (tab. 9.9), první nastavení bylo obdobné jako při obrábění oceli 15 260.7, při druhém byla změněna hodnota řezné rychlosti (posuvové rychlosti).

Tab. 9.9 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				

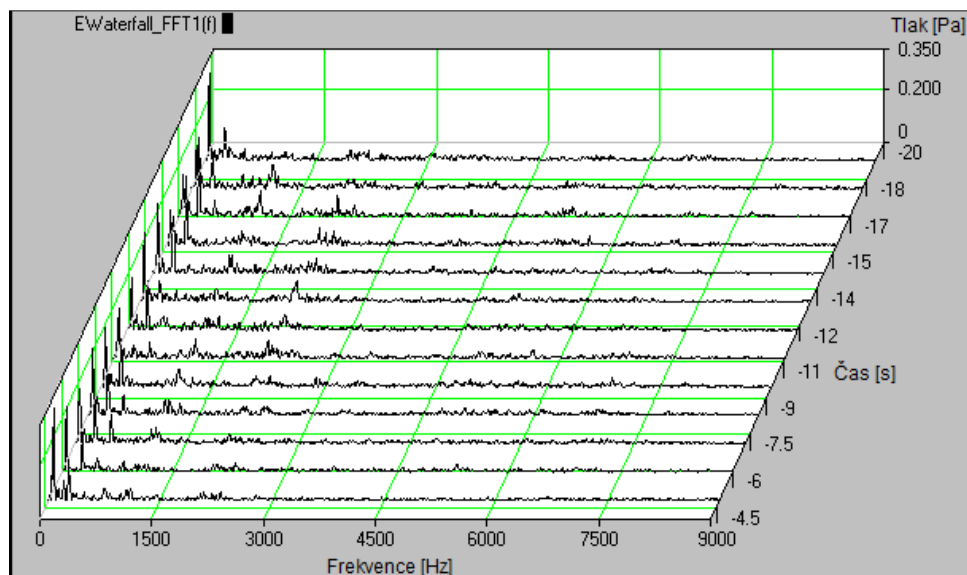
S obdobným nastavením jako při obrábění oceli, bylo provedeno celkem dvacet průjezdů kompozitním materiálem (cca 7,5 min obrábění), při kterých vzrostlo VB opotřebením nástroje postupně na hodnotu  $VB=0,21$  mm. V průběhu měření zvukového spektra obráběcího procesu nedošlo k žádnému vývoji nebo výrazné změně ve zvukovém spektru, jak tomu bylo při obrábění oceli. V zaznamenávaném zvukovém spektru se měnily dominantní frekvence pouze nahodile navíc s minimální intenzitou, (viz obr. 9.25). 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.



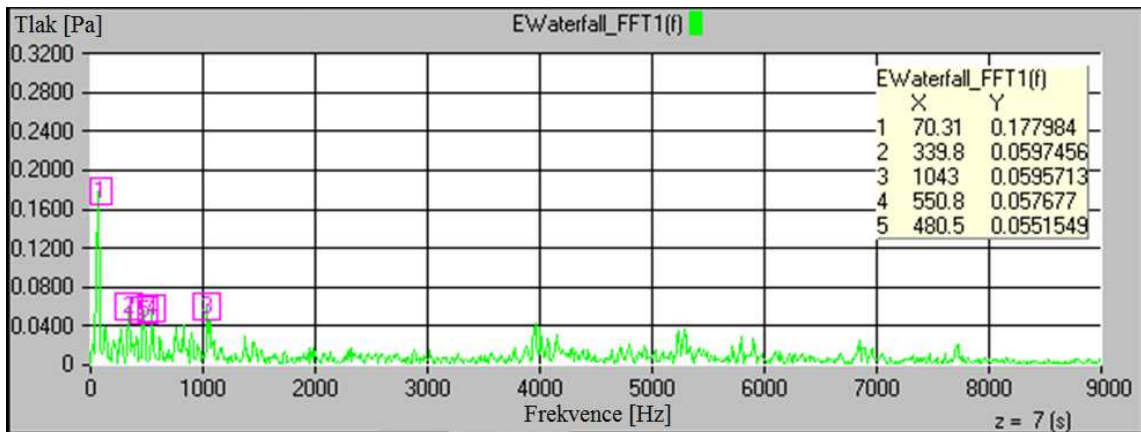
Obr. 9.25 Zvukové spektrum obráběcího procesu při nastavení řezných podmínek obdobných jako při testování oceli 15 260.7 při 5. průjezdu materiálem.

Měření zvukových spekter probíhala opět pomocí Waterfall analýzy, kdy bylo postupně po 1 sekundě vyhodnocováno zvukové spektrum obráběcího procesu (viz obr. 9.26). Intenzita sledovaných DF v průběhu obrábění drážek kolísala, při najíždění a vyjíždění nástroje byl zvuk intenzivnější (až o 25%).

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. Vývoj  $VB$  opotřebení nástroje je znázorněn v kapitole 8.4 (Vliv opotřebení nástroje na hodnoty měrné řezné síly) na obr. 8.22 a růst silového zatížení s rostoucím opotřebením na obr. 8.23.

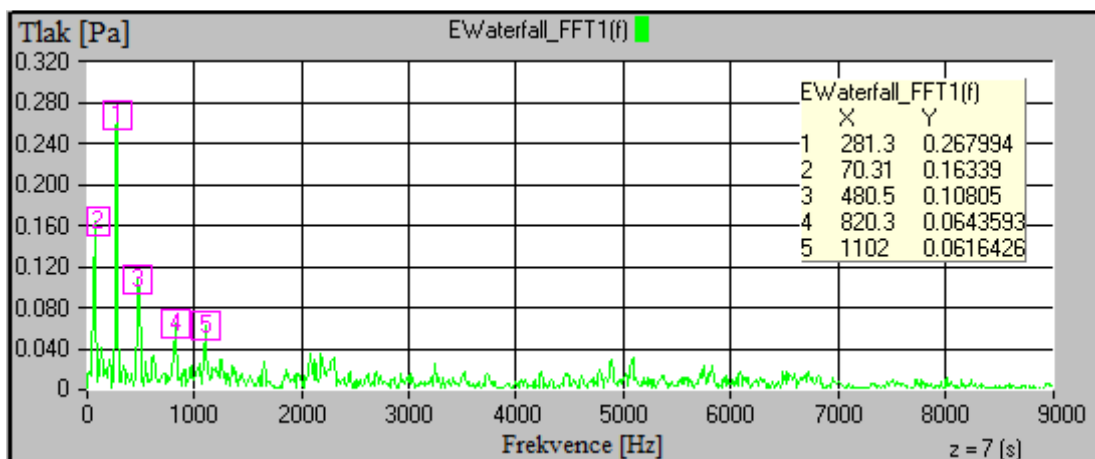


Obr. 9.26 Zvukové spektrum při novém nastavení řezných podmínek – 1. průjezd.



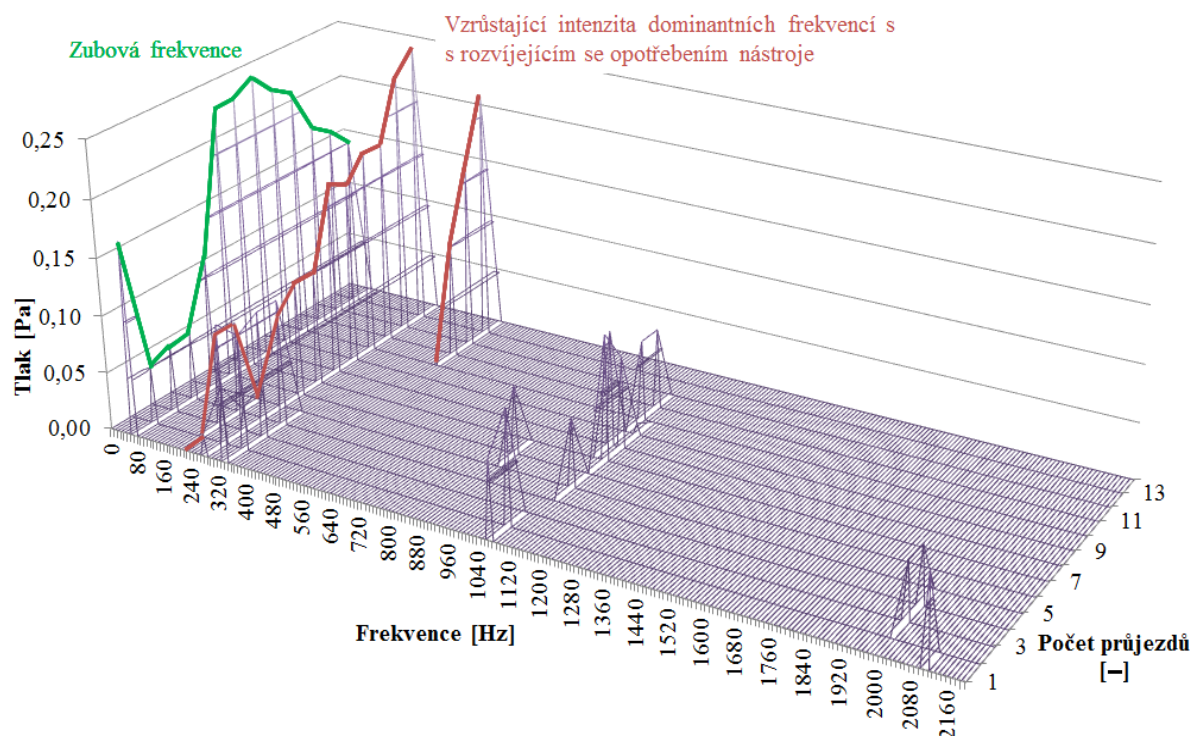
Obr. 9.27 Zvukové spektrum při novém nastavení řezných podmínek – 1. průjezd.

Zvukové spektrum se po změně řezných podmínek změnilo (obr. 9.27 a 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 (obr. 9.29) přehledně znázorňuje vývoj těchto frekvencí v průběhu experimentálního obrábění.



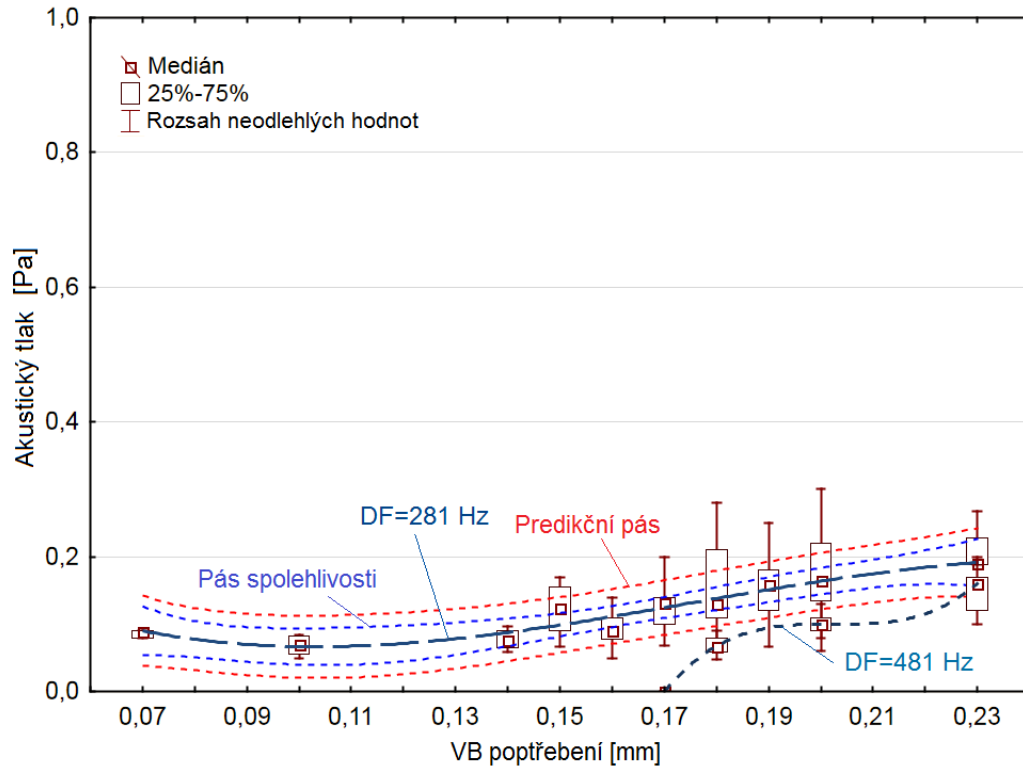
Obr. 9.28 Zvukové spektrum při novém nastavení řezných podmínek – 12. průjezd.

Při prvním průjezdu materiálem byla zaznamenána pouze zubová frekvence nástroje s kmitočtem 70 Hz. Tato frekvence v průběhu dalších dvou průjezdů prudce poklesla, naopak se objevila další DF tentokrát s kmitočtem 281 Hz. Od 4. průjezdu materiálem ( $VB=0,11$  mm) začaly intenzity těchto dvou frekvencí postupně narůstat. Tento vývoj pokračoval až do 10. průjezdu ( $VB=0,18$  mm) materiálem, po kterém následoval postupný pokles intenzity zubové frekvence (70 Hz), naopak frekvence o kmitočtu 281 Hz pokračovala v růstu. Po tomto průjezdu se objevila i třetí DF s kmitočtem 481 Hz, která začala s dalšími průjezdy prudce narůstat.

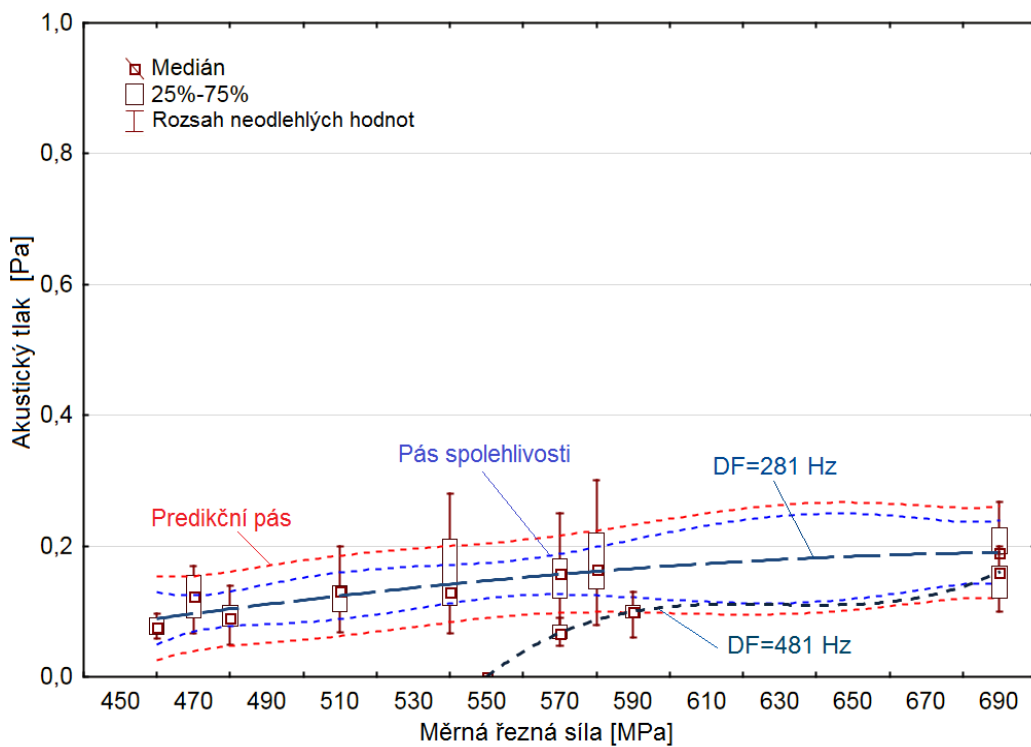


Obr. 9.29 Zvuková mapa HSS nástroje při obrábění sklo-polyesterového kompozitního materiálu.

Na obr. 8.30 a 8.31 jsou zobrazeny korelace: intenzita DF – VB opotřebením nástroje a intenzita DF – měrná řezná síla. Grafy vývoje intenzity DF=281 Hz jsou doplněny o predikční pásy a pásy spolehlivosti. Pro vývoj intenzity DF=481 Hz tyto pásy znázorněny nejsou, protože pro proložení 3 naměřených bodů byl použit polynom třetího stupně, který při takto nízkém počtu bodů prochází přesně mediány naměřených hodnot.



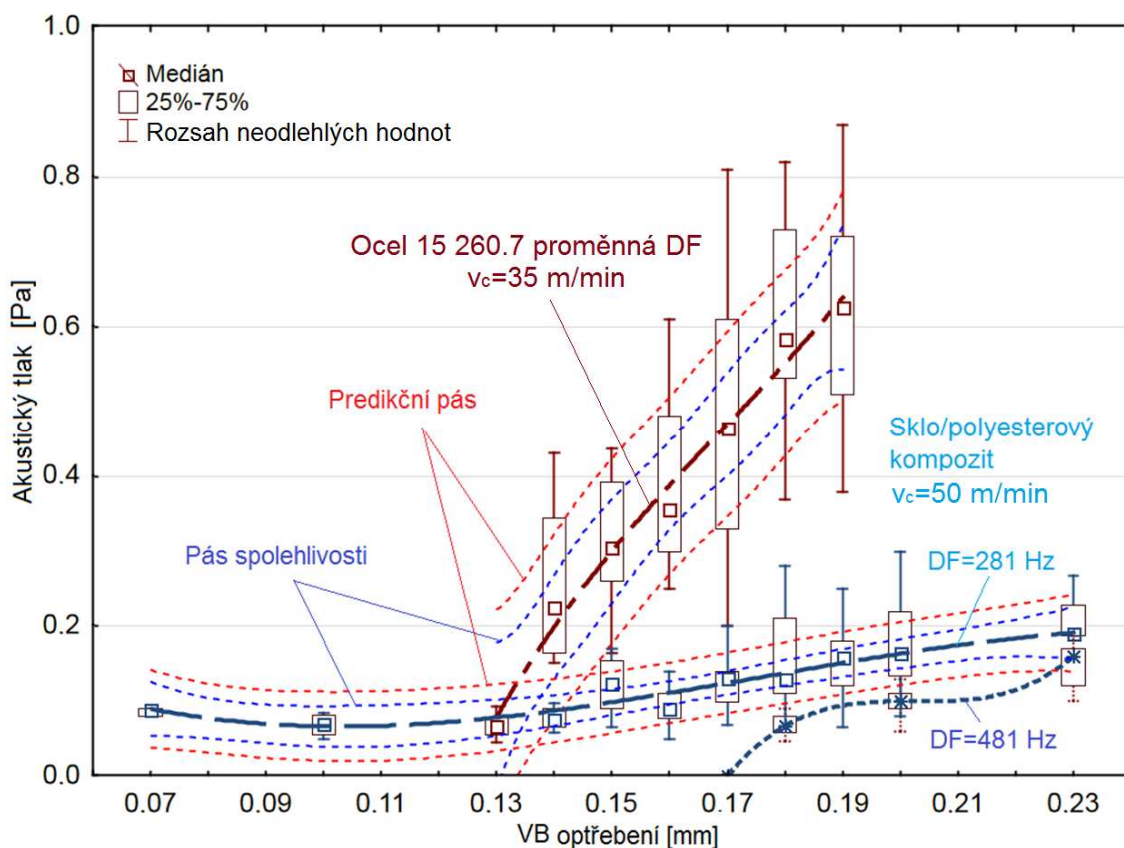
Obr. 9.30 Vývoj intenzity DF s rostoucí hodnotou VB opotřeбені nástroje.



Obr. 9.31 Vývoj intenzity DF se vzrůstající měrnou řeznou silou.

V porovnání se zvukovými mapami, které byly získány z měření zvukových spekter při obrábění oceli (viz obr. 9.18 a 9.19), je patrný značný rozdíl. Nedochází k postupné změně kmitočtu a intenzity dominantní frekvence, ale k pouze k postupnému růstu intenzit dvou ze tří DF. Dále lze konstatovat, že i intenzita (Int.) zvuku při obrábění oceli je v některých případech až dvojnásobná než při obrábění kompozitních materiálů. Nejintenzivnější zvuk  $Int.=1,1$  Pa vydával opotřeбенý ( $VB=0,21$  mm) nepovlakovaný HSS nástroj při obrábění oceli 15 260.7.

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. 9.32. Nastavené řezné podmínky jsou popsány v tab. 9.9.

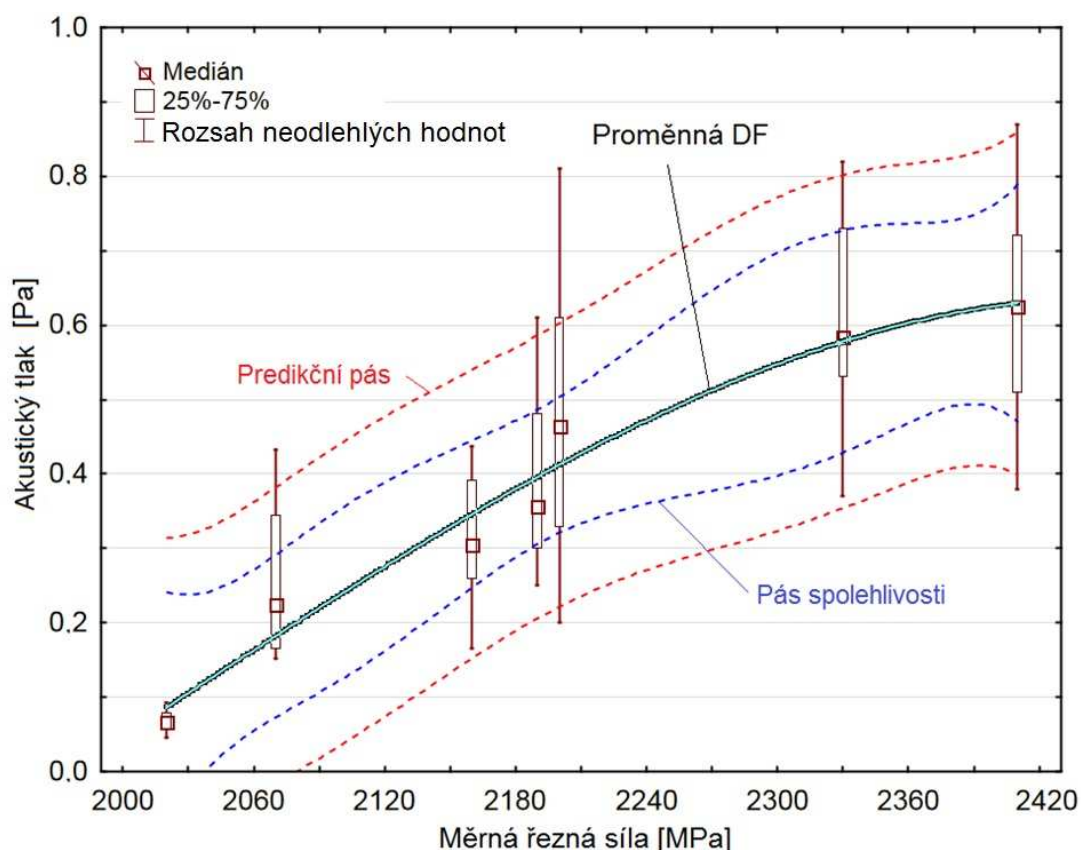


Obr. 9.32 Vývoj intenzit DF testovaných materiálů s rostoucím opotřebením HSS řezného nástroje s povlakem (Al,Ti,Cr)N.

I přes nižší řeznou rychlost ( $v_c=35$  m/min) při obrábění oceli 15 260.7 je nárůst intenzity DF strmější. Ovšem první dominantní frekvence o vyšším kmitočtu a intenzitě ( $Int.=0,07$  Pa,  $f=6000$  Hz), značící vyšší opotřebení řezného nástroje, se objevuje až při hodnotě opotřebení  $VB=0,13$  mm. Od této hodnoty opotřebení začíná prudký nárůst intenzity DF až na hodnotu  $Int.=0,43$  Pa při  $VB=0,19$  mm.

Vývoj intenzity při obrábění kompozitního materiálů měl pozvolnější průběh, do hodnoty opotřebení  $VB=0,11$  mm docházelo k mírnému poklesu intenzity, poté nastal její pozvolný nárůst až na maximální měřenou hodnotu  $Int.=0,16$  Pa při opotřebení  $VB=0,23$  mm.

Pro doplnění je na obr 9.33 znázorněn průběh intenzity proměnné dominantní frekvence s rostoucí hodnotou měrné řezné síly zaznamenaný při obrábění oceli 15 260.7.



Obr. 9.33 Vývoj intenzit DF s rostoucí měrnou řeznou silou při frézování oceli 15 260.7 s HSS řezným nástrojem s povlakem (Al,Ti,Cr)N.

Všechna měření byla prováděna s nástroji z HSS, u kterých mohl být předpokládán, a následně i sledován, rychlý a výrazný rozvoj opotřebení nástroje. Další testování by bylo vhodné provést s jinými typy nástrojů (např. nástroji ze SK), při různém nastavení řezných podmínek.

## 10. Závěry

Celkové závěry dizertační 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 maximum 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 opotřebenění po daném počtu průjezdů materiálem hodnotu  $VB=0,02$  mm (pro 51 průjezdů), přičemž tímto rozvojem opotřebenění došlo k nárůstu velikosti  $k_c$  přibližně o 9 MPa (2,34%).

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

- Při obrábění tohoto materiálu nástrojem z HSS bylo dosaženo hodnoty opotřebenění  $VB=0,23$  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 rychlosti  $v_c=35$  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 opotřebením 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 opotřebením nástrojů;
- nejintenzivnější zvuk  $Int_{.ocel}=1,1$  Pa byl zaznamenán při obrábění oceli 15 260.7 nepovlakovaným nástrojem s hodnotou opotřebením  $VB=0,21$  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.

## Perspektiva dalších prací

Při výrobě kompozitů lze získat materiály s nejrůznějšími mechanickými vlastnostmi, a to kombinací materiálů výztuže a matrice, různých orientací vláken a složením kompozitu z rozdílných vrstev. Vzhledem k této skutečnosti bude i v budoucnu stále prostor pro studie zabývající se problematikou obrábění nových, kompozitních materiálů.

Měření zvukových spekter obráběcího procesu, která byla provedena v dizertační práci, jsou pouze prvním krokem v měření a zpracování akustických signálů. Bude třeba dalšími měřeními ověřit platnost naměřených závislostí, popřípadě dále rozšiřovat získané poznatky měřeními s nástroji z jiných materiálů, s jiným nastavením řezných podmínek a s jinými materiály obrobků.

## 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/VyrobníTechnologie\\_I.pdf](http://www.fme.vutbr.cz/opory/pdf/VyrobníTechnologie_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 Kräften und Leistungen an spanenden Werkzeugen 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: Theorie, Berechnung und Richtwerte*, München, Wien, C. H. Verlag, 1993.
- [10] SPUR, G. a T. STEFERLE. *Handbuch der Fertigungstechnik*. Vol. 1, Moskwa, Mashinostroenie, 1985 (Russian).

- [11] KÖNIG, W. a K. ESSEL. *Spezifische Schittkraftwerte die Zerspanung metallischer Werkstoffe*. 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] HUMÁR, A. *TECHNOLOGIE OBRÁBENÍ – 2. část*. Studijní opory pro magisterskou formu studia. [online]. 2003. 94 s. Dostupné z: <[http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI\\_TO-1cast.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf)>
- [14] FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. První. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-2374-9.
- [15] DIMLA, E. a S. DIMLA. *Sensor sinals for tool-wear monitoring in metal cutting operations - a review of methods*. Machine Tools&Manufacture [online]. 1999, č. 40, s. 1073-1098 [vid. 2014-01-01]. DOI: S0890-6955(99)00122-4. Dostupné z: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695599001224>>
- [16] DENKENA, Bernard a Ferdinand HOLLMANN. *Process machine interactions: Modeling and Simulations*. Berlin: Springer, 2013, xvi, 519 s. Lecture notes in production engineering. ISBN 978-3-642-32447-5.
- [17] ALTINTAS, Y. a M. WECK, *Chatter stability of Metal cutting and Grinding*. Annals of the CIRP, č. 53, str. 619-642, 2004
- [18] PÍŠKA, Miroslav a Aleš POLZER. *Studie řezivosti hrubovacích fréz z produkce ZPS-FN, a.s., Zlín*. Sborník odborné konference Frézování III. Brno: FSI VUT v Brně, 2003. s. 145-158. ISBN 80-214-2436-2.
- [19] FOREJT, Milan. *Experimentální metody: Syllabus* [online]. Brno, 2003 [vid. 2014-01-01]. Dostupné z: <[http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/cviceni\\_soubory/experimentalni\\_metody\\_cviceni\\_forejt\\_piska\\_humar\\_janicek.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/cviceni_soubory/experimentalni_metody_cviceni_forejt_piska_humar_janicek.pdf)>.
- [20] GHANI, J. A., M. RIZAL, M. Z. NUAWI, M. J. GHAZALI a C. H. C. HARON. *Monitoring online cutting tool wear using low-cost technique and user-frendly GUI*. Wear [online]. 2011, s. 2619-2624 [vid. 2014-01-01]. DOI: 10.1016/j.wear.2011.01.038.
- [21] HUANG, S. N., K. K. TAN, Y. S. WONG, C. W. DE SILVA, H. L. GOH a W. W. TAN. *Tool wear detection and fault diagnosis based on cutting force monitoring*. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2007, s. 444-451, ISSN 08906955. DOI: 10.1016/j.ijmactools.2006.06.011.

- [22] TETI, R., K. JEMIELNIAK, G. O'DONNELL a D. DORNFELD. *Advanced monitoring of machining operations*. CIRP Annals - Manufacturing Technology. [online]. 2010, č. 59, s. 717-739. [vid. 2014-01-01]. DOI: 10.1016/j.cirp.2010.05.01. Dostupné z: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850610001976>>
- [23] BHATTACHARYYA, P., D. SENGUPTA a S. MUKHOPADHYAY. *Cutting force-based real-time estimation of tool wear in face milling using a combination of signal processing techniques*. Mechanical Systems and Signal Processing. [online]. 2007, č. 21, s. 2665-2683. [vid. 2014-01-01]. DOI: 10.1016/j.ymsp.2007.01.004. Dostupné z: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0888327007000088>>
- [24] WANG, W., Y. S. WONG a G. S. HONG. *Flank wear measurement by successive image analysis*. Computers in Industry [online]. 2004, č. 56, s. 816-830, 2005 [vid. 2014-01-01]. DOI: 10.1016/j.compind.2005.05.009. Dostupné z: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166361505001211>>
- [25] SALGADO, D. R. a F. J. ALONSO. *Tool wear detection in turning operations using singular spectrum analysis*. Materials Processing Technology [online]. 2006, č. 171, s. 451-458 [vid. 2014-01-01]. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2005.08.005. Dostupné z: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013605008083>>
- [26] JURKOVIC, J., M. KOROSEK a J. KOPAC. *New approach in tool wear measuring technique using CCD vision system*. Machine Tools & Manufacture [online]. 2005, č. 45, s. 1023-1030 [vid. 2014-01-01]. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2004.11.030. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695504003128>
- [27] BACH, Pavel. *Perspektivy vývoje frézovacích vřete*. Praha, 2006. ISBN 8001034372. Habilitační přednášky. České vysoké učení technické.
- [28] TLUSTÝ, J. a M. POLÁČEK. *Stability of the Machine Tool Against Self Excited Vibration in Machining*. Prod. Eng. Res. Conf. ASME, Pittsburgh, 1963
- [29] FOJTU, Petr. *Problematika samobuzeného kmitání při obrábění*. ČVUT [online]. 2009 [vid. 2014-01-01], s. 1-15. Dostupný z: <<http://stc.fs.cvut.cz/History/2009/Papers/pdf/FojtuPetr-304483.pdf>>.
- [30] GANGULI, Abhijit. *Chatter reduction through active vibration damping*. Universite Libre de Bruxelles, 2005. 120 s. Vedoucí dizertační práce Prof. Andre Preumont

- [31] TUMA, Jiří. *Zpracování signálů získaných z mechanických systémů užitím FFT*. Praha: Sdělovací technika s.r.o., 1997. 174 s. ISBN 80-901936-1-7.
- [32] NAVRÁTIL, Miroslav a Oldřich PLUHŘ, *Měření a analýza mechanického kmitání: metody a přístroje*. 1. vyd. Praha: SNLT- Nakladatelství technické literatury, 1986. 404 s.
- [33] EVINS, David. *Modal Testing – Theory, Practice and Application*, England: Research Studies Press Ltd., 2000, ISBN 0-86380-218-4
- [34] ZAVERI, K. *Modal analysis of large Structures – Multiple Exciter Systems*, Denmark: Brüel&Kjaer, 1985, ISBN 87-873555-03-5
- [35] RANDAL, R. B. *Frequency Analysis*, Denmark: Brüel&Kjaer, 1987, ISBN 87-873555-07-8
- [36] DVOŘÁK, Vítězslav. *Experimentální modální analýza*. SVOČ [online]. 2009 [vid. 2014-01-01], s. 1-8. Dostupný z: <[http://old.fst.zcu.cz/\\_files\\_web\\_FST/\\_SP\\_FST\(SVOC\)/\\_2009/\\_sbornik/Papers/Pdf/Ing/Dvorak\\_Vitezslav.pdf](http://old.fst.zcu.cz/_files_web_FST/_SP_FST(SVOC)/_2009/_sbornik/Papers/Pdf/Ing/Dvorak_Vitezslav.pdf)>.
- [37] ZELINSKY, Peter. *Modern Maschine Shop: Maximum Aluminum*. [online]. 2001 [vid. 2014-01-01]. Dostupné z: <http://www.mmsonline.com/articles/maximum-aluminum>
- [38] DAŇEK, O., POLÁČEK, M., L. ŠPAČEK a J. TLUSTÝ, 1962. *Selsterregte Schwingungen am Werkzeugmaschinen*, VEB Verlag, Berlin.
- [39] TLUSTÝ, J a F. KROENIGSBERGER, *Specifications and Tests of Machine Tools*. Manchester: UMIST, 1970.
- [40] TLUSTÝ, J. *Manufacturing processes and equipment*. New York: Prentice Hall, 1999. 928 s.
- [41] TOBIAS S. A. *Machine tool vibration*. Blackie and Son, London 1965.
- [42] JIANPING, Yue. *Creating a Stability Lobe Diagram*. Essex County College [online]. 2006 [vid. 2014-01-01], s. 1-18. Dostupný z: <[http://www.ijme.us/cd\\_06/PDF/IT%20301-050.pdf](http://www.ijme.us/cd_06/PDF/IT%20301-050.pdf)>.
- [43] SCHMITZ, T. L. a K. S. SMITH. *Machining Dynamics: Frequency response to Improved Productivity*. Springer Science, 2009. ISBN 978-0-387-09644-5.
- [44] SCHMITZ, T. L. *Stability in High-Speed Machining* [s.l.], 2006. 42 s. National Institute of Standards and Technology Gaithersburg, MD. Prednáška.

- [45] LIANG, S. Y., Y. K. KWON a R. Y. CHIOU. *Chatter stability of a slender cutting tool in turning with tool wear effect*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 4 vyd. London: Springer-Verlag, 2004, s. 857-864. ISBN 0268-3768.
- [46] LEE, Y. S. a S. C. TRANG, *Modeling of the process damping force in chatter vibration*. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 1995, s. 951-962
- [47] BACH P. *Frézování titanových slitin HSS nástroji z PM ocelí*. Manufacturing Engineering, 2007, s. 5-7
- [48] TYLER, Christopher T. a Tony L. SCHMITZ. *Analytical process damping stability prediction*. Journal of Manufacturing Processes. 2013, č. 15, s. 69-76. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmapro.2012.11.006>.
- [49] HUANG C. Y. a J. J. WANG. *Mechanistic modeling of process damping in peripheral milling*. Journal of Manufacturing Science and Engineering. 2007, s. 12-20
- [50] ELBESTAWI M., F. ISMAIL A., DU R. a B. C. ULLAGADDI, *Modeling machining dynamics including damping in the tool-workpiece interface*. Journal of Engineering for Industry, 1994, s. 435-439
- [51] AHMADI, K. a F. ISMAIL, *Investigation of Finite Amplitude Stability Due to Process Damping in Milling*. Fifth CIRP Conference on High Performance Cutting. 2012, roč. 1, 60-65. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2012.04.009>.
- [52] KARANDIKAR, J., R. E. ZAPATA a T. L. CHMITZ. *Incorporating stability, surface location error, tool wear, and uncertainty in the milling super diagram*. Transactions of the NAMRI/SME [online]. 38. vyd., 2010 [vid. 2014-01-01]. ISSN 1047-3025. Dostupné z: <https://sites.google.com/site/jkarandikar1/publications>
- [53] SMITH, S. *Finding stability with "super diagram"*. Cutting tool Engineering [online]. 2011, roč. 63, č. 10 [vid. 2014-01-01]. Dostupné z: [http://www.ctemag.com/aa\\_pages/2011/111008-MachineTech.html](http://www.ctemag.com/aa_pages/2011/111008-MachineTech.html)
- [54] *Využití kompozitních materiálů v leteckém průmyslu*. [online]. [vid. 2014-01-01]. Dostupné z: <http://www.taringa.net/posts/imagenes/14383839/La-superioridad-del-Typhoon-sobre-el-Rafale-Informe.html>
- [55] KOŘÍNEK, Zdeněk. *Definice a historie kompozitů*. 15 s. [online]. [vid. 2014-01-01]. Dostupné z: <http://www.volny.cz/zkorinek/historie.pdf>.

- [56] *Composite material*, [online]. [vid. 2014-01-01]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/File:Composite\\_3d.png](https://en.wikipedia.org/wiki/File:Composite_3d.png)
- [57] 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.
- [58] SEDLÁČEK, J. *Efektivní obrábění vláknově vyztužených kompozitních materiálů*. Dizertační práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, 2010. 104 s, 7 příloh. Vedoucí dizertační práce doc. Ing. Anton HUMÁR, CSc.
- [59] LAŠ, Vladislav. *Mechanika kompozitních materiálů*. 2. vydání Plzeň: TYPOS a.s., 2008. 204 s. ISBN 978-80-7043-689-9.
- [60] KOŘÍNEK, Zdeněk. *Matrice*. 29 s. [online]. [vid. 2014-01-01]. Dostupné z: <<http://www.volny.cz/zkorinek/matrice.pdf>>.
- [61] KOŘÍNEK, Zdeněk. *Vlákna*. 67 s. [online]. [vid. 2014-01-01]. Dostupné z: <<http://www.volny.cz/zkorinek/vlakna.pdf>>.
- [62] *Prefa Kompozity*, [online]. [vid. 2014-01-01]. Dostupné z: <http://www.prefa-kompozity.cz/produkt/kompozitni-profilu-prefen>
- [63] MYTYSKOVÁ, Iveta. *Mechanické a tepelné vlastnosti tkaninových kompozitů sklo/polysiloxan*. Diplomová práce v oboru „Hodnocení textilií“. Liberec: TU-FT, Katedra hodnocení textilií. 2008. 48 s.
- [64] PREFA KOMPOZITY. *Technologie výroby tažených profilů PREFEN* [online]. [vid. 2014-01-01]. Dostupné z: <<http://www.prefa-kompozity.cz/technologie-vyroby-tazenych-profilu-prefen>>
- [65] *Cutters for Composite machining*, [online]. [vid. 2014-01-01]. Dostupné z: <<http://www.mmsonline.com/products/cutters-for-composite-machining>>
- [66] *Composites in manufacturing*, [online]. [vid. 2014-01-01]. Dostupné z: <<http://www.composites-manufacturing.com/features/31/20127/217/>>
- [67] KOENIG W., WULF Ch., GRAB P. a H. WILLERSCHIED, *Machining of fiber reinforced plastics*, *Annals of CIRP*, 1985, č. 34, s. 537–547.
- [68] KOPLEV A., LYSTRUP A. a T. VORM, *The cutting process, chips, and cutting forces in machining CFRP*, *Composites* 1983, č. 14, s. 371–376.

- [69] 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.
- [70] 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.
- [71] WERN C. W. a M. RAMULU, *Machining mechanics in fiber reinforced plastics*, ASME, Applied Mechanics Division, AMD 208, 1995, s. 1–28.
- [72] 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.
- [73] 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.
- [74] 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.
- [75] 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.
- [76] SEDLÁČEK, J. *Nástroje pro obrábění kompozitních materiálů*. MM Průmyslové spektrum. Červen 2006, č. 6, s. 28-30. ISSN 1212-2572.
- [77] TETI, R. *Machining of Composite Materials*. CIRP Annals - Manufacturing Technology. 2002, roč. 51, č. 2, s. 611-634. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)61703-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0007-8506(07)61703-X).
- [78] *The next step in Composite Machining*, [online]. [vid. 2014-01-01]. Dostupné z: <http://www.myyellowcoat.com/featured-articles/composite-machining-milling>
- [79] *Wear Mechanisms of HSS Cutting Tools*, [online]. [vid. 2014-01-01]. Dostupné z: <http://www.gearsolutions.com/article/detail/5809/wear-mechanisms-of-hss-cutting-tools>
- [80] SEDLÁČEK, J. a J. SEDLÁK, *Opotřebení nástroje při vrtání kompozitních materiálů vyztužených skelnými vlákny*. CO-MAT-TECH 2006. Nezařazené články. Trnava. STU Bratislava, MTF Trnava, 2006. S. 1-11.

- [81] ILIESCU, D., D. GEHIN, I. IORDANOFF, F. GIROT a M. E. GUTIÉRREZ. *A discrete element method for the simulation of CFRP cutting*. Composites Science and Technology. 2010, č. 70, s. 73-80. DOI: 10.1016/j.compscitech.2009.09.007. Dostupné z: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0266353809003169>>
- [82] MILITKÝ, J. a J. VANÍČEK, *Ultimativní mechanické chování a porušení vláken*. Studijní opory pro podporu samostudia. TU Liberec, FT, Katedra textilních materiálů, 10 s. [online]. [vid. 2014-01-01]. Dostupné z: <<http://www.ft.vslib.cz/depart/ktm/files/20060106/VlastnostiVlaken-prednaska9.pdf>>.
- [83] WANG, X. M. a L. C. ZHANG. *An experimental investigation into the orthogonal cutting of unidirectional fibre reinforced plastics*. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2003, roč. 43, č. 10, 1015–1022. DOI: 0.1016/S0890-6955(03)00090-7. Dostupné z: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695503000907?np=y>>
- [84] CHINMAYA, R. D a C. S. YUNG. *Modeling of machining of composite materials: A review*. International Journal of Machine Tools & Manufacture. 2012, č. 57, s. 102-121. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2012.01.006.
- [85] 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.
- [86] *Katalog fréz firmy ZPS*. [online]. [vid. 2014-01-01]. Dostupné z: <<http://www.zps-fn.cz/katalog-frez/frezy-valcove-celni/freza-valcova-celni-kratka-1-zub-pres-stred-din-844-typ-n-rychllorezna-ocel-hsse-pm/>>
- [87] *Popis oceli 15 260*. [online]. [vid. 2014-01-01]. Dostupné z: <http://www.jkz.cz/produkty/ocel-k-zuslechtovani-15-260>

### **Autorovy publikace k danému tématu**

FIALA, Z. Vibrace při soustružení. In Vysoce přesné technologie obrábění. Programování moderních CNC strojů. 1. Brno: LITERA Brno, 2011. s. 13-20. ISBN: 978-80-214-4352- 5.

JAROŠ, A.; Z. FIALA a J. DVOŘÁČEK. Investigation of the influence of AlTiCrN coating for dry milling of construction steel 1. 8159. In Sborník příspěvků Mezinárodní Masarykovy konference pro doktorandy a mladé vědecké pracovníky 2012. 1. Hradec Králové: MAGNANIMITAS, 2012. s. 3475-3482. ISBN: 978-80-905243-3- 0.

FIALA, Z.; A. JAROŠ, a J. DVOŘÁČEK. An influence of tool wear on sound frequency of milling process. In Sborník příspěvků Mezinárodní Masarykovy konference pro doktorandy a mladé vědecké pracovníky 2012. 1. Hradec Králové: MAGNANIMITAS, 2012. s. 3483-3489. ISBN: 978-80-905243-3- 0.

PÍŠKA, M.; A. POLZER a Z. FIALA. On the effective milling of large workpieces. In Proceedings of the International Conference on Advanced Manufacturing Engineering and Technologies, NEWTECH 2013. 1. Stockholm, Sweden: Universitetservice US AB, 2013. s. 149-158. ISBN: 978-91-7501-892- 8.

FIALA, Z.; A. JAROŠ a M. SLANÝ. Vývoj měrné řezné síly s rozvíjejícím se opotřebením řezného nástroje. In MMK 2013. Hradec Králové: Magnanimitas, 2013. s. 3429-3438. ISBN: 978-80-87952-00- 9.

JAROŠ, A. a Z. FIALA. Porovnání povlakovaných a nepovlakovaných VBD pro čelní frézování zušlechtnuté oceli. In MMK. 1. Hradec Králové: Magnanimitas, 2013. s. 3225-3232. ISBN: 978-80-87952-00- 9.

## Seznam použitých zkratk a symbolů

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
A	%	tažnost
a	-	konstanta
$A_{Di}$	mm <sup>2</sup>	jmenovitý průřez třísky
$a_e$	mm	radiální šířka záběru ostří
$a_p$	mm	šířka záběru
$b_i$	mm	šířka třísky
$C_{FC}$	MPa	materiálová konstanta
CNC	-	číslicové řízení (Computer Numerical Control)
CVD	-	chemická depozice z plynné fáze (Chemical Vapor Deposition)
D	mm	průměr
DF	Hz	dominantní frekvence
DLC	-	polykrystalický diamant (Polycrystalline Diamond)
E	MPa	modul pružnosti
EP	-	epoxydy
F	N	celková síla – výslednice sil
f	Hz	frekvence
$F_c$	N	řezná síla
$F_{cw}$	N	řezná síla od opotřebeného břítu
$F_{dyn}$	N	dynamická síla
FFT	-	Rychlá Fourierova transformace (Fast Fourier Transform)
$F_{fw}$	N	posuvová síla od opotřebeného břítu
$f_{ch}$	Hz	frekvence chvění
$F_p$	N	pasivní síla
FRF	-	frekvenční přenosová funkce (Frequency Response Function)
$F_{sh}$	N	tečná složka výsledného silového zatížení v rovině maximálních smykových napětí
$F_{shN}$	N	normálová složka výsledného silového zatížení v rovině maximálních smykových napětí
$F_{stat}$	N	statická síla
$F_w$	N	celkový přírůstek síly od opotřebeného břítu
$F_{x1M}$	N	měřená složka silového zatížení – osa x

$F_{y1M}$	N	měřená složka silového zatížení – osa y
$f_z$	mm	posuv na zub
$f_z$	Hz	zubová frekvence
$F_{z1M}$	N	měřená složka silového zatížení – osa z
$f_{zu}$	Hz	zubová frekvence
$F_Y$	N	tečná složka výsledného silového zatížení na čele nástroje
$F_{Yn}$	N	normálová složka výsledného silového zatížení na čele nástroje
$G(f)$	$\mu\text{m/N}$	frekvenční přenosová funkce
$G_0^{\text{neg}}$	mm/N	negativní část přenosové funkce
$H(f)$	mm/N	imaginární část přenosové funkce
$h_i$	mm	tloušťka třísky
HSS	-	rychlěžná ocel (High Speed Steel)
Int.	Hz	intenzita
k	-	konstanta, harmonické násobky
$k_c$	MPa	měrná řezná síla
$k_{c11}$	mm	měrná řezná síla v závislosti pro $a_p=1\text{ mm}$ a $h=1\text{ mm}$
$k_{Ff}$	MPa	materiálová konstanta
$k_{Fp}$	MPa	materiálová konstanta
KT	mm	hloubka výmolu na čele
$K_v$	J	nárazová práce
$m_c$	-	materiálová konstanta
n	1/min	otáčky
PKD	-	polykrystalický diamant
PP	-	termoplast polypropylen
Pr	-	základní rovina
PVD	-	fyzikální metoda depozice vrstev (Physical Vapor Deposition)
Re	MPa	mez kluzu
UP	-	nenasyčené polyestery

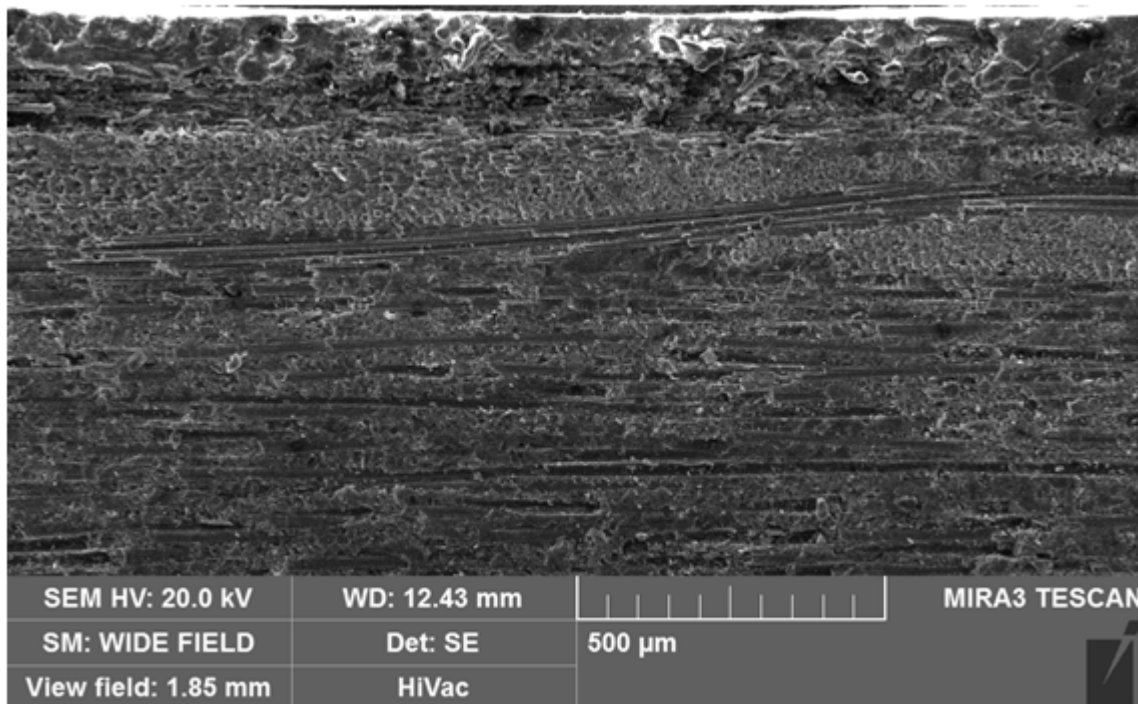
## Seznam příloh

- Příloha 1 Obr. povrchů obrobených ploch při obrábění sklo-polyesterového kompozitního materiálu s úhlem nastavení vláken 0° a 90°.
- Příloha 2 Obr. povrchů obrobených ploch při obrábění uhlíko-epoxidového kompozitního materiálu s úhlem nastavení vláken 0° a 90°.
- Příloha 3 Typy povlaků nabízené firmou LISS a.s.

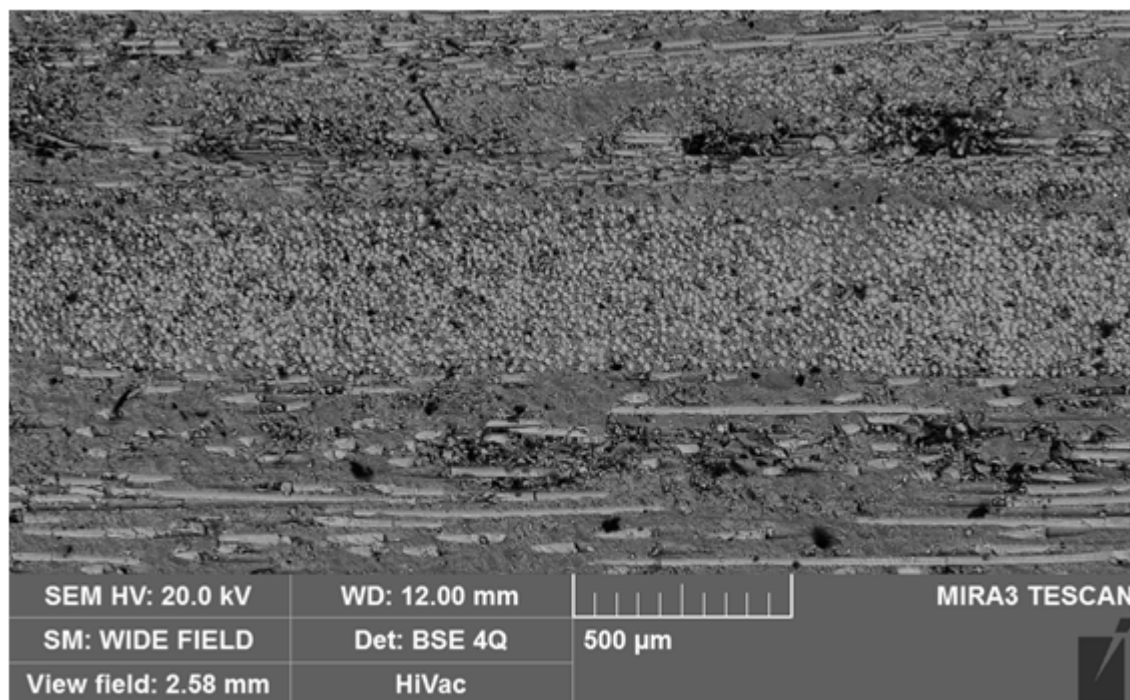
Příloha 1 Obr. povrchů obrobených ploch při obrábění sklo-polyesterového kompozitního materiálu s úhlem nastavení vláken  $0^\circ$  a  $90^\circ$ .



Drážka vyfrézovaná při nastavení orientace vláken ve směru posuvové rychlosti.



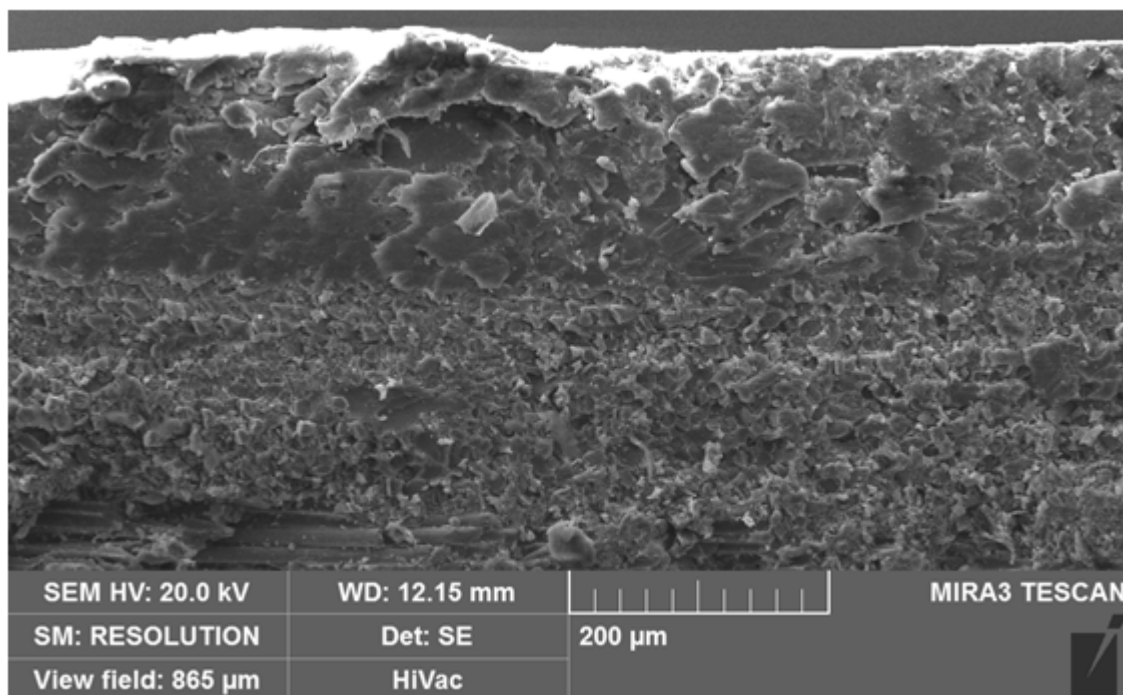
První vrstvy stěny vyfrézované drážky (obalová fólie a skelná vlákna v polyesterovém pojivu) při nastavení orientace vláken ve směru posuvové rychlosti.



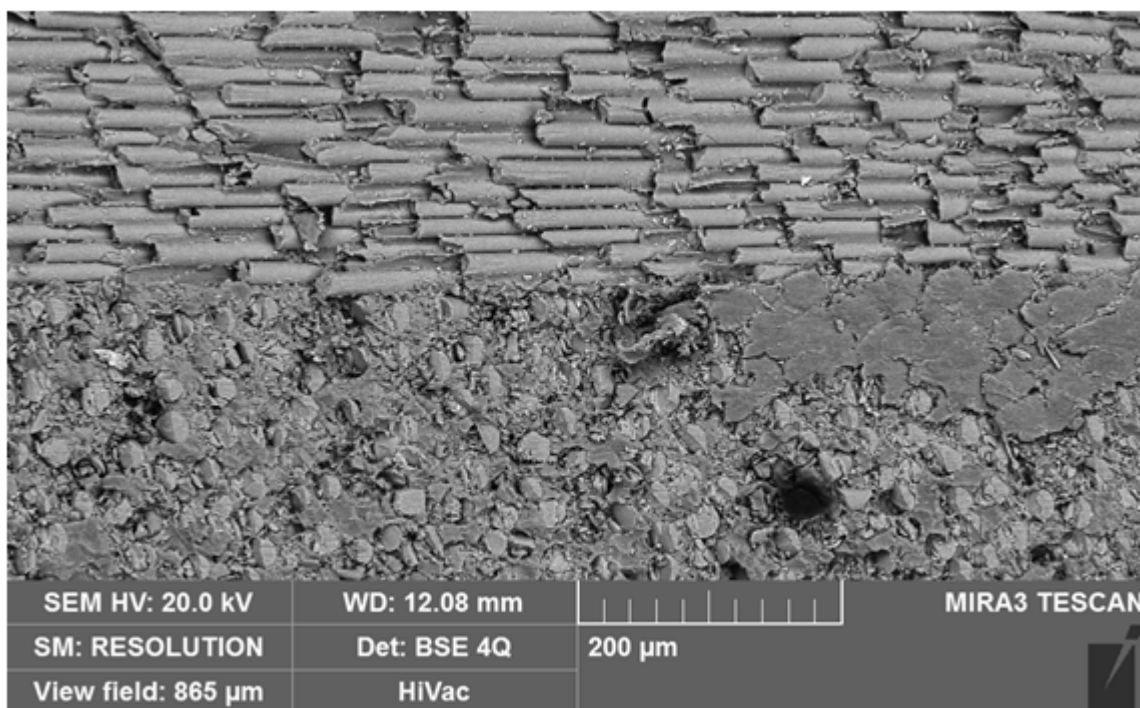
Vrstva rovingu mezi skelnými vlákny v polyesterovém pojivu na stěně vyfrézované drážky při nastavení orientace vláken ve směru posuvové rychlosti.



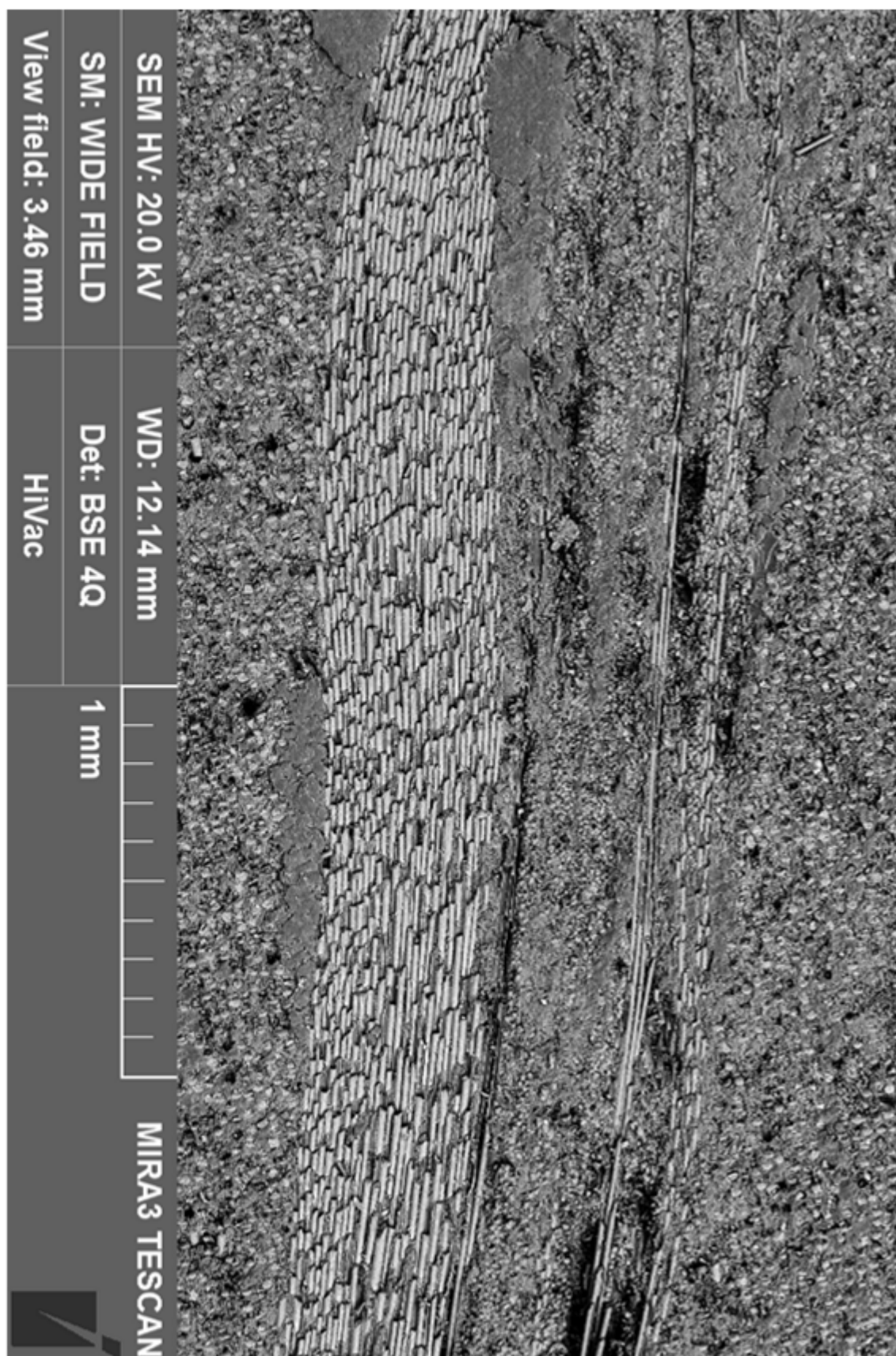
Drážka vyfrézovaná při nastavení orientace vláken kolmo na směr posuvové rychlosti.



První vrstvy stěny vyfrézované drážky (obalová fólie a skelná vlákna v polyesterovém pojivu) při nastavení orientace vláken kolmo na směr posuvové rychlosti.

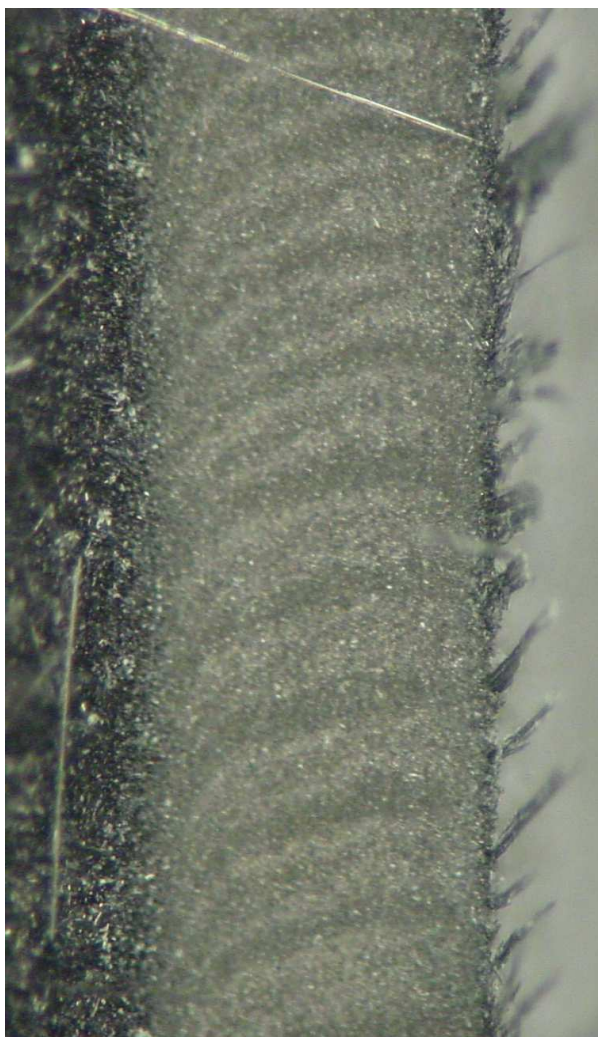


Přechod mezi vrstvou rovingu a skelnými vlákny v polyesterovém pojivu na stěně vyfrézované drážky při nastavení orientace vláken kolmo na směr posuvové rychlosti.



Vrstva rovingu mezi skelnými vlákny v polyesterovém pojivu na stěně vyfrézované drážky při nastavení orientace vláken kolmo na směr posuvové rychlosti.

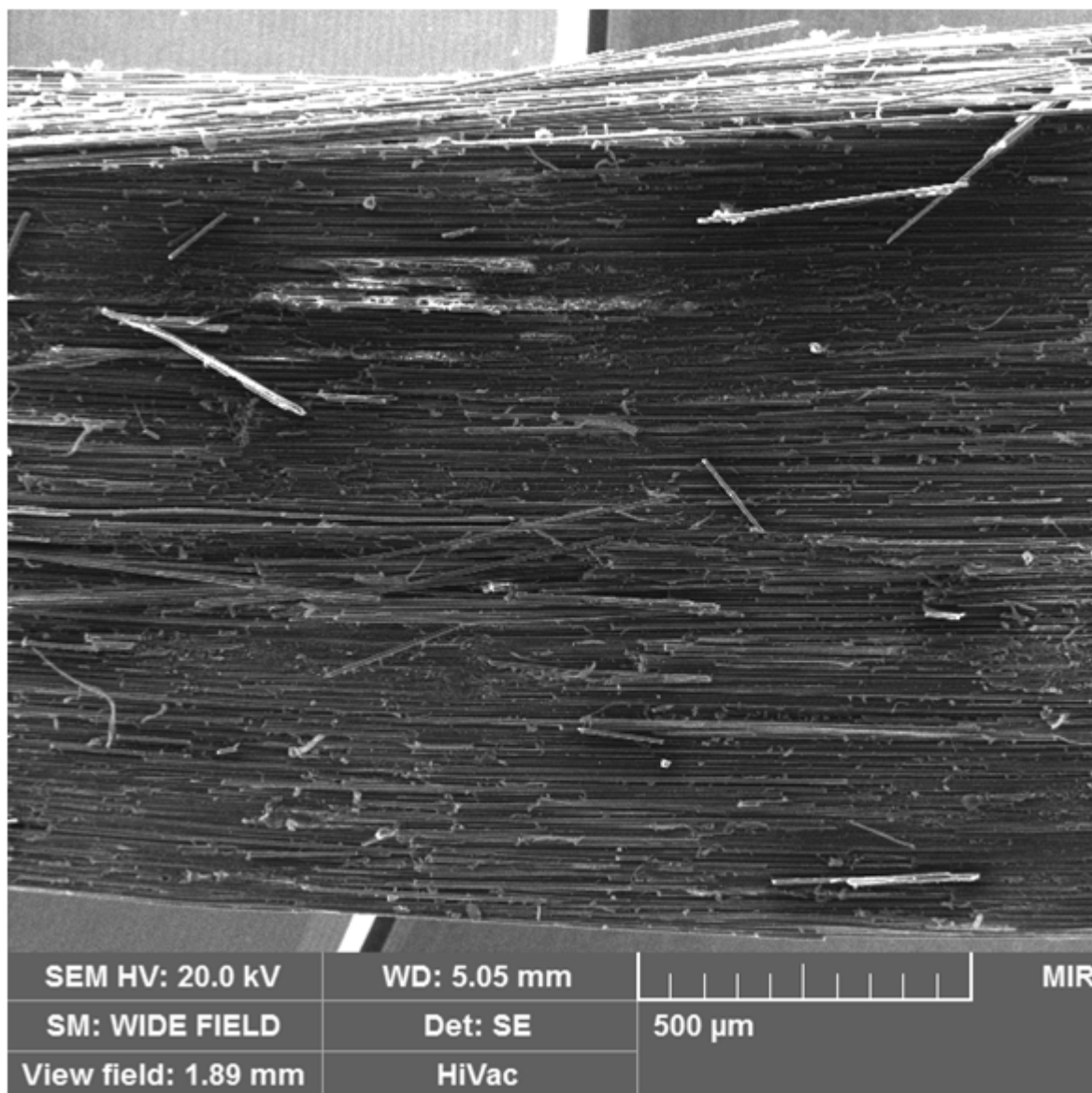
Příloha 2 Obr. povrchů obrobených ploch při obrábění uhlíko-epoxidového kompozitního materiálu s úhlem nastavení vláken  $0^\circ$  a  $90^\circ$ .



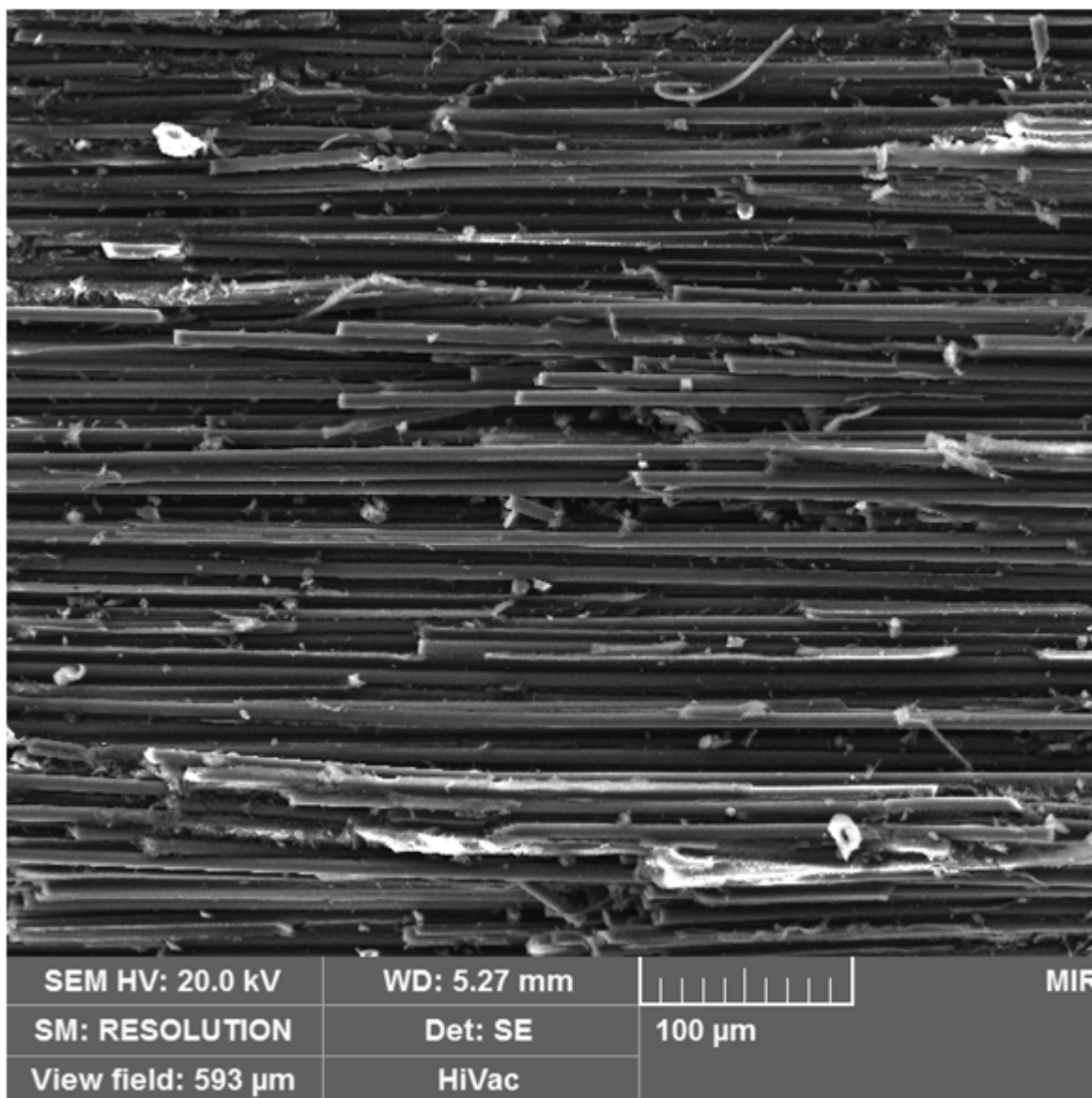
Plocha obrobená při nastavení orientace vláken kolmo na směr posuvové rychlosti.



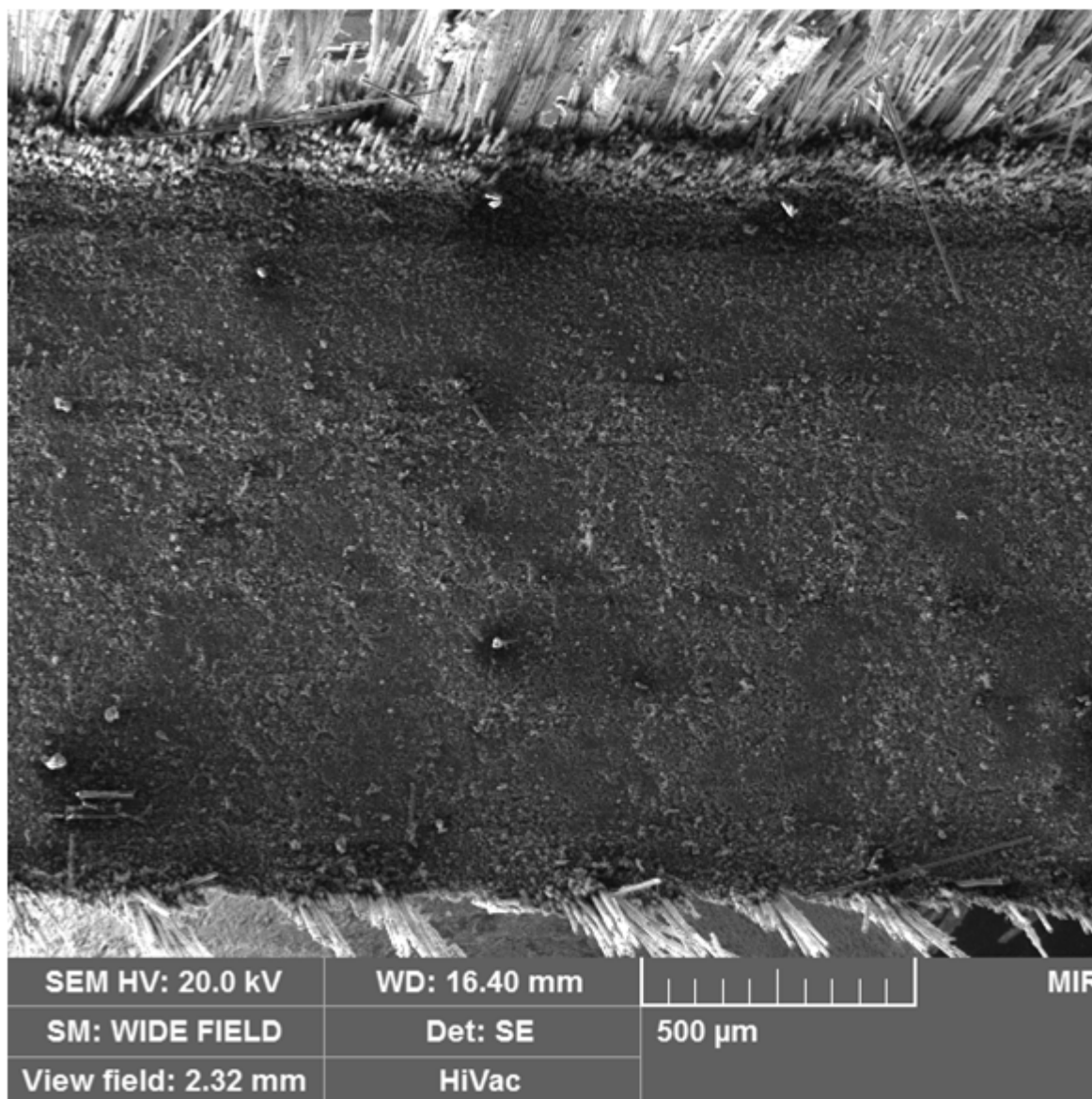
Plocha obrobená při nastavení orientace vláken ve směru posuvové rychlosti



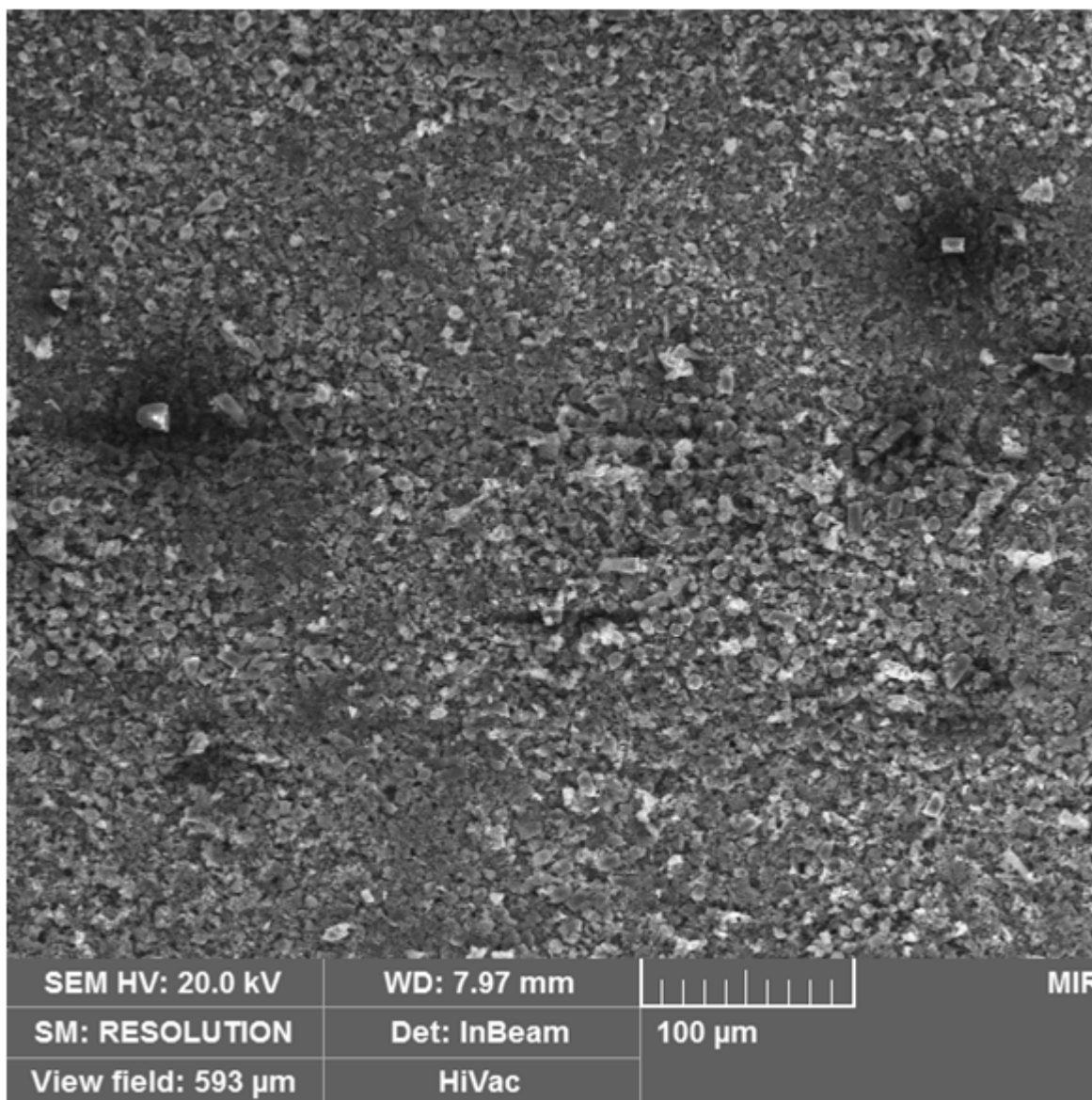
Plocha obrobená při nastavení orientace vláken ve směru posuvové rychlosti



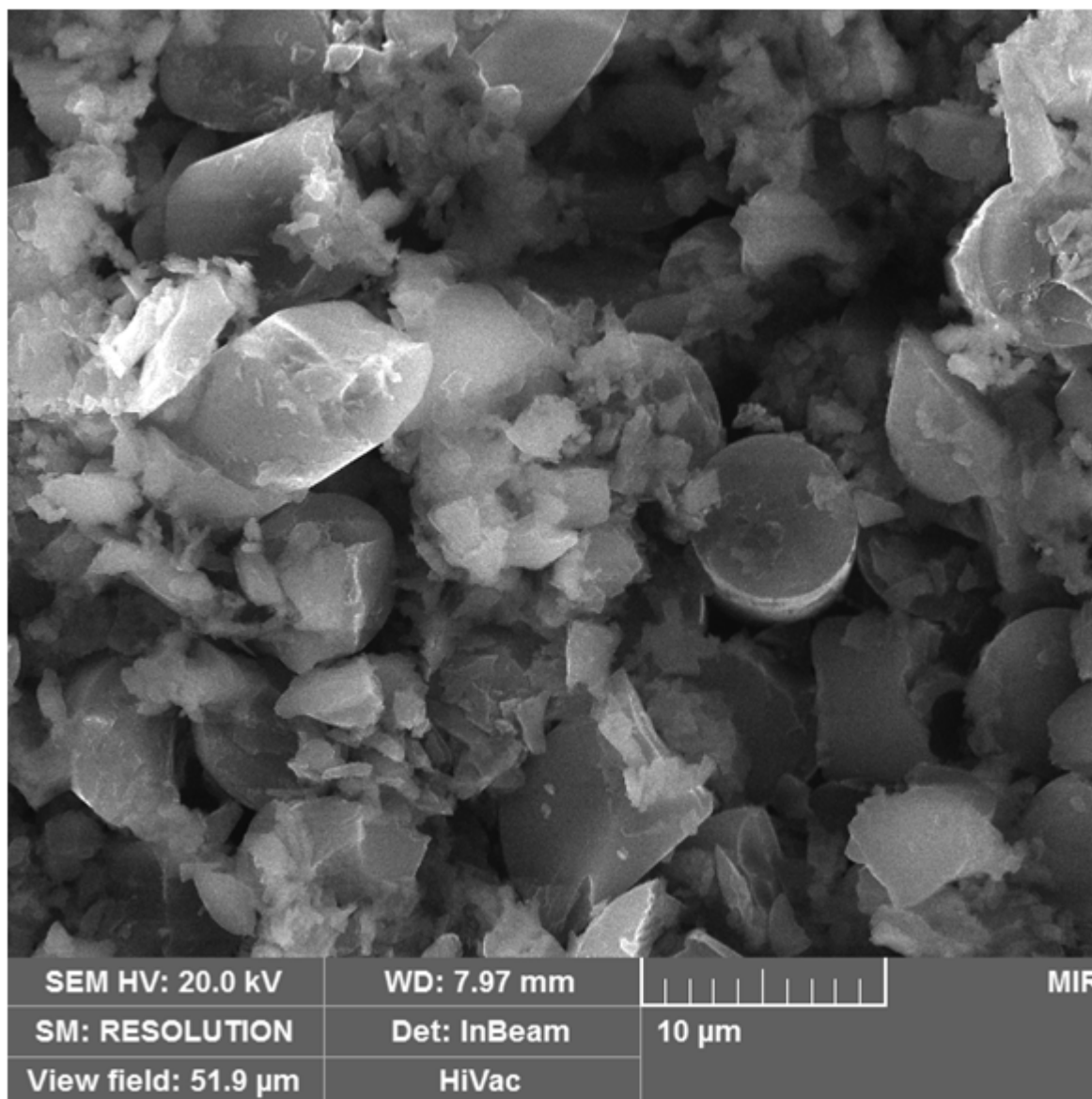
Plocha obrobená při nastavení orientace vláken ve směru posuvové rychlosti



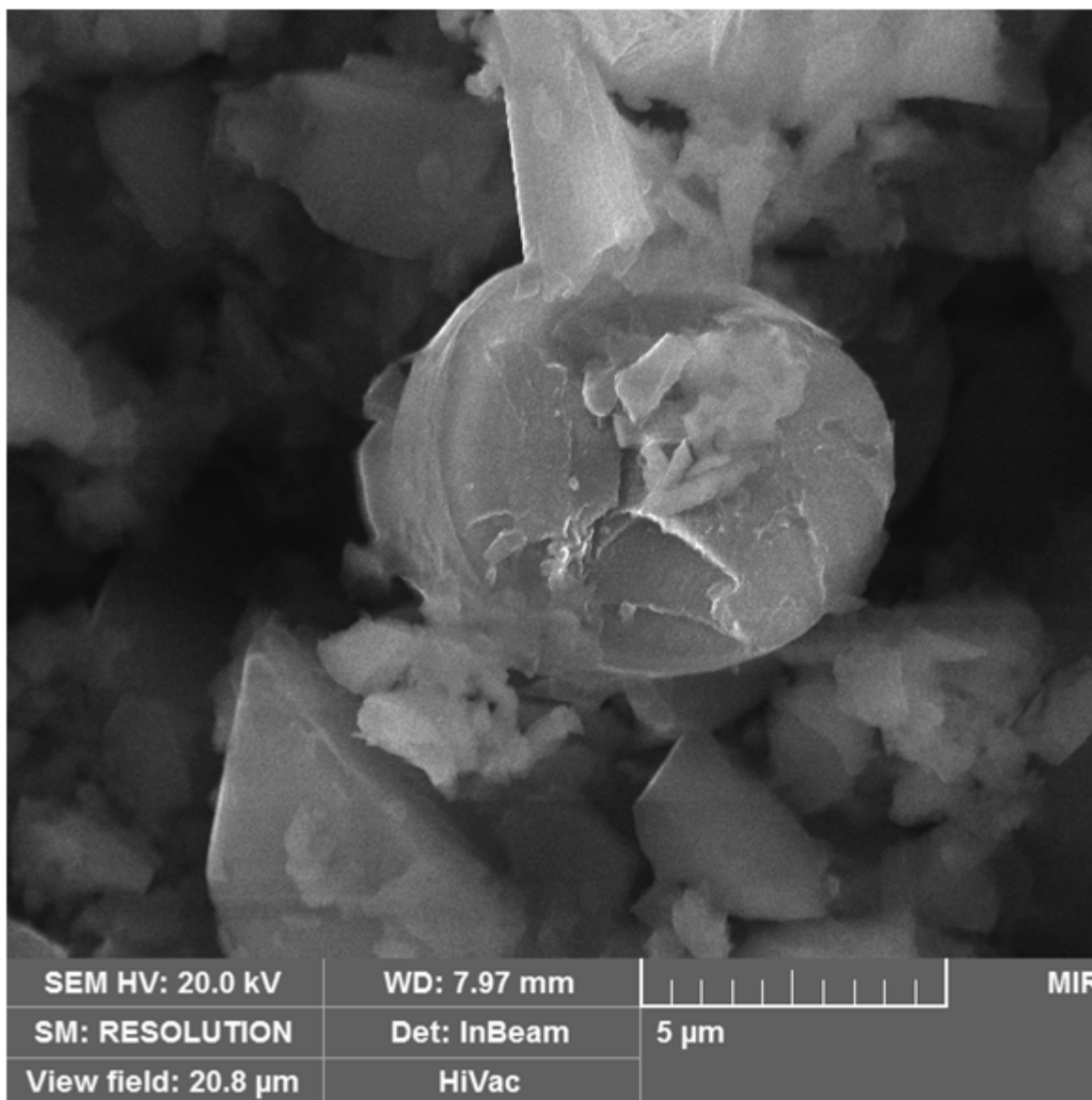
Plocha obrobená při nastavení orientace vláken kolmo na směr posuvové rychlosti



Přerušená vlákna při nastavení orientace vláken kolmo na směr posuvové rychlosti



Přerušená vlákna při nastavení orientace vláken kolmo na směr posuvové rychlosti



Přerušená vlákna při nastavení orientace vláken kolmo na směr posuvové rychlosti

Příloha 3 Typy povlaků nabízené firmou LISS a.s.

Typ vrstvy	Složení	Barva	Tloušťka μm	Tvrdość [GPa]	Max. teplota použití	Koeficient tření proti oceli
TiCN MP	TiCN multi	bronzově hnědá	1-4	33	400	0,2
TiCN	TiCN	šedá	1-4	37	400	0,2
TiN	TiN	zlatá	1-7	25	600	0,55
CrN	CrN	stříbrně šedá	1-4/10	18	700	0,3
TiAlN	TiAlN multi	fialová	1-4	30	800	0,4
AlTiN	AlTiN	černá	1-4	38	800	0,7
(AlTiCr)N	(AlTiCr)N	tmavě šedá	1-4	40	900	0,55
CrTiN	CrTiN	zlatá	1-4	30	600	0,4
AlXN3	---	černá	3-5	32	1000	0,4
cVIc	TiCN / DLC	černo šedá	1-3	37	450	0,15
CROMVIc2	CrN / DLC2	černá	1-5	25	700/450	0,1
nACo	---	fialově modrá	1-4	45	1200	0,45
nACRo	---	modro šedá	1-4	40	1100	0,35
DLC	---	černá	1	18	400	0,15
DLC2	---	černá	1-3	25	450	0,1
MoS2	MoS2	černá	0,5-1	-	400	0,1
nACo3	TiN+AlTiN+ AlTiSiN	fialově modrá	1-4	45/34	1200/900	0,45