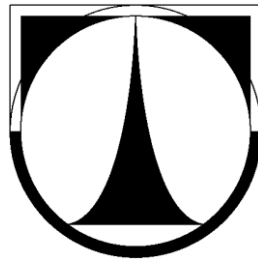


TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní



Disertační práce

Výzkum sil na hřbetu řezného nástroje

2015

Ing. Andrey Dugin

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Katedra obrábění a montáže

Disertační práce

k získání akademického titulu Doktor (Ph. D.)

ve studijním oboru

Strojírenská technologie

Výzkum sil na hřbetu řezného nástroje

Study of ploughing forces on the flank face of cutting tools

Dissertation Thesis

Ing. Andrey Dugin

Školitel: prof. Ing. Alexey Popov, DrSc.

Vedoucí katedry: doc. Ing. Jan Jersák, CSc.

Studijní program: P2303 Strojírenská technologie

Studijní obor: 2303V002 Strojírenská technologie

Studijní zaměření: Obrábění a montáž

Rozsah práce a příloh:

Počet stran 87

Počet obrázků 48

Počet tabulek 4

Počet příloh 6

Anotace

Disertační práce se zabývá výzkumem sil na hřbetu řezného nástroje, jmenovitě zvýšením přesnosti stanovení těchto sil. Vědecky zdůvodňuje použití již existujících a také nově navržených metod, jejich stanovení při obrábění různých druhů materiálů, a hodnotí vliv hlavních řezných podmínek na ně.

Experimentálnímu výzkumu, využitého k formulaci závěrů, předchází rešerše teoretických poznatků spojených s procesy na hřbetu řezného nástroje a poměry sil na hřbetu při jejich stanovení.

Pro vlastní experimenty bylo použito měření sil při ortogonálním obrábění, umožňující aplikaci různých metod stanovení sil na hřbetu. Porovnání stanovených hodnot těchto sil potvrdilo rozpor mezi již existujícími metodami a ujasnilo potřebu v navrhování přesnějších metod založených na jiných principech. Nově navržené metody umožňují přesnější stanovení sil na hřbetu nástroje v závislosti na řezných podmínkách.

Klíčová slova

Sila na hřbetu, opotřebení na hřbetu, ortogonální obrábění, řezný podmínky

Annotation

Dissertation is focused on study of ploughing forces on the flank face of cutting tools, specifically on the increasing of accuracy these forces, scientifically proving the usage of existing and proposed methods of the ploughing forces determination during the machining of different material, and also on the estimation of cutting conditions on ploughing forces influence.

Experimental study that was used for conclusions precedes the study of theoretical knowledge about processes on the flank face of cutting tool and relations between different methods of the ploughing forces determination. Differences between the methods and the use of the methods with different conditions are analyzed also.

The orthogonal cutting was used for the measurement of cutting forces during the experiments, different methods of the ploughing forces determination and the cutting fluid influence was studied. The comparisons of determined ploughing forces confirmed the existing differences between the existing methods and clarify the need of the creation of more accurate methods based on other principles. Proposed methods allow of the ploughing forces determination more accurate and allow the study of ploughing forces on cutting conditions influences: depth of cutting and flank wear. The proposed methods even allow the ploughing forces determination during the cutting of materials, which, the ploughing forces determination was not possible earlier.

Key words

Ploughing forces, flank wear, orthogonal cutting, cutting conditions

Prohlášení o původnosti disertační práce

Prohlašuji, že jsem disertační práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci, 15.06.2015

.....
Andrey Dugin

Prohlášení k využívání výsledků disertační práce

Byl jsem seznámen s tím, že na mou disertační práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. O právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé disertační práce a prohlašuji, že souhlasím s případným užitím mé disertační práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem se vědom toho, že užití své disertační práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

V Liberci, 15.06.2015

.....
Andrey Dugin

Poděkování

Chtěl bych poděkovat svému školiteli panu prof. Ing. Alexeyi Popovovi, DrSc. za pomoc při vypracování disertační práce. Ještě chtěl bych poděkovat panu prof. Ing. Petru Loudovi, CSc. a panu doc. Ing. Miroslavu Malýmu, CSc. za podporu během mého studia.

Děkuji také všem kolegům z Katedry obrábění a montáže, kteří mi pomohli při řešení této práce, zejména panu doc. Ing. Karlu Dušákovi, CSc. a panu doc. Ing. Janu Jersákovi, CSc. Dále děkuji panu Ing. Jaroslavu Votočkovi, panu Ing. Milanu Ledvinovi, panu Ing. Jiří Karáskovi a panu Martinu Kordíkovi za pomoc při provádění experimentů v rámci řešení této prací. Zvláštní poděkování patří pani Ing. Štěpánce Dvořáčkové, Ph.D. a panu prof. Ing. Nikolaji Ganevovi, CSc. a panu Ing. Kamilu Kolaříkovi, Ph.D. za odbornou a morální podporu.

Andrey Dugin

OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	10
1. ÚVOD A CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	11
2. METODA EXPERIMENTÁLNÍHO STANOVENÍ SIL NA HŘBETU ŘEZNÉHO NÁSTROJE	13
2.1 Řezné síly na hřbetu řezného nástroje	13
2.2 Stanovení sil na hřbetu řezného nástroje metodou extrapolace na nulovou šířku záběru	17
2.3 Stanovení sil na hřbetu řezného nástroje metodou porovnání sil pro různé šířky opotřebení na hřbetu	18
2.4 Metodika experimentálního stanovení sil na hřbetu řezného nástroje	20
3. ZJIŠTĚNÍ VLIVU PROCESNÍ KAPALINY NA SÍLY NA HŘBETU NÁSTROJE	29
3.1 Vliv procesních kapalin na síly při obrábění	29
3.2 Experimentální stanovení sil na hřbetu řezného nástroje	30
3.3 Výsledky experimentů a jejich analýza	31
3.4 Závěr	38
4. STANOVENÍ SIL NA HŘBETU NOVOU METODOU POROVNÁNÍ SIL PRO RŮZNÉ ŠÍŘKY KONTAKTU NA HŘBETU	39
4.1 Experimentální stanovení sil na hřbetu řezného nástroje	39
4.2 Výsledky experimentů a jejich analýza	42
4.3 Metoda porovnání sil pro různé šířky kontaktu hřbetu s obrobenou plochou	45
4.4 Experimentální stanovení sil na hřbetu řezného nástroje metodou porovnání sil pro různé šířky kontaktu hřbetu s obrobenou plochou	46
4.5 Výsledky experimentů a jejich analýza	50
4.6 Závěr	53
5. VLIV ŠÍŘKY ZÁBĚRU NA SÍLU NA HŘBETU	55
5.1 Experimentální stanovení sil na hřbetu řezného nástroje metodou porovnání sil pro různé šířky kontaktu na hřbetu	57
5.2 Výsledky experimentů a jejich analýza	58
5.3 Závěr	61
6. METODA STANOVENÍ SIL NA HŘBETU ŘEZNÉHO NÁSTROJE PRO MATERIÁLY MÉNĚ PLASTICKY DEFORMOVATELNÉ	63
6.1 Nová metoda pro stanovení sil na hřbetu řezného nástroje pro materiály méně plasticky deformovatelné	67



6.2	Ověření nové metody stanovení sil na hřbetu řezného nástroje pro materiály méně plasticky deformovatelné	73
6.3	Výsledky experimentů a jejich analýza	76
6.4	Závěr	77
7.	ZÁVĚRY	79
8.	POUŽITÁ LITERATURA	81
9.	SEZNAM PUBLIKOVANÝCH PRACÍ	85
10.	SEZNAM PŘÍLOH	88

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

v_c	řezná rychlost	[m·min ⁻¹]
v_f	rychlost posuvu	[m·min ⁻¹]
v_e	rychlost výsledného řezného pohybu	[m·min ⁻¹]
F_c	hlavní složka řezné síly	[N]
F_p	pasivní (posuvová) složka řezné síly	[N]
R	výsledná řezná síla	[N]
F_y	vertikální složka výsledné řezné síly	[N]
F_z	horizontální složka výsledné řezné síly	[N]
γ_o	nástrojový ortogonální úhel čela	[°]
α_o	nástrojový ortogonální úhel hřbetu	[°]
a_p	šířka (hloubka) záběru	[mm]
F_N'	vertikální složka síly na hřbetu řezného nástroje	[N]
F_t'	horizontální složka síly na hřbetu řezného nástroje	[N]
F'	výsledná síla na hřbetu řezného nástroje	[N]
VB	šířka opotřebení na hřbetu nástroje	[mm]
S_j	výběrová směrodatná odchylka	[1]
δ_j	statistický interval spolehlivosti	[1]
$t_{\alpha, n-1}$	hodnotu kritického rozdělení	[1]
n	počet experimentů	[1]
α	hodnota určitého rozdělení	[1]
RC	šířka reálního kontaktu hřbetu řezného nástroje s obrobenou plochou	[mm]
X	měrná řezná síla na hřbetu	[N·mm ⁻¹]

1. ÚVOD A CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Síly na čele řezného nástroje se účastní procesu tvorby třísky. Oproti tomu síly na hřbetu řezného nástroje se procesu tvorby třísky neúčastní, vznikají v důsledku pružné reakce obráběného materiálu na hřbet nástroje.

V současnosti není výzkumu sil na hřbetu řezného nástroje věnována patřičná pozornost protože tyto síly jsou ve srovnání ze silami na čele nástroje malé, takže jejich výzkum se zdá jen teoreticky zajímavý, ale nikoli prakticky významný. Je však třeba si uvědomit, že tomu tak je v případě, kdy šířka záběru (hloubka řezu) je poměrně velká a opotřebení nástroje na hřbetu poměrně malé a že časté jsou i případy, kdy opotřebení nástroje je velké a tento mnohdy pracuje s malou šířkou záběru (nástroje pro mikroobrábění, protahovací trny, frézy). Kromě toho objem mikroobrábění roste, a objem obrábění na čisto, které se provádí s malými hloubkami záběru výrazně převyšuje objem obrábění hrubovacího. Proto výzkum sil působících na hřbetu řezného nástroje má nejen teoretický, nýbrž i praktický význam.

Zkoumání sil na hřbetu má velký praktický význam pro mikroobrábění, kdy šířka záběru je malá (0,005 až 0,1 mm) a opotřebení nástroje velké (0,03 až 0,3 mm). Jako příklad praktického použití znalosti sil na hřbetu může sloužit zpřesnění výpočtu nástroje pro mikrofrézování frézou o poloměru 0,05 až 0,3 mm, která má malou tuhost. Přesné stanovení a analýza sil působících v procesu řezání, tedy i síly na hřbetu jsou nutné pro aplikaci adaptivních systémů řízení CNC strojů při obrábění malých, málo tuhých a tvarově složitých součástí (např. lopatek turbin) a také při procesu monitorizace řezného nástroje při mikroobrábění.

Výroba aktuálně požadovaných nástrojů pro mikroobrábění a také mikrorozměrových detailů samotných není možná bez znalosti sil na hřbetu, ta podmiňuje výzkum metod jejich stanovení a nutně i procesů odehrávajících se při obrábění na hřbetu nástroje.

Proto hlavním cílem této disertační práce je zvýšení přesnosti stanovení sil na hřbetu, vědecké zdůvodnění použití již existujících a také v této práci poprvé popsanych metod stanovení těchto sil při obrábění různých skupin materiálů, a vlivu hlavních řezných podmínek na ně.

Pro dosažení tohoto cíle disertační práce je nutno řešit následující:

1. Určit vliv procesní kapaliny na síly na hřbetu. Zejména zdůvodnit příčiny zvětšení výsledné řezné síly při obrábění s malými šířkami záběru při použití procesní kapaliny.

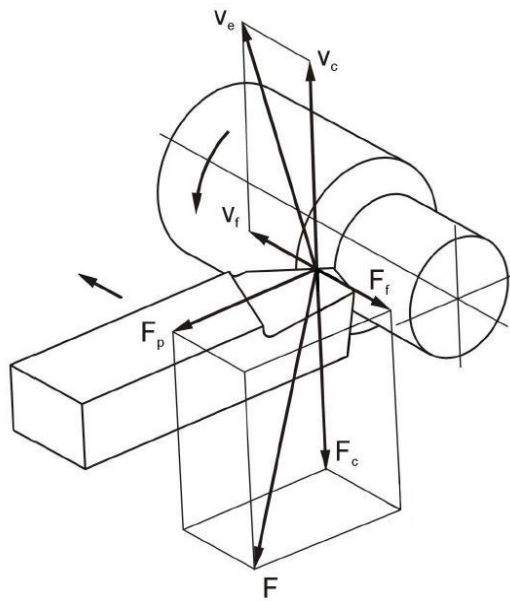


2. Vyvinout novou metodu stanovení sil na hřbetu přesnější v porovnání s již existující metodami.
3. Určit vliv šířky záběru na síly na hřbetu a ověřit tak vhodnost použití metody extrapolace na nulovou šířku záběru pro stanovení sil na hřbetu, založenou na předpokladu nezávislosti sil na hřbetu na šířce záběru.
4. Vyvinout metodu, která umožňuje spolehlivé stanovení sil na hřbetu při obrábění materiálů méně plasticky deformovatelné s vyšší přesností v porovnání s již existující metodami.

2. METODA EXPERIMENTÁLNÍHO STANOVENÍ SIL NA HŘBETU ŘEZNÉHO NÁSTROJE

2.1 Řezné síly na hřbetu řezného nástroje

V souladu s energetickou rovnováhou procesu obrábění, energie, kterou při obrábění dodáváme do technologické soustavy je využita k silovému působení nástroje na materiál obrobku, kterým je třeba překonat jeho odpor při oddělování třísky.



Obr. 2.1 Schéma sil při obrábění soustružnickým nožem

Na Obr. 2.1 je obecné schéma sil při obrábění soustružnickým nožem, kde je:

F_c - řezná síla,

F_f – posuvová síla,

F_p - pasivní síla,

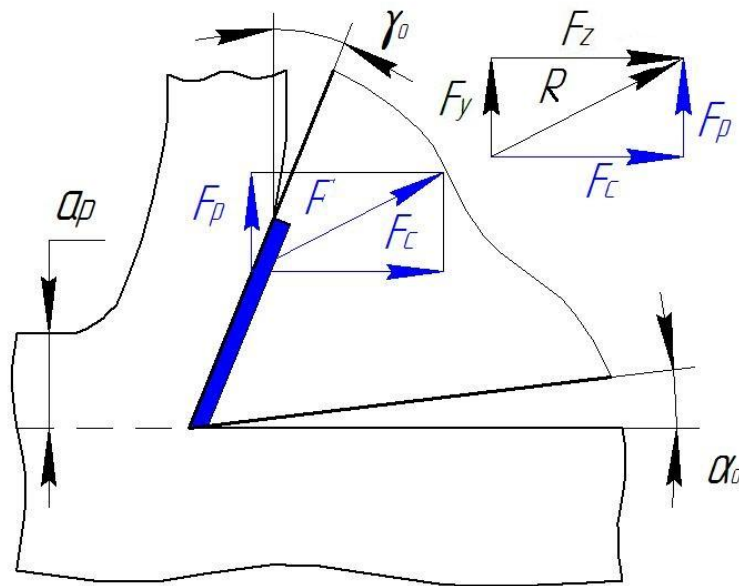
F - výsledná řezná síla,

v_c - řezná rychlost,

v_f - rychlost posuvu,

v_e - rychlost výsledného řezného pohybu (1, 2, 3, 4).

Na Obr. 2.2 je schéma sil při teoretickém volném ortogonálním 2D obrábění, kdy se předpokládá, že nástroj pracuje bez nárůstku a opotřebení, tříska se dotýká nástroje jen na jeho čele (5, 6, 7, 8, 9).



Obr. 2.2 Schéma sil při volném ortogonálním 2D obrábění

Ve schématu jsou:

F_c - hlavní složka řezné síly,

F_p - pasivní (posuvová) složka řezné síly,

R - výsledná řezná síla,

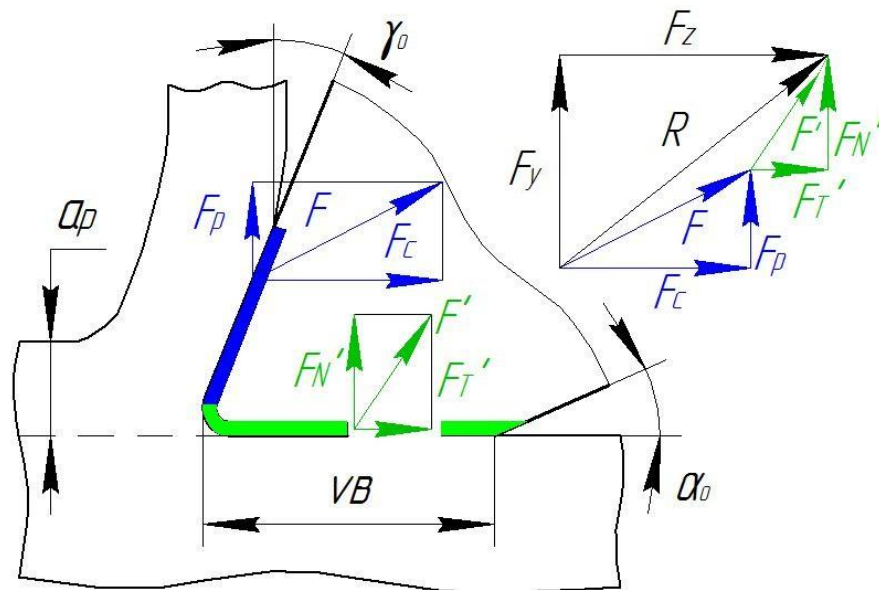
F_y, F_z - složky výsledné řezné síly,

γ_o - nástrojový ortogonální úhel čela,

α_o - nástrojový ortogonální úhel hřbetu,

a_p - šířka (hloubka) záběru.

Za přítomnosti nárůstku je nástroj v kontaktu s obráběným materiálem nejenom na čele, ale i na hřbetu. Na obou těchto plochách vznikají síly, které se uplatňují v procesu obrábění různě, jak patrně z Obr. 2.3 kde je schéma sil při volném ortogonálním 2D obrábění v praxi, nástroj pracuje s opotřebením a kontakt vzniká nejen mezi třískou a čelem nástroje, ale i mezi jeho hřbetem a obrobkem (10, 11, 12, 13, 16). V tomto případě, během obrábění je F výsledná síla na čele a F' je výsledná síla na hřbetu řezného nástroje.



Obr. 2.3 Schéma sil na při volném ortogonálním 2D obrábění v praxi

Ve schématu jsou:

F_c, F_p, F - síly na čele řezného nástroje,

F'_t, F'_N, F' - síly na hřbetu řezného nástroje,

R - výsledná řezná síla,

F_y, F_z - složky výsledné řezné síly,

VB - šířka opotřebení na hřbetu nástroje,

γ_o - nástrojový ortogonální úhel čela,

α_o - nástrojový ortogonální úhel hřbetu,

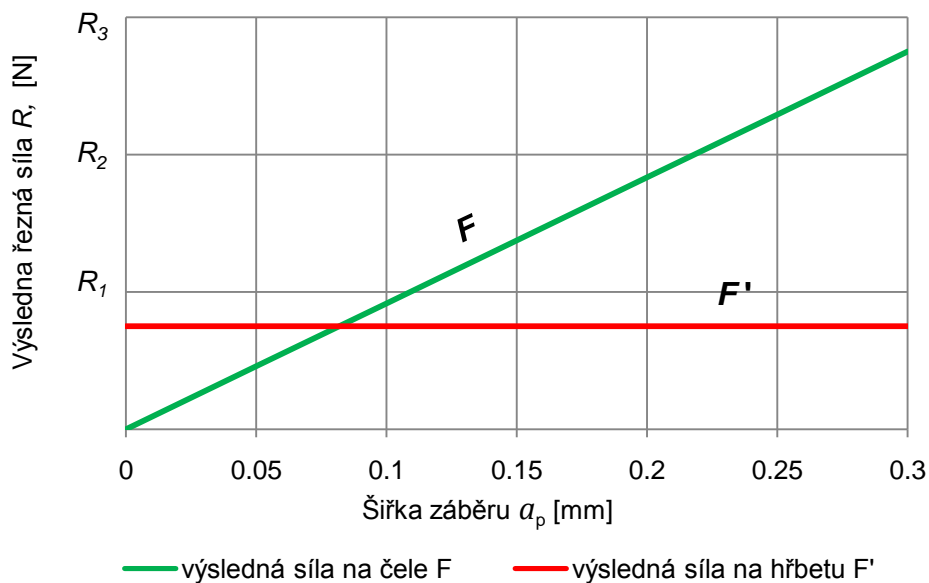
a_p - šířka (hloubka) záběru.

Síly na čele vytváří třísku. Síly na hřbetu nevytváří třísku a pouze způsobují pružnou deformaci vrstvy obráběného materiálu a představují tak pasivní odpory ztěžující práci nástroje.

Podle změny sil na hřbetu řezného nástroje lze usuzovat na vliv různých faktorů na podmínky kontaktu hřbetu řezného nástroje s obráběným materiálem. Principy zjišťování sil na hřbetu se značně liší od principů zjišťování sil na čele. To je dáno tím, že většinu faktorů procesu obrábění ovlivňují síly působící na hřbetu a na čele nástroje odlišně. Proto principy zjišťování sil na hřbetu řezného nástroje vyžadují zvláštní zkoumání.

Síly působící na čele a na hřbetu řezného nástroje se liší velikostí a směrem. Síly na hřbetu jsou zpravidla malé ve srovnání se silami na čele, proto při analýze rovnováhy sil působících v procesu obrábění je lze často zanedbat. Nicméně, v řadě případů tyto síly mohou být velké a někdy dokonce síly na čele převyšovat. V takových případech ani přibližná analýza rovnováhy sil působících v procesu obrábění není možná bez přihlédnutí k silám na hřbetu.

Zorjev (12, 13) při zkoumání sil na hřbetu zjistil, že síly na čele a na hřbetu jsou srovnatelné při šířce záběru $a_p < 0,3$ mm. To ilustruje i příslušný příklad na Obr. 2.4, ze kterého je patrné, že hodnota síly F' na hřbetu při šířce záběru 0 - 0,1 mm je vyšší než hodnota síly F na čele, ale při šířce (hloubce) záběru $a_p = 0,1 - 0,3$ mm je tomu naopak, proto při obrábění nástrojem s šířkou záběru menší než 0,3 mm, zanedbáním sil na hřbetu při stanovování celkové rovnováhy řezných sil při obrábění dochází k vážným chybám.

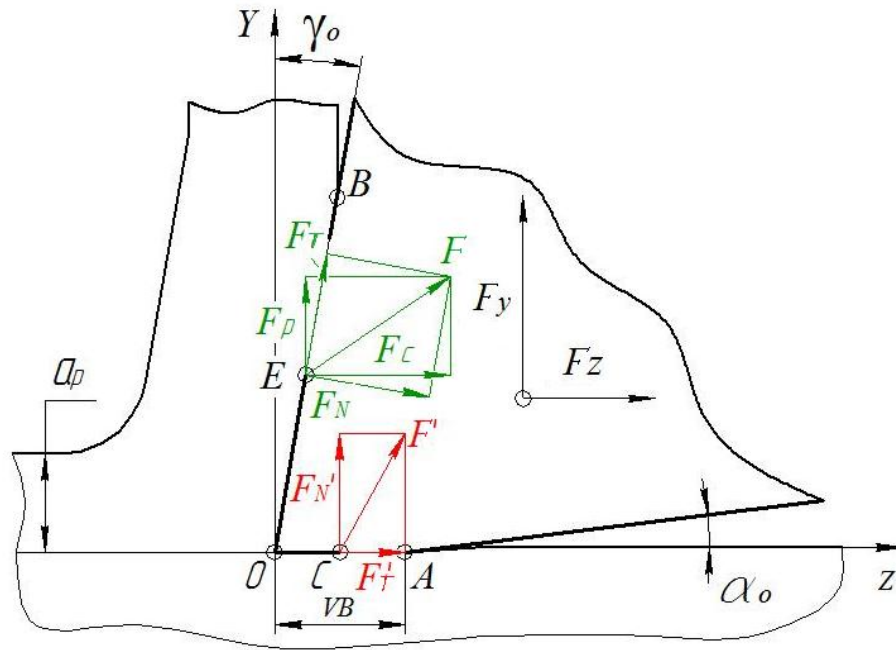


Obr. 2.4 Závislost síly na hřbetu a síly na čele nástroje na šířce záběru

Nejpoužívanější metody stanovení sil na hřbetu jsou metoda extrapolace na nulovou šířku záběru (1, 10, 12, 13, 15) a metoda porovnání sil pro různé šířky opotřebení na hřbetu (12, 13, 17, 18).

2.2 Stanovení sil na hřbetu řezného nástroje metodou extrapolace na nulovou šířku záběru

Podstata této metody spočívá v tom, že po získání několika hodnot výsledné síly při obrábění pro různé šířky záběru, jsou získané hodnoty extrapolovány na nulovou šířku záběru. Síla získaná extrapolací na osu, bude silou na hřbetu (12, 13).



Obr. 2.5 Schéma sil při volném ortogonálním 2D obrábění

Na Obr. 2.5 je zobrazeno čelo řezného nástroje OB na které působí normalová síla F_N a tangenciální síla F_T , jejich výslednice je F . Na hřbet OA působí normalová síla F'_N a tangenciální síla F'_T , jejich výslednice je F' . Výslednicí sil F a F' je řezná síla R (Obr. 2.3), její průměty do os y a z jsou (12, 13):

$$F_y = F_p + F_N \quad (3.1)$$

$$F_z = F_c + F'_T. \quad (3.2)$$

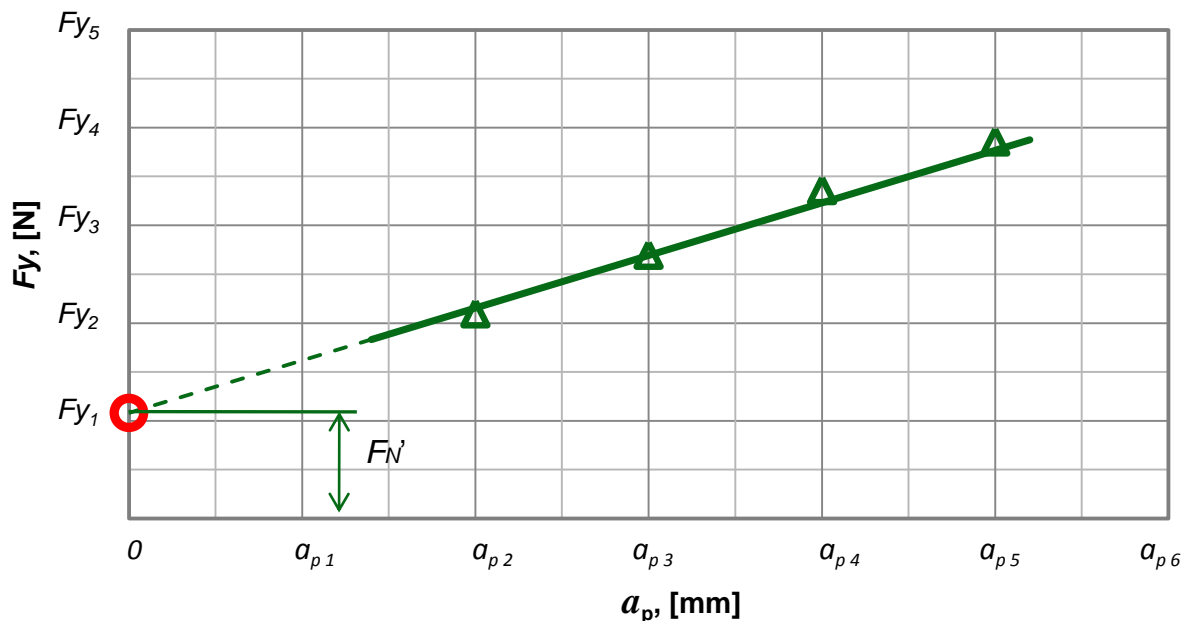
F_p , F_c - jsou průměty síly F do osy y a z .

Výsledná síla na čele F se zmenšuje při poklesu šířky záběru. Také síly F_p , F_c , F_T a F_N se budou zmenšovat s poklesem šířky záběru. Při snížení šířky záběru na nulu platí následující tvrzení:

$$F_{y \text{ } OA \rightarrow 0} = F'_N, \quad (3.3)$$

$$F_{z\ OA \rightarrow 0} = F_T' \quad (3.4)$$

Na Obr. 2.6 je zobrazen příklad stanovení normálové složky síly na hřbetu F_N' metodou extrapolace na nulovou šířku záběru. Normálová složka výsledné řezné síly obrábění F_y byla měřena pro šířky záběru $a_p = 0,05; 0,075; 0,1; 0,125$ mm při stejné šířce opotřebení na hřbetu nástroje VB. Získanými hodnotami sil lze proložit přímkou jejíž průsečík s osou y (červený bod) udává hledanou hodnotu normálové složky F_N' síly F' na hřbetu nástroje.



Obr. 2.6 Stanovení síly na hřbetu metodou extrapolace na nulovou šířku záběru při stejné šířce opotřebení na hřbetu VB

2.3 Stanovení sil na hřbetu řezného nástroje metodou porovnání sil pro různé šířky opotřebení na hřbetu

Tato metoda, navržená Zorevem (13) a pak Colwellem (17) je založena na předpokladu, že pokud jsou všechny podmínky obrábění konstantní a zvětšuje se pouze opotřebení na hřbetu nástroje, obvykle se proces tvorby třísky nemění. Proto se tedy síla působící na čele nástroje také nemění. Avšak protože kontaktní plocha mezi hřbetem nástroje a obrobenou plochou se zvětšuje, zvětšuje se i síla na hřbetu, a tím a výsledná řezná síla. Z tohoto důvodu by mělo být toto pozorované zvětšování výsledné síly považováno za důsledek zvětšování síly na hřbetu.

Podstata této metody tedy spočívá v tom, že zvýšení šířky opotřebení na hřbetu VB vede ke zvýšení výsledné řezné síly R díky zvýšení síly obrábění na hřbetu F' , přičemž se hodnota síly obrábění na čele F nemění (Obr. 2.7), tj.:

$$\Delta R = \Delta F', \quad (3.5)$$

$$\Delta F_y = \Delta F_y' = \Delta F_N', \quad (3.6)$$

$$\Delta F_z = \Delta F_z' = \Delta F_T'. \quad (3.7)$$

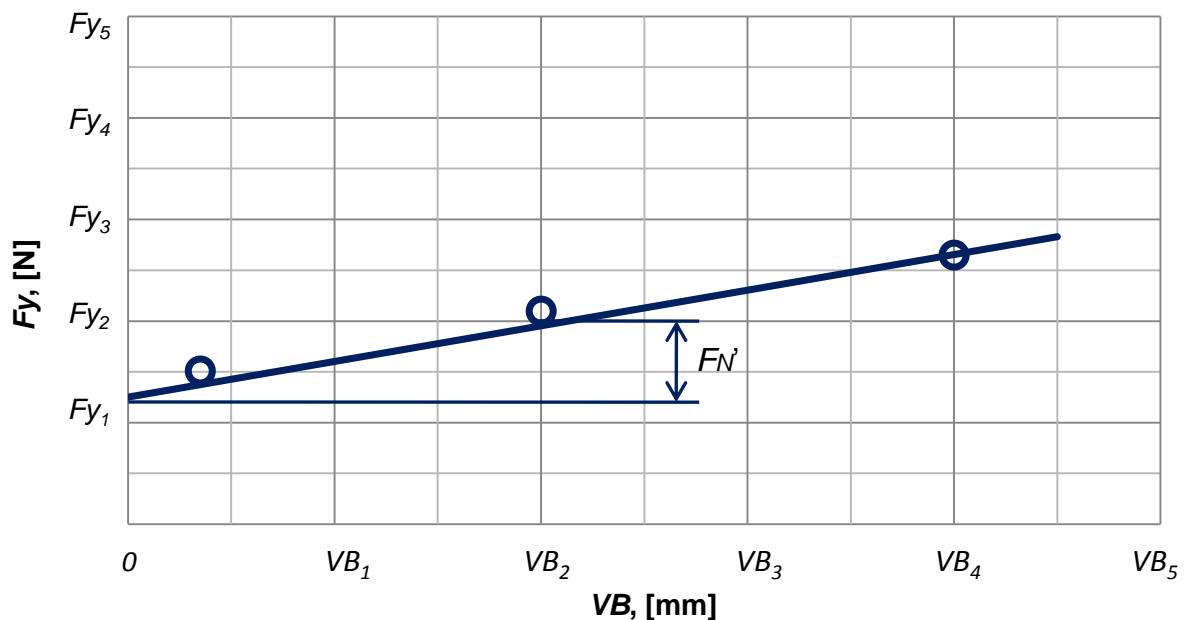
Hodnota síly na hřbetu F' je přímo úměrná šířce opotřebení na hřbetu VB . Poměr hodnoty síly na hřbetu F' a šířky opotřebení na hřbetu VB se rovná přírůstku hodnoty síly na hřbetu $\Delta F'$ k přírůstku šířky opotřebení na hřbetu ΔVB , tj. :

$$F' / VB = \Delta F' / \Delta VB, \quad (3.8)$$

$$\Delta F_N' = \Delta F_y' \cdot VB / \Delta VB, \quad (3.9)$$

$$\Delta F_T' = \Delta F_z' \cdot VB / \Delta VB. \quad (3.10)$$

Takže pro stanovení hodnot složek sil na hřbetu nástroje stačí zjistit složky výsledné řezné síly R při stejné šířce záběru pro tři různé šířky opotřebení na hřbetu nástroje (12, 13) jak patrně z Obr. 2.7

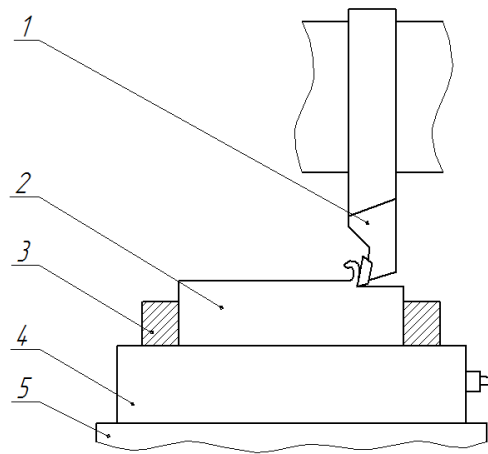


Obr. 2.7 Stanovení síly na hřbetu metodou porovnání sil pro různé šířky opotřebení na hřbetu při stejné šířce záběru a_p

2.4 Metodika experimentálního stanovení sil na hřbetu řezného nástroje

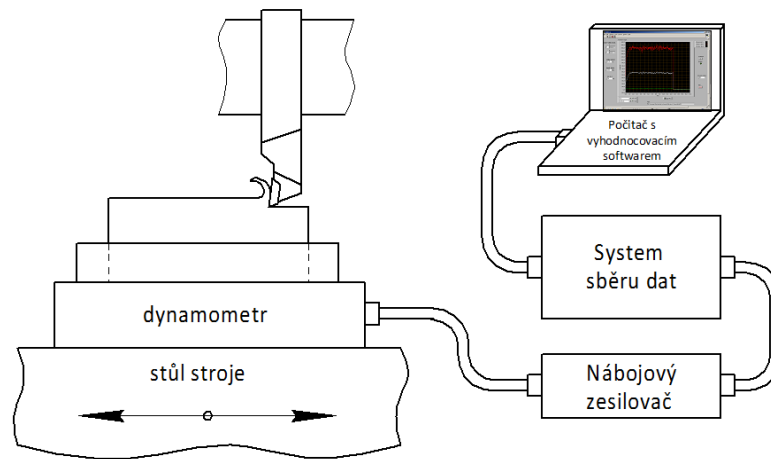
Pro experimentální stanovení sil na hřbetu řezného nástroje metodou extrapolace na nulovou šířku záběru a metodou porovnání sil pro různé šířky opotřebení na hřbetu byla navržena následující metodika.

Pro stanovení sil na hřbetu řezného nástroje uvedenými metodami je třeba zjistit experimentálním měřením složky F_y a F_z při různých šířkách záběru a při různých šířkách opotřebení nástroje na hřbetu dle schématu ortogonálního 2D obrábění. Návrh realizace experimentu byl determinován disponibilními prostředky laboratoře KOM. Měření sil se provádělo při hoblování, příslušné schéma je na Obr. 2.8, kde značí : 1 – nástroj, 2 – obrobek, 3 – přípravek, 4 – dynamometr, 5 – stroj.

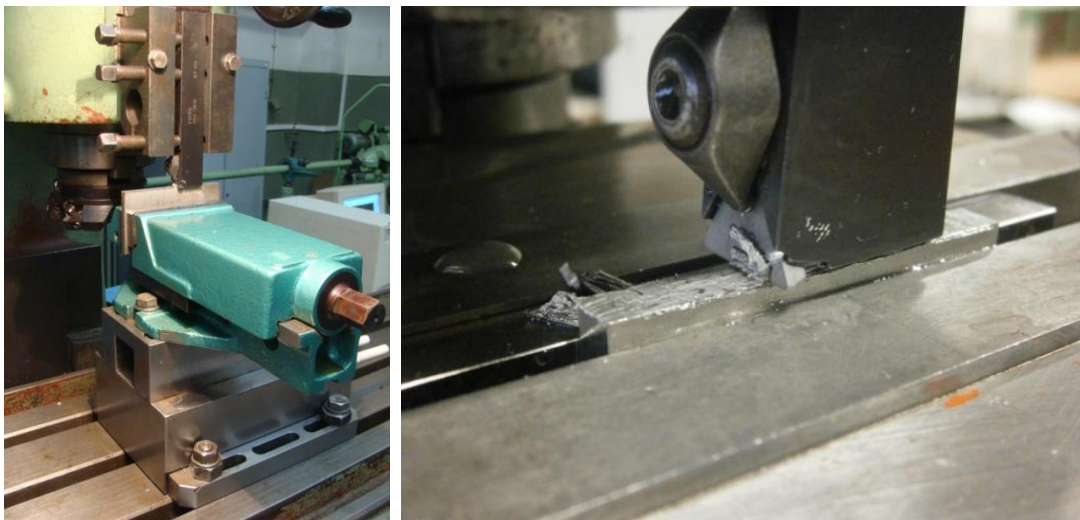


Obr. 2.8 Schéma měření sil při ortogonálním 2d obrábění hoblováním

Na Obr. 2.9 a Obr. 2.10 je realizace schématu měření sil při hoblování dle obr. 3.8. Pro hoblování byla použita univerzální frézka FA4A – 4. Řezný nástroj byl upnut svisle ve speciálním držáku na frézovací hlavě stroje (Obr. 2.10). Dynamometr byl upnut na stole frézky. Přísuv a posuv byl na stroji nastavován manuálně a kontrolován indikátorem s přesností nastavení $\pm 0,001$ mm. Obrábění probíhalo v automatickém cyklu konstantní rychlosti podélného pohybu stolu $v_c = 0,45$ m/min. Chyba měření složek výsledné řezné síly byla v toleranci ± 10 %. Každé měření bylo opakováno 5 krát a statisticky zpracováno.



Obr. 2.9 Schéma dynamometrické soustavy pro měření sil



Obr. 2.10 Měření sil při hoblování

Měření řezných sil se provádělo dynamometrem KISTLER 9265B, připojeným k osmikanálovému kapacitnímu zesilovači KISTLER 9441B (19, 20). Před měřením byla provedena kalibrace dynamometru (Obr. 2.11) pomocí mechanického dynamometru a požadované opravné parametry byly vloženy do počítačového programu řízení měření MATLAB pro zvýšení přesností získávaných hodnot (Obr. 2.12).



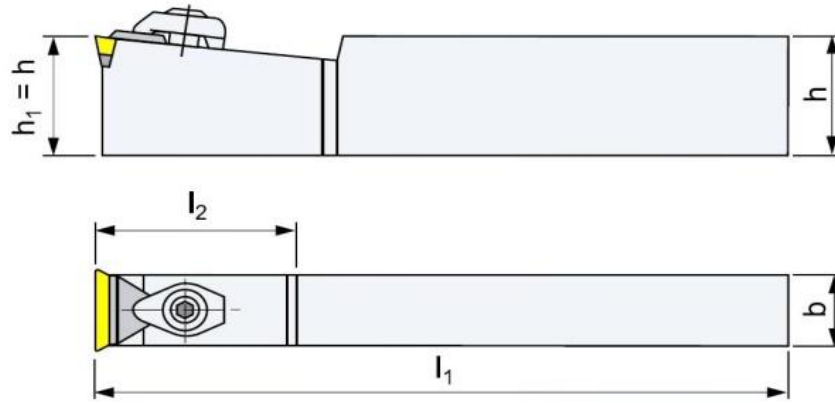
Obr. 2.11 Kalibrace dynamometru KISTLER pomocí
mechanického dynamometru



Obr. 2.12 Ovládací skříň KISTLER s počítačem

Jako nástroj pro hoblování byl použit soustružnický nůž Pramet CTCPN 2514 M16 (Obr. 2.13) s vyměnitelnou břitovou destičkou TPUN 160304; S26 (Obr. 2.14).

Parametry: $h = h_1 = 25$ mm, $b = 13,8$ mm, $l_1 = 150$ mm, $l_2 = 34$ mm, $\gamma_o = 0^\circ$, $\lambda_s = +5^\circ$.



Obr. 2.13 Soustružnický nůž Pramet CTCPN 2514 M16

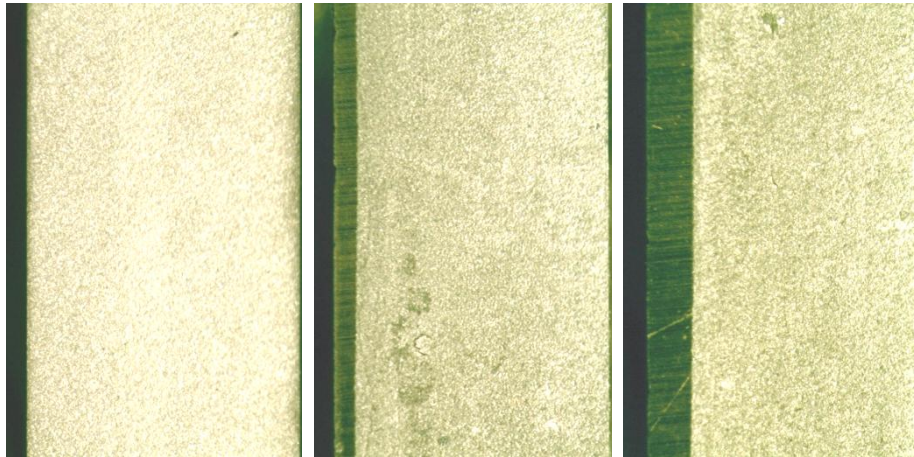


Obr. 2.14 Vyměnitelné břitové destičky TPUN 160304; S26

Opořebení na hřbetu nástroje bylo imitováno na nástrojařské brusce EBN – 2C (Obr. 2.15), na které byly vybroušeny určené šířky opořebení VB (Obr. 2.16).



Obr. 2.15 Nástrojařská bruska EBN – 2C



Obr. 2.16 Šířka opotřebení nože na hřbetu $VB = 0,03$ (ostrý) (vlevo), $VB = 0,3$ (uprostřed) a $VB = 0,5$ mm (vpravo) po broušení na brusce EBN – 2C

Opotřebení soustružnického nože po broušení bylo měřeno nástrojovým ručním mikroskopem MPB - 2 (lupa Brinell) při dvacetičtyřnásobném zvětšení (24x) se stupnicí dělenou po 0.05 mm (Obr. 2.17).



Obr. 2.17 Nástrojový ruční mikroskop MPB - 2

Pro provedení experimentů byly použity vzorky o velikosti $L = 70 \pm 1$ mm, $H = 25 \pm 1$ mm, $B = 8 \pm 0,1$ mm ze šestnácti různých materiálů:

Slitiny hliníku – Al99,7 (106 HB), AlCu6BiPb (99 HB), AlMgSi (87 HB), AlCu4PbMgMn (122 HB), AlCu4MgSi (113 HB),

konstrukční oceli – 12050.1 (220 HB), 11373 (117 HB), 14220.3 (138 HB), 15260 (193 HB), 16220 (193 HB),

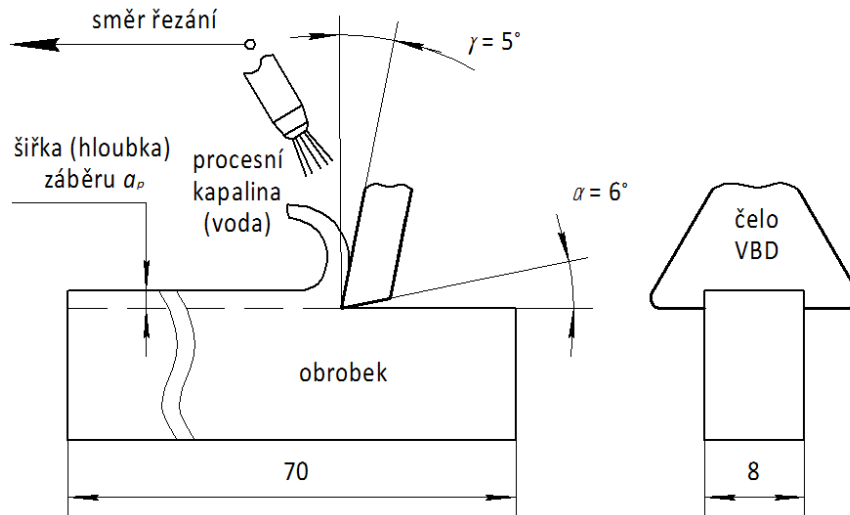
korozivzdorné oceli – 17022 (230 HB), 17240 (259 HB),

bronzy – 42 3018 (139 HB), 42 3046 (120 HB),

mosaz – 42 3223 (110 HB),

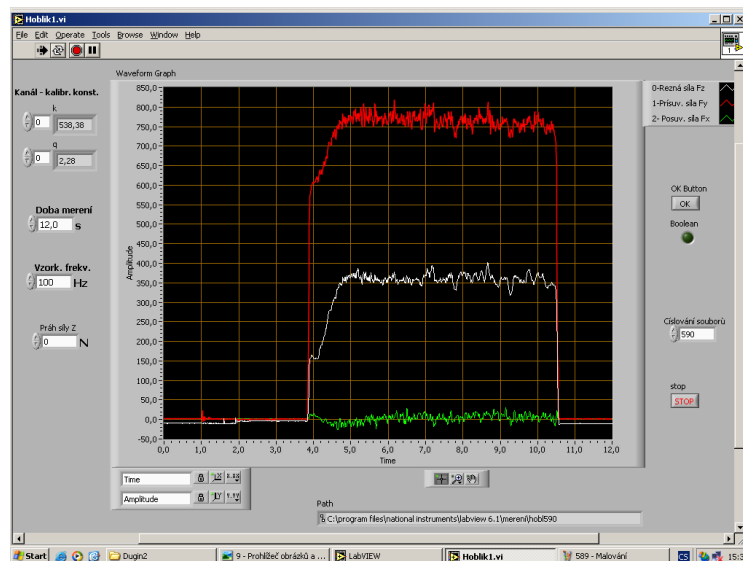
šeda litina – 422420 (182 HB).

Měření sil během experimentů probíhalo při stejných řezných podmínkách. Obrábění se provádělo při šířkách záběru $a_p = 0,025; 0,05; 0,075; 0,1; 0,125$ mm. Šířka opotřebení nože na hřbetu $VB = 0,03; 0,3; 0,5$ mm. Obrábění se provádělo s konstantní rychlostí $v_c = 0,45$ m/min. Jako procesní kapalina byla použita voda (Obr. 2.18).



Obr. 2.18 Schéma hoblování

Výsledky měření byly zobrazovány na monitoru počítače v podobě grafu (Obr. 2.19). Vertikální složka F_y výsledné řezné síly R se zobrazovala v bílé a horizontální F_z v červené barvě.

Obr. 2.19 Zobrazení vertikální F_y (bílá) a horizontální F_z (červená) složky výsledné řezné síly R pomocí dynamometru.

Každé měření (Obr. 2.19) bylo opakováno 5 krát a statisticky zpracováno. Složky F_y a F_z výsledné řezné síly R jsou spojitě nahodné veličiny, takže jejich hodnoty získané měřeními nelze přímo využít pro výše uvedené cíle a je třeba statisticky zpracovat, tj. vyjádřit formou alespoň základních charakteristik jejich pravděpodobnostního rozdělení a to charakteristikou polohy – střední hodnotou, a variability – směrodatnou odchylkou, příp. intervalem spolehlivosti dle vztahů, platných pro zadané omezené soubory hodnot, pro veličiny nespojitě tedy jen s určitým, ale přijatelným přiblížením (21, 22).

Střední hodnota (aritmetický průměr) se určí jako podíl součtu naměřených hodnot F_i z každého experimentu a počtu prováděných experimentů n dle vztahu:

$$\bar{F}_j = \frac{\sum_{i=1}^n F_{ij}}{n}, \quad i = 1, 2, \dots, 5; \quad n = 5, \quad j = y \text{ v z.} \quad (3.11)$$

Výběrová směrodatná odchylka se pak dle následujícího vztahu vypočítá jako odmocnina ze součtu čtverců všech rozdílů mezi naměřenými hodnotami F_i z jednotlivých experimentů a aritmetického průměru \bar{F} , dělená odmocninou počtu provedených experimentů n sníženou o 1:

$$S_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (F_{ij} - \bar{F}_{ij})^2}{n-1}}. \quad (3.12)$$

Statistický interval spolehlivosti se určí jako interval, v rámci kterého jsou výsledky dalšího měření sil na hřbetu nástroje umístěné s předpokládanou pravděpodobností. Interval spolehlivosti se vypočítá z aritmetického průměru, ke kterému se přičte nebo odečte hodnota tzv. konfidenčního intervalu, a to podle dvojice následujících vztahů:

$$\delta_j = \left\langle F_{j \max}; F_{j \min} \right\rangle$$
$$\bar{F}_{j \max} = \bar{F}_j + t_{\alpha, n-1} \cdot \frac{S_j}{\sqrt{n-1}} \quad (3.13)$$

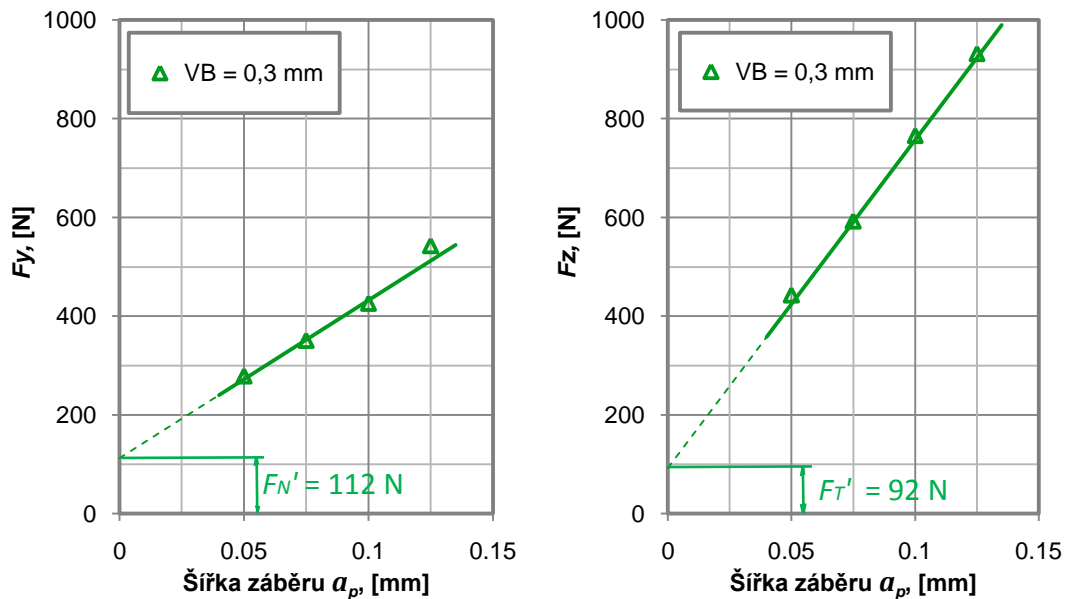
a

$$\bar{F}_{j \min} = \bar{F}_j - t_{\alpha, n-1} \cdot \frac{S_j}{\sqrt{n-1}}. \quad (3.14)$$

Hodnotu kritického rozdělení $t_{\alpha, n-1}$ určíme pro požadovanou úroveň spolehlivosti (22, 23). Tato hodnota závisí na kritické hodnotě určitého rozdělení α , která je taková, že ji náhodná veličina s daným rozdělením pravděpodobnosti překročí pouze s

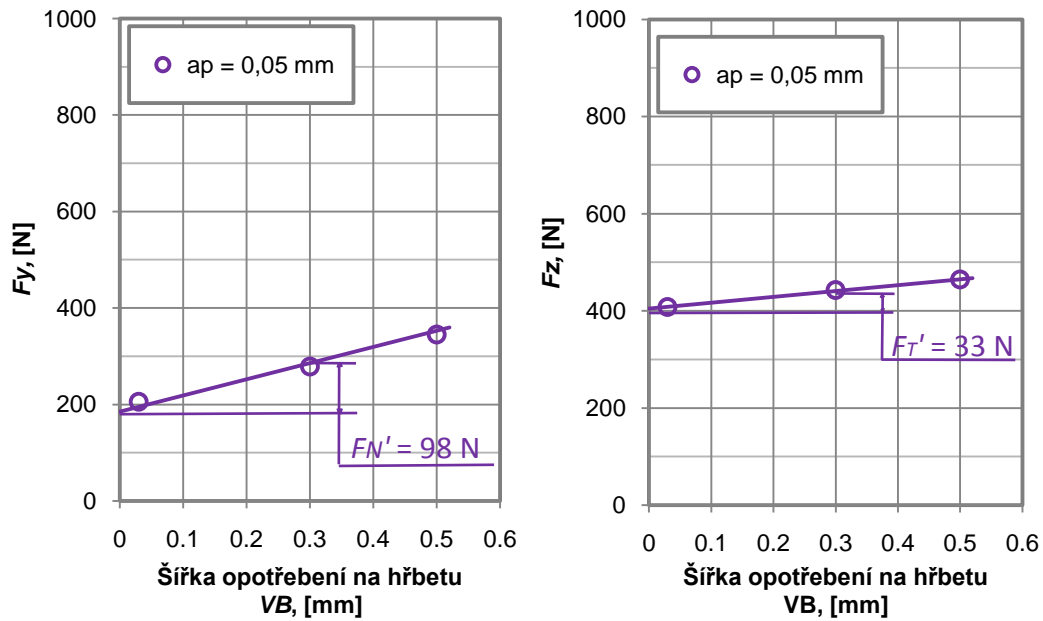
pravděpodobností α , a to pro daný počet experimentů n . Tabelované hodnoty kritického rozdělení $t_{\alpha, n-1}$ pro úroveň spolehlivosti 95% jsou uvedeny v příloze 1.

Tyto charakteristiky slouží pro sestavení grafu v programu Microsoft Excel (v přílohách) a stanovení síly na hřbetu pro obráběné materiály metodou extrapolace na nulovou šířku záběru (Obr. 2.20) a metodou porovnání sil pro různé šířky opotřebení na hřbetu (Obr. 2.21).



Obr. 2.20 Závislosti složek F_y a F_z na šířce záběrů a_p pro šířku opotřebení na hřbetu $VB = 0,2 \text{ mm}$ při obrábění slitiny hliníku AlCu6BiPb (stanovení sil na hřbetu metodou extrapolace na nulovou šířku záběru)

Na základě grafu (viz Obr. 2.20) byly stanoveny síly na hřbetu nástroje metodou extrapolace na nulovou šířku záběru. Při obrábění slitiny hliníku Al99,7 pro šířku opotřebení na hřbetu $VB = 0,2 \text{ mm}$, vertikální složka $F_{N'}$ výsledné síly na hřbetu F' je 112N, horizontální složka $F_{T'}$ výsledné síly na hřbetu F' je 92 N.



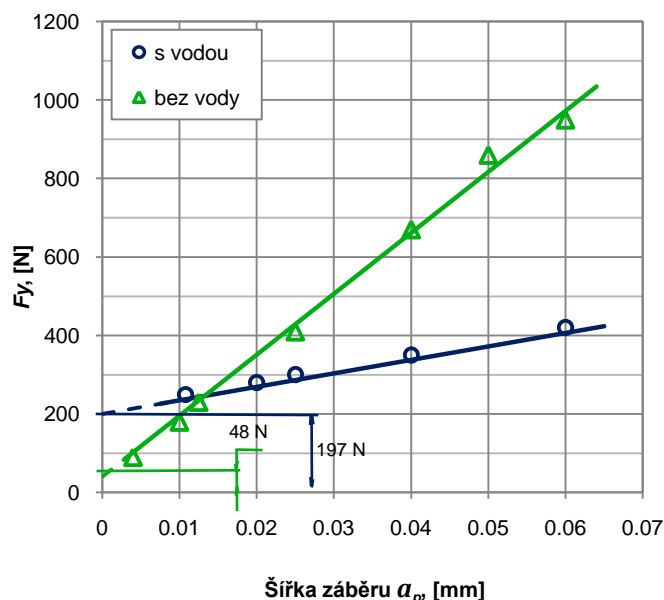
Obr. 2.21 Závislosti složek F_y a F_z na šířce opotřebení na hřbetu V_B při šířce záběrů $a_p = 0,05 \text{ mm}$ při obrábění slitiny hliníku AlCu6BiPb (stanovení sil na hřbetu metodou porovnání sil pro různé šířky opotřebení na hřbetu).

Na základě grafu (viz Obr. 2.21) byly stanoveny síly na hřbetu nástroje metodou porovnání sil pro různé šířky opotřebení na hřbetu. Při obrábění slitiny hliníku AlCu6BiPb při šířce záběrů $a_p = 0,05 \text{ mm}$, vertikální složka F_N' výsledné síly na hřbetu F' je 98 N , horizontální složka F_T' výsledné síly na hřbetu F' je 33 N .

3. ZJIŠTĚNÍ VLIVU PROCESNÍ KAPALINY NA SÍLY NA HŘBETU NÁSTROJE

3.1 Vliv procesních kapalin na síly při obrábění

Použití procesní kapaliny vede většinou nejen ke zvýšení trvanlivosti nástroje při obrábění (24, 25, 26, 27, 28) a zlepšení drsnosti obrobeného povrchu (29, 30, 31, 32), ale také ke zmenšení výsledné řezné síly (33, 34, 35, 36, 37). Z těchto důvodů se při obrábění obvykle procesní kapalina používá. Avšak zkoušky při soustružení s malými hloubkami prováděné Zorevem (12, 13) ukázaly, že procesní kapalina řezné síly až po určitou kritickou šířku záběru zvětšuje. Po překročení této šířky naopak složky řezné síly zmenšuje. Jak patrně z Obr. 3.1 během soustružení při šířce záběru a_p větší než 0,012 mm, procesní kapalina vertikální složku F_y výsledné řezné síly R zmenšuje, a během soustružení při šířce záběru pod 0,015 mm vertikální složku F_y zvětšuje.



Obr. 3.1 Závislost vertikální složky F_y na šířce záběru při obrábění korozivzdorné oceli 17022.

Dále bylo zjištěno, že kritická šířka je různá pro různé materiály obrobku: konstrukční ocel 16220, korozivzdornou ocel 17022, hliníkovou slitinu Al99.7 a šedou litinu 422420.

Důsledkem zvýšení výsledné řezné síly při použití procesní kapaliny během soustružení s malou šířkou záběru je tvorba článkovité třísky, odtlačování nástroje od obrobku, výrazné snížení kvality jeho povrchu a přesnosti. Proto se mikroobrábění provádí s malou šířkou záběru a bez použití procesní kapaliny (37, 38, 39, 40). Například ruční zaškrabávání obrobku s malou šířkou záběru se provádí bez procesní kapaliny. Kdyby se

použila při zaškrabávání procesní kapalina, byla by potřebná řezná síla několikrát vyšší (12, 13).

Příčinou zvětšení výsledné řezné síly při malé šířce záběru a_p použití procesní kapaliny dle Zoreva je snížení síly na čele řezného nástroje, a zvýšení síly na hřbetu. Obr. 3.1 ukazuje, že síla na hřbetu je při použití procesní kapaliny 197 N (stanoveno metodou extrapolace pro nulovou šířku záběru), což je značně více, než síla na hřbetu bez použití procesní kapaliny 48 N.

Tyto výsledky potvrzují příčinu existence kritické šířky záběru. Použití procesní kapaliny zmenšuje sílu na čele řezného nástroje F , a zvětšuje sílu na hřbetu F' (Obr. 2.3). Během soustružení s podkritickou šířkou záběru jsou síly na hřbetu F' větší než síly na čele řezného nástroje F . Toto je důvod proč použití procesní kapaliny vede ke zvýšení výsledné řezné síly R . Během soustružení s nadkritickou šířkou záběru použití procesní kapaliny vede také ke snížení síly na čele řezného nástroje F a ke zvýšení síly na hřbetu nástroje F' . V tomto případě, však jsou síly na hřbetu F' nižší než síly na čele řezného nástroje F . A toto je důvod, proč použití procesní kapaliny vede ke snížení výsledné řezné síly R . Z toho vyplývá, že pro zvýšení přesnosti obrobku při nízké tuhosti technologické soustavy je vhodné obrábět bez použití procesní kapaliny až po kritickou šířku záběru, a procesní kapalinu používat pouze při nadkritické šířce záběru.

Toto vysvětlení, však neřeší otázku: proč procesní kapalina zmenšuje tření mezi třískou a čelem nástroje, a zároveň zvětšuje tření mezi obrobeným povrchem a hřbetem nástroje tak, že síly na hřbetu se zvětšují, ačkoli lze předpokládat, že procesní kapalina by měla zmenšovat tření jak na čele, tak na hřbetu řezného nástroje.

Cílem této části práce je řešení této otázky: zjistit vliv procesní kapaliny na síly na hřbetu a vysvětlit důvody zvýšení výsledné řezné síly při použití procesní kapaliny při obrábění s malými šířkami záběru.

3.2 Experimentální stanovení sil na hřbetu řezného nástroje

Pro stanovení sil na hřbetu byla použita metodika uvedená v kapitole 2.4.

Dynamometrem byly naměřeny složky výsledné řezné síly R (vertikální F_y a horizontální F_z) při různých šířkách záběru a_p . Vertikální složka F_N' a horizontální F_T' výsledné síly F' na hřbetu byly stanoveny metodou extrapolace na nulovou šířku záběru (41, 42), (viz. kap. 2.2).

Měření řezných sil bylo provedeno při ortogonálním 2D obrábění hoblovaním (43) na univerzální frézce FA4A – 4. Řezný nástroj byl upnut svisle ve speciálním držáku na

frézovací hlavě stroje. Jako nástroj pro hoblování byl použit soustružnický nůž Pramet CTCPN 2514 M16 s vyměnitelnou břitovou destičkou ze slinutého karbidu TPUN 160304; S26. Obrobek byl upnut ve svěráku, upevněném na dynamometru KISTLER 9265B. Dynamometr byl upnut na stole frézky. Přisuv a posuv byl na stroji nastavován manuálně a kontrolován indikátorem. Přesnost nastavení $\pm 0,001\text{mm}$. Obrábění bylo prováděno v automatickém cyklu konstantní rychlostí $v_c = 0,45\text{ m/min}$ podélného pohybu stolu. Chyba měření složek výsledné řezné síly byla v toleranci $\pm 10\%$. Každé měření bylo opakováno 5 krát. Z těchto měření byla vypočítána průměrná hodnota řezné síly, výběrová směrodatná odchylka a statistický interval spolehlivosti. Obráběny vzorky stejných rozměru $100 \times 8\text{ mm}$ byly z následujících materiálů: konstrukční ocel 12050.1, konstrukční ocel 16220 a korozivzdorná ocel 17022. Jako procesní kapalina byla použita voda.

Použití minimální řezné rychlosti a vody jako procesní kapaliny zabránilo vzniku nárůstku na čele řezného nástroje a zajistilo plný kontakt hřbetu řezného nástroje s obrobenou plochou. Opotřebení na hřbetu bylo zajištěno broušením hřbetu nástroje na nástrojařské brusce. Opotřebení na hřbetu o šířce $0,05\text{ mm}$ bylo změřeno pomocí nástrojového ručního mikroskopu MPB - 2 (lupa Brinell) při dvacetičtyřnásobném zvětšení (24x). Měření drsnosti bylo provedeno profilometrem MITUTOYO Surflest SV-2000 N2. Každé měření drsnosti bylo opakováno desetkrát, a z takto zjištěných hodnot byl vypočten aritmetický průměr. Parametr drsnosti R_a byl měřen kolmo na směr řezu.

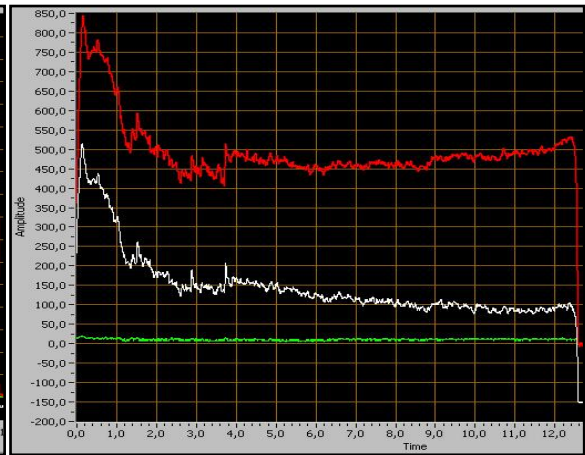
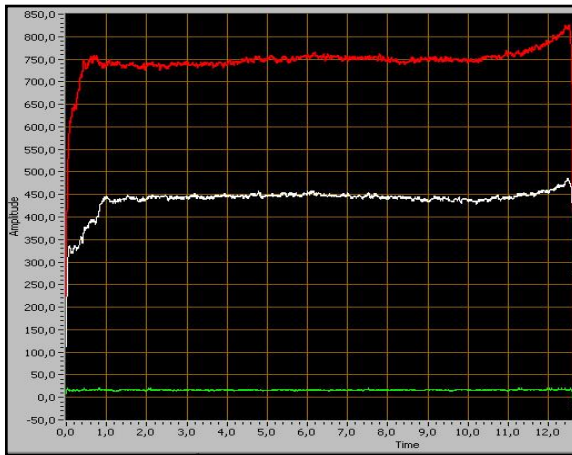
3.3 Výsledky experimentů a jejich analýza

Při měření složek F_y a F_z výsledné řezné síly R s použitím procesní kapaliny bylo zjištěno, že se během obrábění nemění (Obr. 3.2). Například, při obrábění oceli 12050.1 s šířkou záběru $a_p = 0,05\text{ mm}$, se složka řezné síly F_y (bílá) zvětšuje až na 525 N a až do konce obrábění se nemění. Druhá složka řezné síly F_z (červená) se zvětšuje až na 980 N a také se až do konce obrábění nemění.

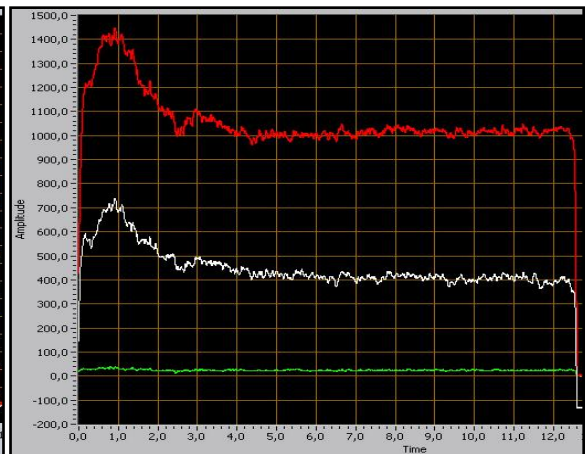
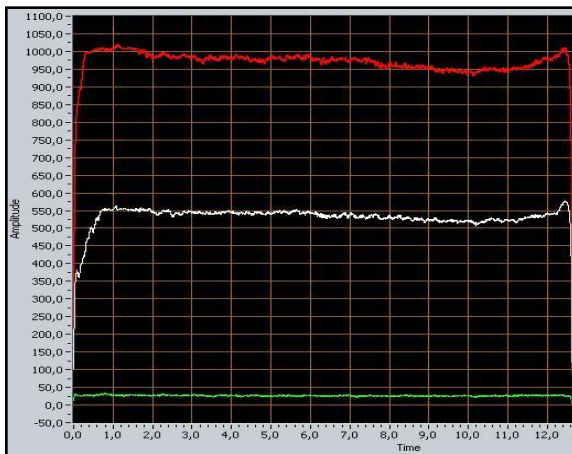
Při obrábění bez použití procesní kapaliny se složky F_y a F_z zmenšují o $23 - 76\%$ v porovnání se silami zaznamenanými na začátku obrábění (Obr. 3.2). Například při obrábění s šířkou záběru $a_p = 0,05\text{ mm}$, se složka řezné síly F_y (bílá) zvětšuje až na 720 N , pak postupně klesá na 430 N , poté se její hodnota nemění až do konce obrábění. Složka řezné síly F_z (červená) se zvětšuje až na $1\,420\text{ N}$, pak postupně klesá na $1\,020\text{ N}$ a také se až do konce obrábění nemění.

S procesní kapalinou

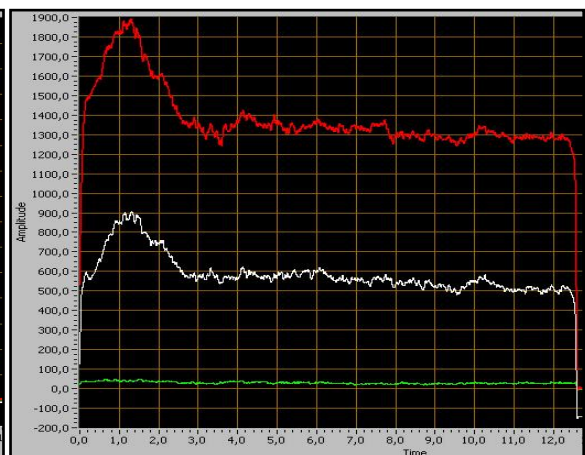
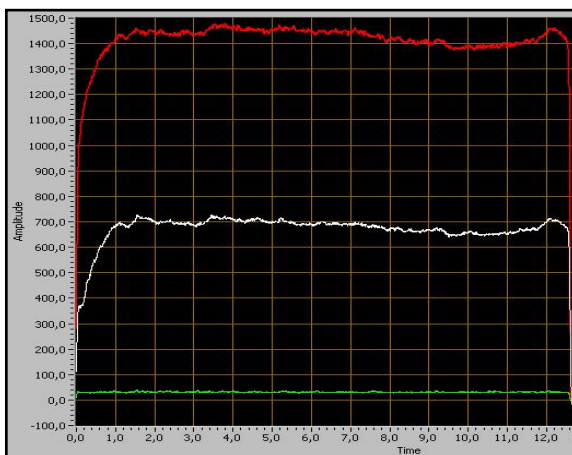
Bez procesní kapaliny



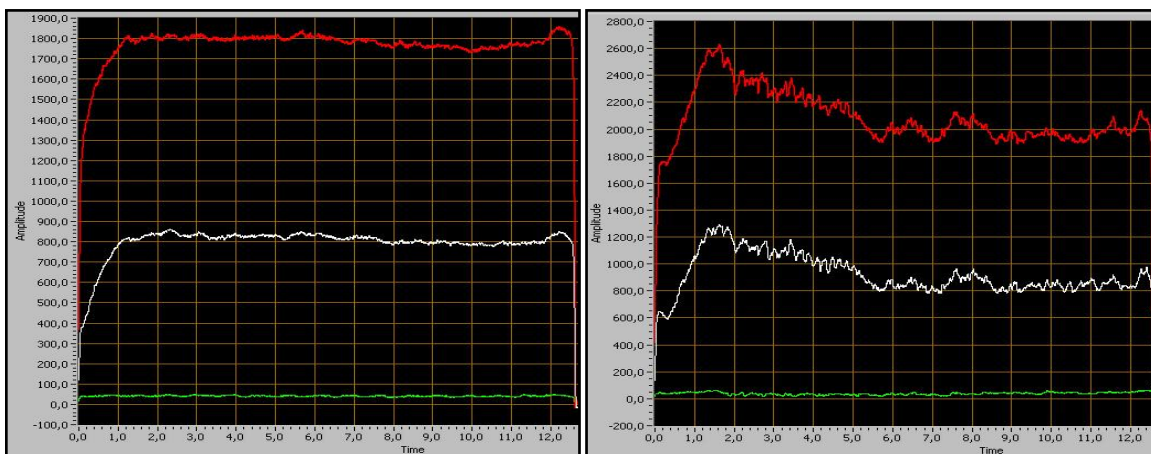
$a_p = 0,025 \text{ mm}$



$a_p = 0,05 \text{ mm}$



$a_p = 0,075 \text{ mm}$

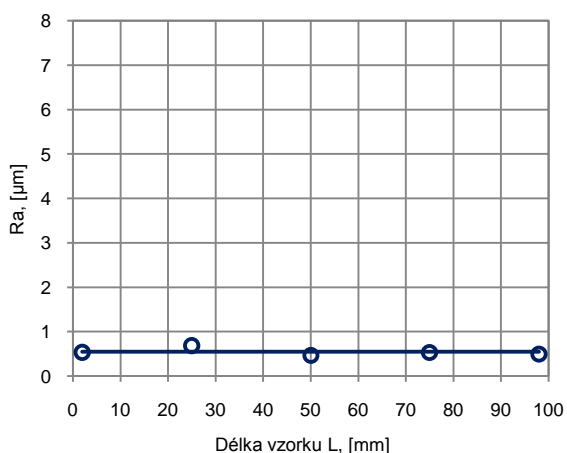


$$a_p = 0,1 \text{ mm}$$

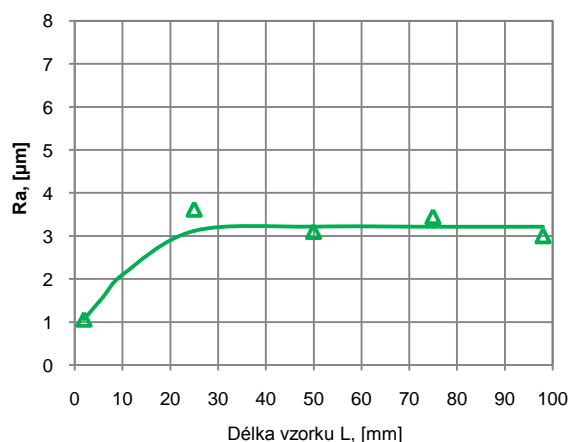
Obr. 3.2 Hodnoty vertikální F_y (bilá) a horizontální F_z (červená) složky výsledné řezné síly R při obrábění konstrukční oceli 12050 při různých šířkách záběru a_p s procesní kapalinou (vlevo) a bez ní (vpravo)

Měřením drsnosti obrobeného povrchu bylo zjištěno, že při použití procesní kapaliny se drsnost v podélném směru obrobku během obrábění nemění (Obr. 3.3). Například při obrábění oceli 12050.1 s šířkou záběru $a_p = 0,05 \text{ mm}$ bez použití procesní kapaliny (vody) se drsnost $R_a = 0,69 \mu\text{m}$ nemění se až do konce obrábění (Obr. 3.3, b). Při obrábění bez použití procesní kapaliny za jinak stejných řezných podmínek, je na začátku drsnost $R_a = 1,11 \mu\text{m}$, což přibližně odpovídá drsnosti s použitím procesní kapaliny, pak prudce stoupá třiapůlkrát až na $3,92 \mu\text{m}$, tj. 3,5x v porovnání s drsností na začátku obrábění, a pak se nemění až do konce procesu.

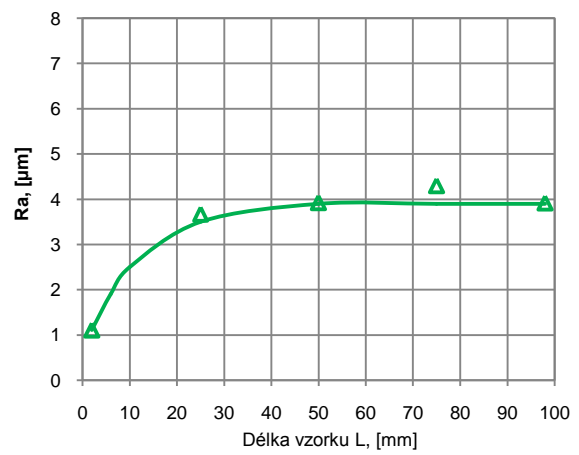
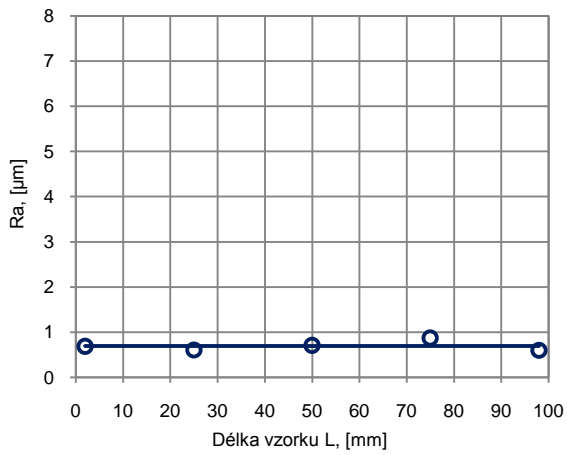
S procesní kapalinou



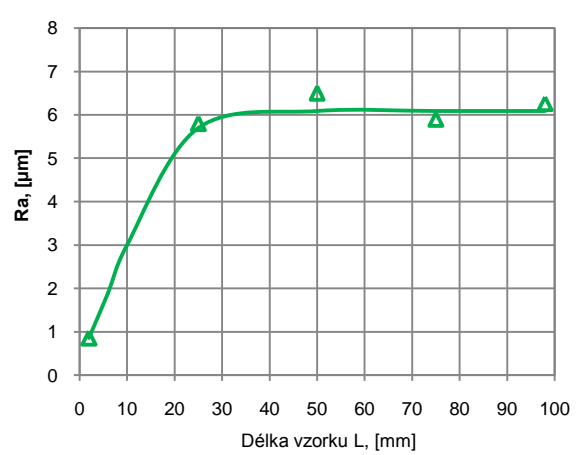
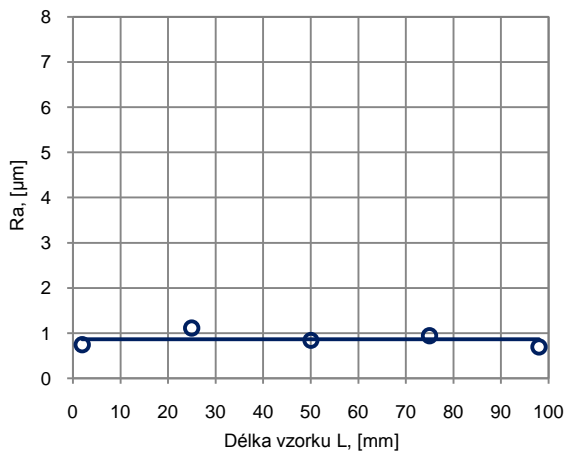
Bez procesní kapaliny



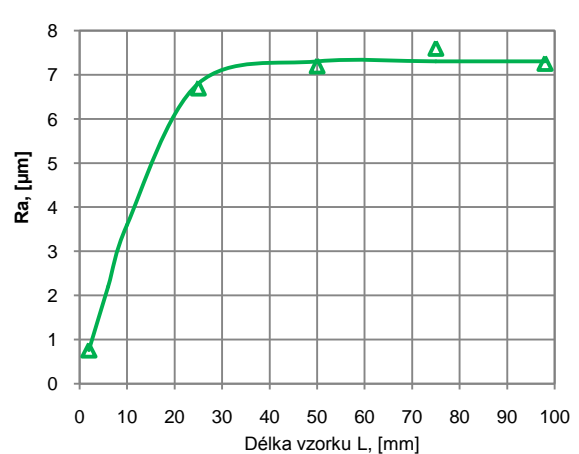
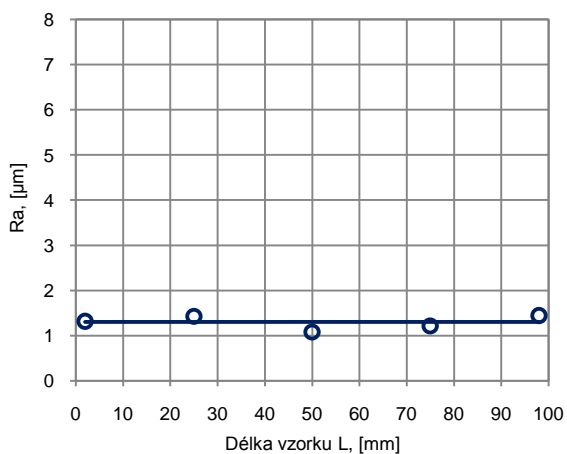
a) $a_p = 0,025 \text{ mm}$



b) $a_p = 0,05$ mm



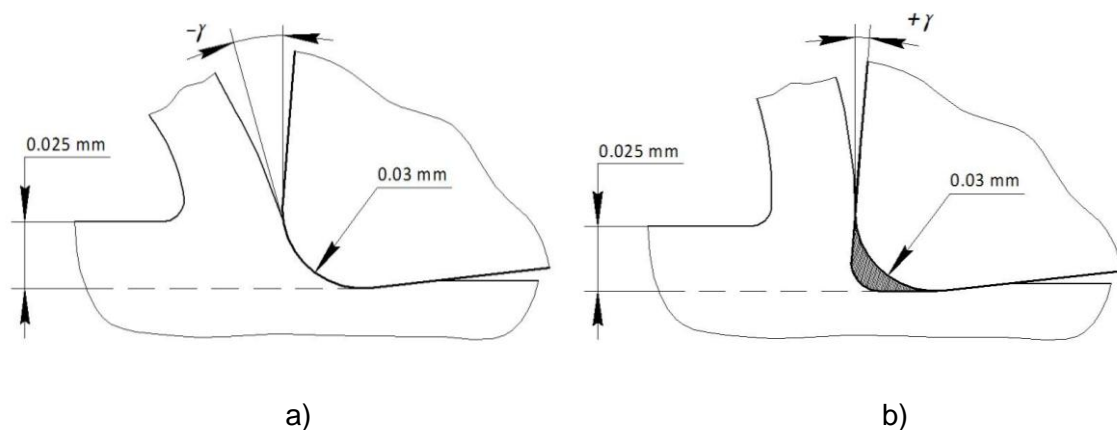
c) $a_p = 0,075$ mm



d) $a_p = 0,1$ mm

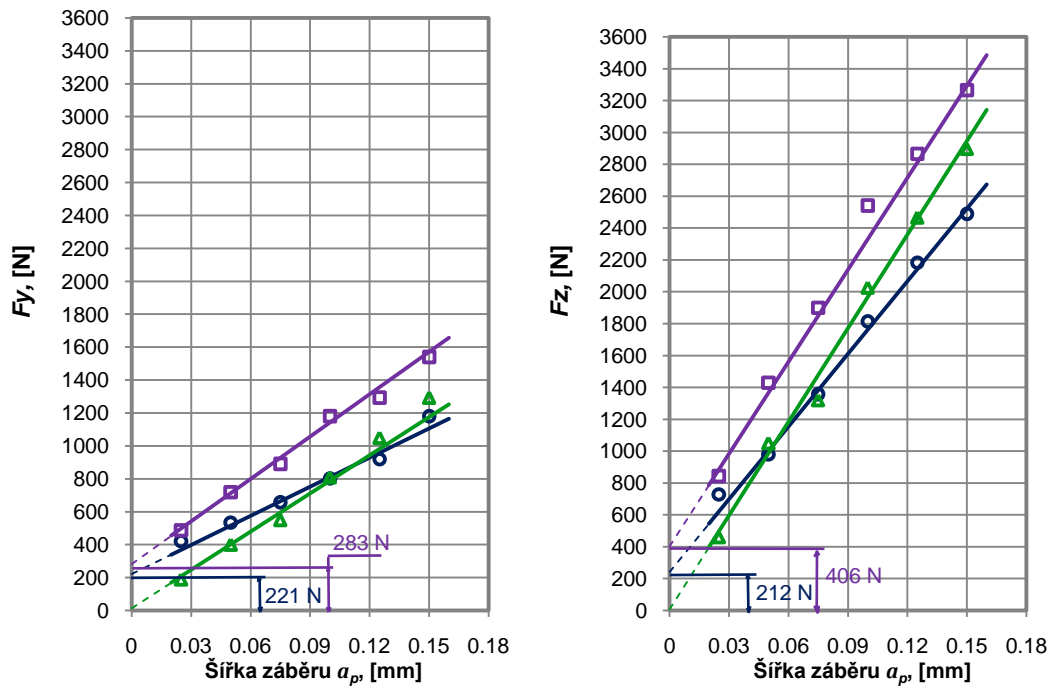
Obr. 3.3 Hodnoty drsnosti povrchu R_a po obrábění konstrukční oceli 12050; s procesní kapalinou (vlevo) a bez procesní kapaliny (vpravo)

Pokles hodnoty složek výsledné řezné síly a zvýšení drsnosti bez použití procesní kapaliny lze vysvětlit nárůstkem tvořícím se na čele nástroje (44, 45, 46, 47), (Obr. 3.4). Procesní kapalina zabraňuje vzniku tohoto nárůstku, a z tohoto důvodu se obrábění s procesní kapalinou provádí s negativním úhlem čela γ a větší výslednou řeznou silou než při obrábění bez procesní kapaliny (Obr. 3.4, a). Na začátku obrábění bez procesní kapaliny nemá nárůstek čas se vytvořit, a proto jsou řezné síly v tuto chvíli stejné jako řezné síly s použitím procesní kapaliny. V obou případech obrábění probíhá bez vzniku nárůstku. Během stabilizovaného obrábění bez procesní kapaliny na čele řezného nástroje se nárůstek vytváří, což zlepšuje geometrii řezné části nástroje. Obrábění probíhá při pozitivním uhlu čela γ , tím se zmenšuje výsledná řezná síla (Obr. 3.4, b). Zorev měřil řezné síly během obrábění [2] tj. za stabilních řezných podmínek s již vytvořeným nárůstkem. To vysvětluje jeho výsledky: řezné síly jsou při použití procesní kapaliny a malé šířce záběru vyšší než řezné síly při obrábění bez použití procesní kapaliny.



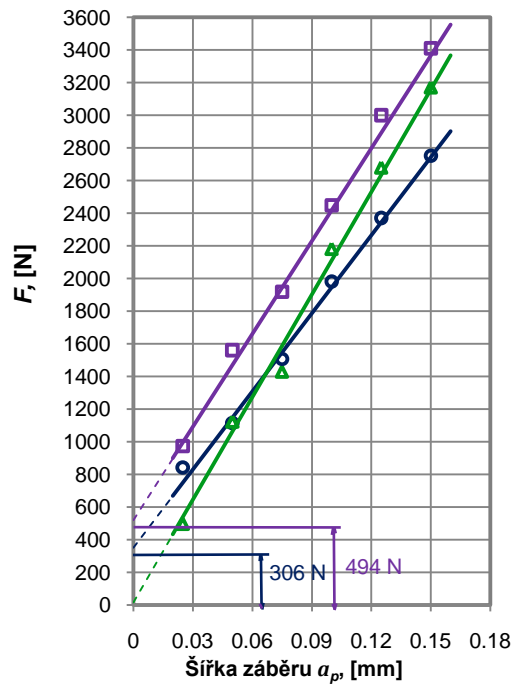
Obr. 3.4 Schémata tvorby třísky při obrábění s malou šířkou záběru při použití procesní kapaliny bez nárůstku (a), bez použití procesní kapaliny na začátku obrábění bez nárůstku (a), a bez použití procesní kapaliny s nárůstkem po stabilizaci obrábění (b)

Na Obr. 3.5 jsou grafy sil F_y , F_z a R jako funkce šířky záběru a_p při obrábění konstrukční oceli 12050. Na základě těchto údajů bylo metodou extrapolace na nulovou šířku záběru zjištěno, že složka síly na hřbetu řezného nástroje F_N' při použití procesní kapaliny poklesla o 21 % z 280 N na 221 N (Obr. 3.5, a); při použití procesní kapaliny složka síly na hřbetu F_z' poklesla o 48 % z 406 N na 212 N (Obr. 3.5, b); a při použití procesní kapaliny se výsledná řezná síla na hřbetu F' také snížila o 38 % ze 494 N na 306 N (Obr. 3.5, c).



a)

b)

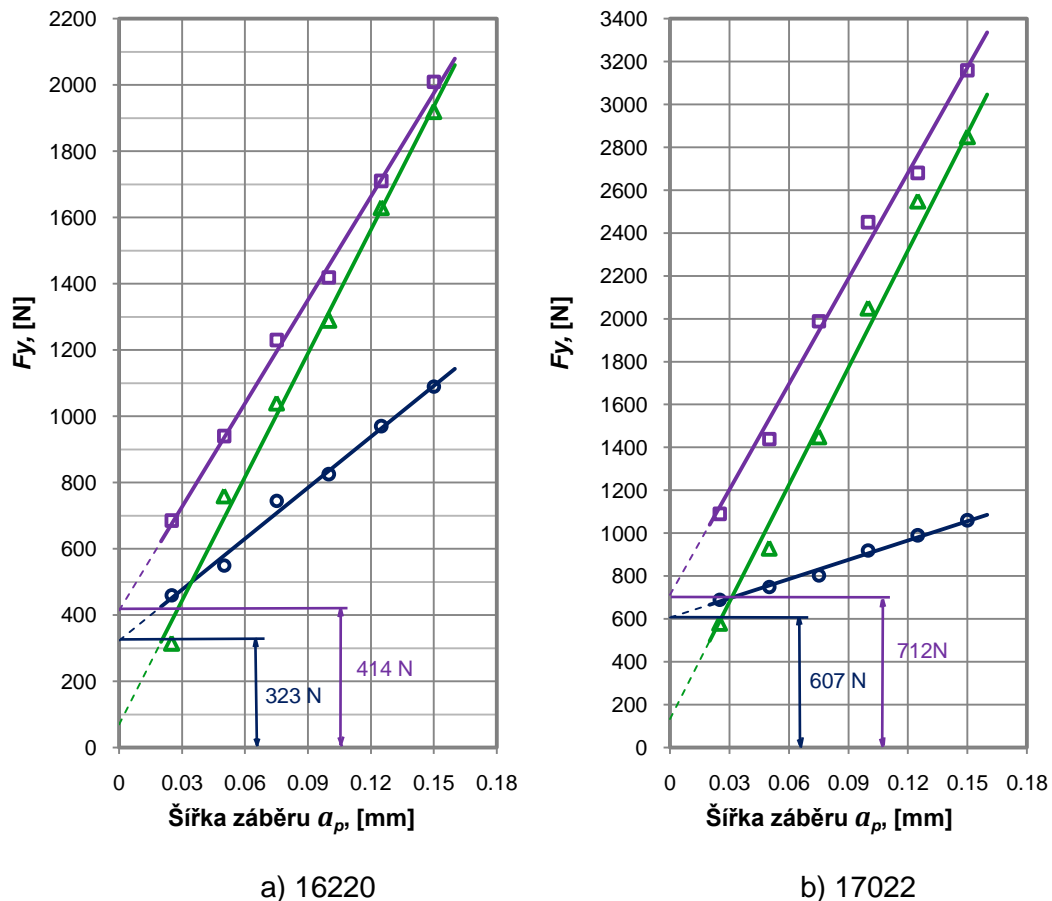


c)

Obr. 3.5 Vertikální složka F_y (a), a horizontální složka F_z (b) a výsledná řezná síla R (c) jako funkce šířky záběru a_p při obrábění konstrukční oceli 12050; s vodou bez nárůstku (kroužky); bez vody na začátku obrábění bez nárůstku (čtverečky); bez vody během stabilizovaného obrábění bez nárůstku (trojúhelníčky)

Při obrábění konstrukční oceli 16220 a korozivzdorné oceli 17022 s vodou a bez vody byl zjištěno, že síla na hřbetu nástroje F' klesá, když se použije procesní kapalina. Na Obr. 3.6 zobrazena vertikální složka F_y výsledné řezné síly R jako funkce šířky záběru a_p při obrábění konstrukční oceli 16220 a korozivzdorné oceli 17022. Na základě těchto údajů metodou extrapolace na nulovou šířku záběru bylo zjištěno, že během obrábění konstrukční oceli 16220 s vodou klesá složka síly na hřbetu F_N' o 22 % ze 414 N na 323 N (Obr. 3.6, a) a během obrábění korozivzdorné oceli 17022 klesá složka síly na hřbetu F_N' o 15 % z 712 N na 607 N při použití procesní kapaliny (Obr. 3.6, b).

Tudíž, použitím metody extrapolace na nulovou šířku záběru za jinak stejných podmínek bez nárůstku bylo zjištěno, že použití procesní kapaliny nezvětšuje výsledné síly na hřbetu nástroje jak tvrdí Zorev (12, 13). Dále z toho vyplývá, že zvětšení výsledné řezné síly při použití procesní kapaliny s malou šířkou záběru nelze vysvětlit zvětšením síly na hřbetu nástroje při použití procesní kapaliny.



Obr. 3.6 Vertikální složka F_y výsledné řezné síly R jako funkce šířky záběru a_p při obrábění konstrukční oceli 16220 (a) a korozivzdorné oceli 17022 (b), při použití vody (kroužky); bez použití vody na začátku obrábění bez nárůstku (čtverečky); bez použití vody během stabilizovaného obrábění s nárůstkem (trojúhelníčky)

Získané výsledky ukazují, že použití procesní kapaliny zmenšuje tření mezi hřbetem nástroje a obrobenou plochou a tím zmenšuje síly na hřbetu řezného nástroje, podobně jako i na jeho čele. Při obrábění s šířkou záběru vyšší než kritická, vytváření nebo absence nárůstku na výslednou řeznou sílu nemá významný vliv. Za těchto podmínek je hlavním efektem použití procesní kapaliny snížení výsledné řezné síly v důsledku snížení tření na čele nástroje.

3.4 Závěr

Dosavadní výzkum (12, 13) ukázal, že použití procesní kapaliny při obrábění s malými šířkami záběru zvyšuje výslednou řeznou sílu a předpokládalo se, že příčinou tohoto zvětšení výsledné řezné síly při obrábění s malými šířkami záběru je zvětšení síly na hřbetu.

V této disertační práci byla specifikována další, dosud neznámá, příčina tohoto zvětšení. Bylo zjištěno, že procesní kapalina zabraňuje vzniku nárůstku, obrábění pak probíhá s negativním úhlem čela řezného nástroje a tedy větší výslednou řeznou silou, než při obrábění bez procesní kapaliny. Naopak při obrábění bez procesní kapaliny se na čele řezného nástroje nárůstek vytváří, a tím se pracovní úhel čela stává pozitivní, to je skutečný důvod poklesu výsledné řezné síly, při obrábění bez použití procesní kapaliny.

Na základě provedených experimentů a použití metody extrapolace na nulovou šířku záběru bylo zjištěno, že použití procesní kapaliny zmenšuje sílu na hřbetu řezného nástroje. Z toho vyplývá, že zvětšení výsledné řezné síly při použití procesní kapaliny při malých šířkách záběru nelze vysvětlit zvětšením síly na hřbetu při použití procesní kapaliny, jak se původně předpokládalo.

4. STANOVENÍ SIL NA HŘBETU NOVOU METODOU POROVNÁNÍ SIL PRO RŮZNÉ ŠÍŘKY KONTAKTU NA HŘBETU

Z literatury jsou známy různé metody stanovení sil na hřbetu řezného nástroje. Jsou to metoda extrapolace na nulovou šířku záběru (1, 10, 12, 13, 15), metoda porovnání sil pro různé šířky opotřebení na hřbetu (12, 13, 17, 18) a metoda přímého měření sil na hřbetu (14, 15).

Nejstarší je metoda extrapolace na nulovou šířku záběru, která má své příznivce (1, 10, 13, 16) i odpůrce (14, 15, 17, 18). Stevenson (15) předpokládal, že síly na hřbetu stanovené touto extrapolací jsou podstatně větší, než síly zjištěné metodou přímého měření. Navzdory kritice, se tato metoda používá dodnes (16, 41, 42).

Často se používá i metoda přímého měření (14, 15, 17). Její hlavním nedostatkem je vliv tuhosti technologické soustavy na měřené síly. Kvůli nedostatečné tuhosti zmíněné soustavy není vždy možno obrábět s tzv. nulovou šířkou záběru (15).

Pro stanovení sil na hřbetu se používá i metoda porovnání sil pro různé šířky opotřebení na hřbetu (12, 13, 17, 18). Tato metoda, poprvé navržená Zorevem (12, 13), je založena na předpokladu, že pokud jsou všechny podmínky obrábění konstantní a zvětšuje se pouze opotřebení na hřbetu nástroje obvykle se proces tvorby třísky nemění. Proto se síla působící na čele nástroje také nemění. Protože však kontaktní plocha mezi hřbetem nástroje a obrobenou plochou se zvětšuje, zvětšuje se i síla na hřbetu, následkem čehož se zvětšuje výsledná řezná síla. Z tohoto důvodu lze za jinak stejných podmínek pozorované zvětšování výsledné řezné síly, považovat vyhradně za důsledek zvětšování síly na hřbetu.

V literatuře buď nejsou žádné informace o porovnání sil na hřbetu stanovených všemi výše uvedenými metodami nebo jsou dostupné informace kontroverzní. Za této situace vyvstává potřeba získání hodnot sil na hřbetu nástroje uvedenými metodami za stejných podmínek tak, aby tyto hodnoty byly srovnatelné a umožnily porovnání těchto metod z hlediska jejich přesnosti.

4.1 Experimentální stanovení sil na hřbetu řezného nástroje

Pro stanovení sil na hřbetu byla použita metodika která byla uvedena v kapitole 2.4.

Pomocí dynamometru byly měřeny dvě složky výsledné řezné síly R (vertikální F_y a horizontální F_z) při různých šířkách záběru a_p a různých šířkách opotřebení VB na hřbetu. Vertikální složka F_N' a horizontální složka F_T' výsledné síly F' na hřbetu byly stanoveny

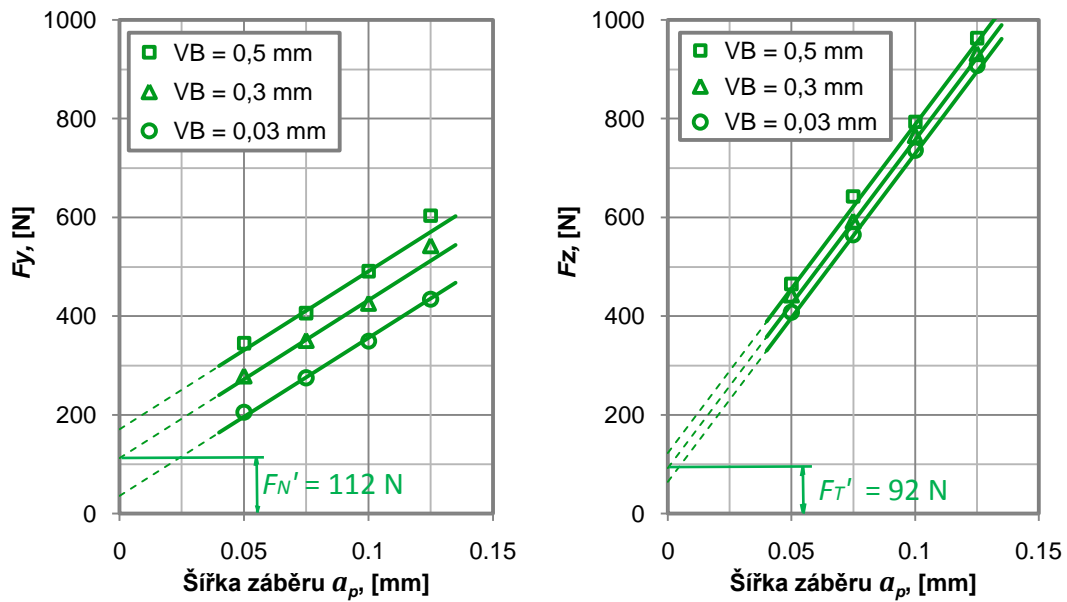
metodou extrapolace na nulovou šířku záběru (1, 10, 12, 13, 15, 41, 42) která byla uvedena v kapitole 2.2, a pomocí metody porovnání sil pro různé šířky opotřebení na hřbetu (12, 13, 17, 18), která byla uvedena v kapitole 2.3.

Měření řezných sil bylo provedeno při ortogonálním 2D obrábění hoblovaním (43) na univerzální frézce FA4A – 4. Řezný nástroj byl upnut svisle ve speciálním držáku na frézovací hlavě. Jako nástroj pro hoblování byl použit soustružnický nůž Pramet CTCNP 2514 M16 s vyměnitelnou břitovou destičkou ze slinutého karbidu TPUN 160304; S26. Obrobek byl upnut ve svěráku, který byl upevněn na dynamometru KISTLER 9265B. Dynamometr byl upnut na stole frézky. Přísuv a posuv byl na stroji nastavován manuálně a kontrolován indikátorem s přesností $\pm 0,001$ mm. Obrábění probíhalo v automatickém cyklu, konstantní rychlosti $v_c = 0,45$ m/min podélného pohybu stolu. Chyba měření složek výsledné řezné síly nepřekročila ± 10 %. Každé měření sil bylo opakováno 5x. Z výsledků měření byla vypočítána průměrná hodnota řezné síly, směrodatná odchylka a statistický interval spolehlivosti. Obrobky o rozměrech 100 x 8 mm byly z následujících materiálů: slitiny hliníku Al99,5, AlCu6BiPb, AlMgSi, AlCu4PbMgMn, AlCu4MgSi, konstrukční ocel 12050.1, 11373, 14220.3, 15260, 16220 a korozivzdorné oceli 17022 a 17240. Jako procesní kapalina byla použita voda.

Použití minimální řezné rychlosti a vody jako procesní kapaliny zabránilo vzniku nárůstku na čele řezného nástroje a zajistilo plný kontakt mezi hřbetem řezného nástroje a obrobenou plochou. Opotřebení na hřbetu bylo imitováno broušením hřbetu nástroje na nástrojařské brusce. Šířka opotřebení na hřbetu byla kontrolována pomocí nástrojového ručního mikroskopu MPB - 2 (lupa Brinell) při dvacetičtyřnásobném zvětšení (24x).

Obr. 4.1 ukazuje výsledky stanovení sil na hřbetu metodou extrapolace na nulovou šířku záběru při obrábění hliníkové slitiny Al99,5. Měření bylo provedeno při šířkách záběru: $a_p = 0,05, 0,075, 0,1$ a $0,125$ mm a pro $VB = 0,03, 0,3$ a $0,5$ mm. Např. při obrábění vyměnitelnou břitovou destičkou s šířkou opotřebení na hřbetu řezného nástroje $VB = 0,3$ mm bylo zjištěno, že vertikální složka síly na hřbetu $F_y = 112$ N a horizontální $F_z = 92$ N.

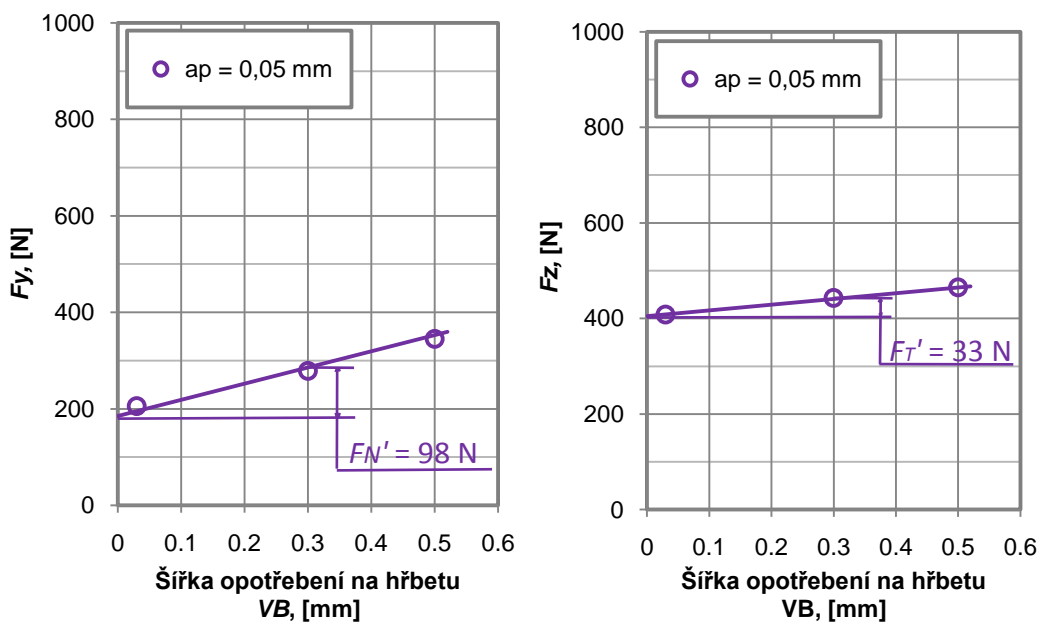
Stanovení sil na hřbetu metodou extrapolace na nulovou šířku záběru při obrábění dvanácti různých materiálů je uvedeno v příloze 2.



Obr. 4.1 Vertikální složka F_y a horizontální složka F_z výsledné řezné síly R jako funkce šířky záběru a_p pro různé šířky opotřebení na hřbetu VB při obrábění hliníkové slitiny Al99,5

Obr. 4.2 ukazuje výsledky stanovení sil na hřbetu metodou porovnání sil pro různé šířky opotřebení na hřbetu při obrábění hliníkové slitiny Al99,5. Měření bylo provedeno při šířkách záběru: $a_p = 0,05$ a $0,125$ mm a pro $VB = 0,03$, $0,3$ a $0,5$ mm. Např. při obrábění s vyměnitelnou břitovou destičkou s šířkou opotřebení na hřbetu řezného nástroje $VB = 0,3$ mm bylo zjištěno, že vertikální složka síly na hřbetu $F_N' = 98$ N a horizontální složka $F_T' = 33$ N.

Stanovení sil na hřbetu metodou porovnání sil pro různé šířky opotřebení na hřbetu při obrábění dvanácti různých materiálů je uvedeno v příloze 3.



Obr. 4.2 Vertikální složka F_y a horizontální složka F_z výsledné řezné síly R jako funkce šířky opotřebení na hřbetu VB při obrábění hliníkové slitiny Al99,5

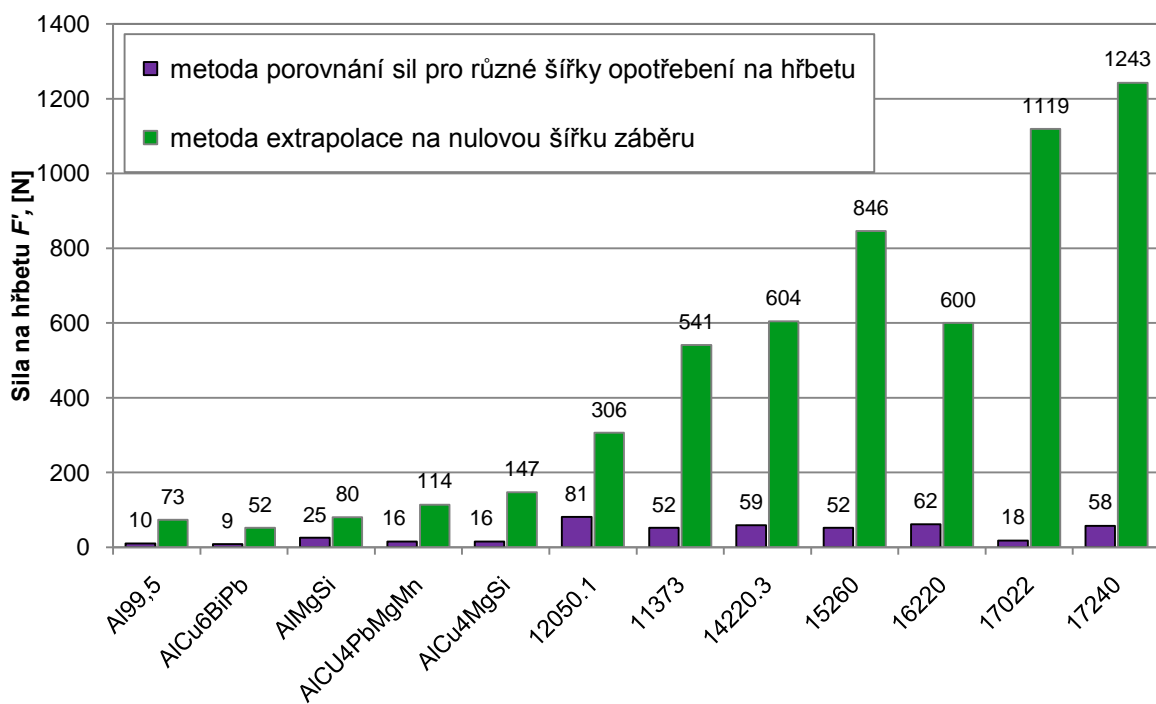
Následně byly stanoveny síly na hřbetu metodou přímého měření pro šířky záběru 0,05, 0,075, 0,1 a 0,125 mm. Před měřením bylo provedeno pět řezů při konstantní šířce záběru, aby se stabilizoval proces obrábění. Pak byly měřeny síly bez zvětšování šířky záběru tj. při nulové šířce záběru.

Bylo zjištěno, že bez zvětšení šířky záběru při obrábění se šířkami záběru 0,05; 0,075; 0,01 a 0,125 mm se tvořila tříška. Tento jev nastává při nedostatečné tuhosti technologické soustavy. Takto naměřené síly nemohou být použity pro stanovení sil na hřbetu při nulové šířce záběru. Kvůli tomu metoda přímého měření pro stanovení sil na hřbetu nemůže být použita.

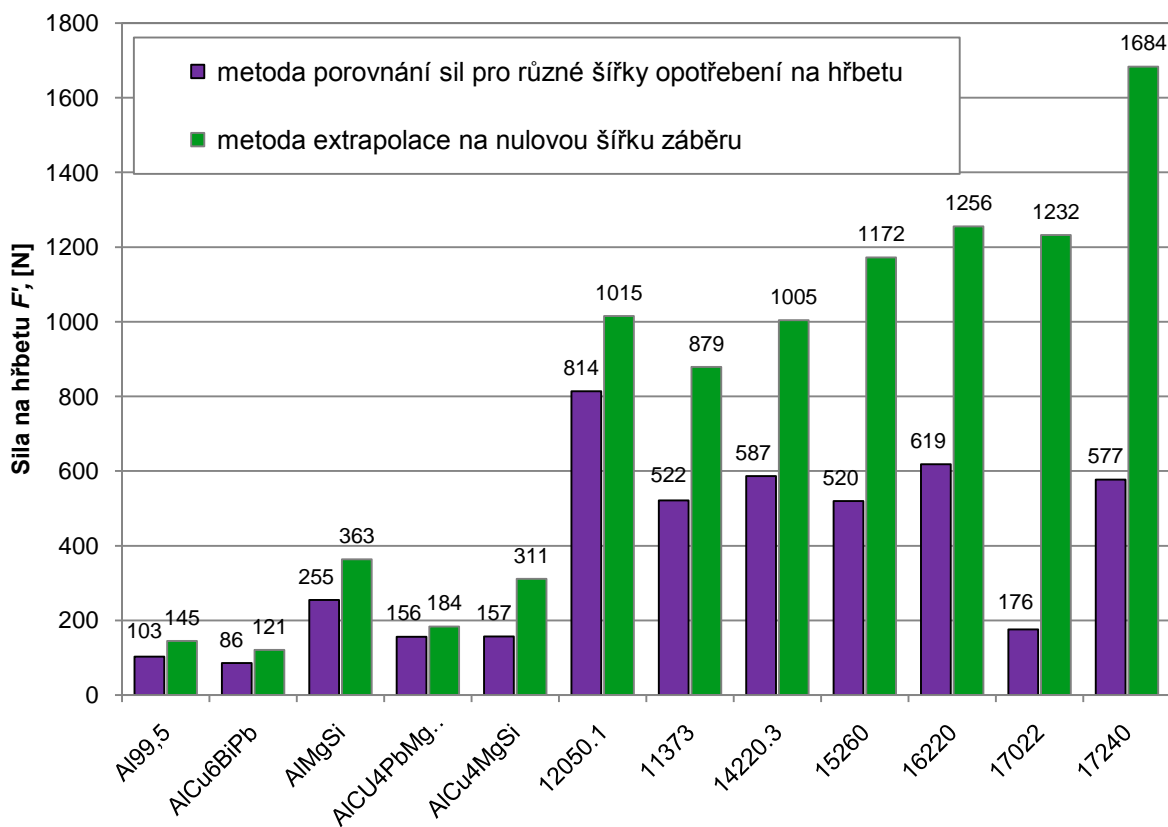
4.2 Výsledky experimentů a jejich analýza

Ze složek F_N' a F_T' výsledné síly F' na hřbetu stanovených metodou extrapolace na nulovou šířku záběru a_p byla získána tato síla pro všechny zkoušené materiály, analogicky byly získány hodnoty síly F' ze složek F_N' a F_T' stanovených metodou porovnání sil při obrábění různých materiálů pro různé šířky opotřebení VB na hřbetu (Obr. 4.3).

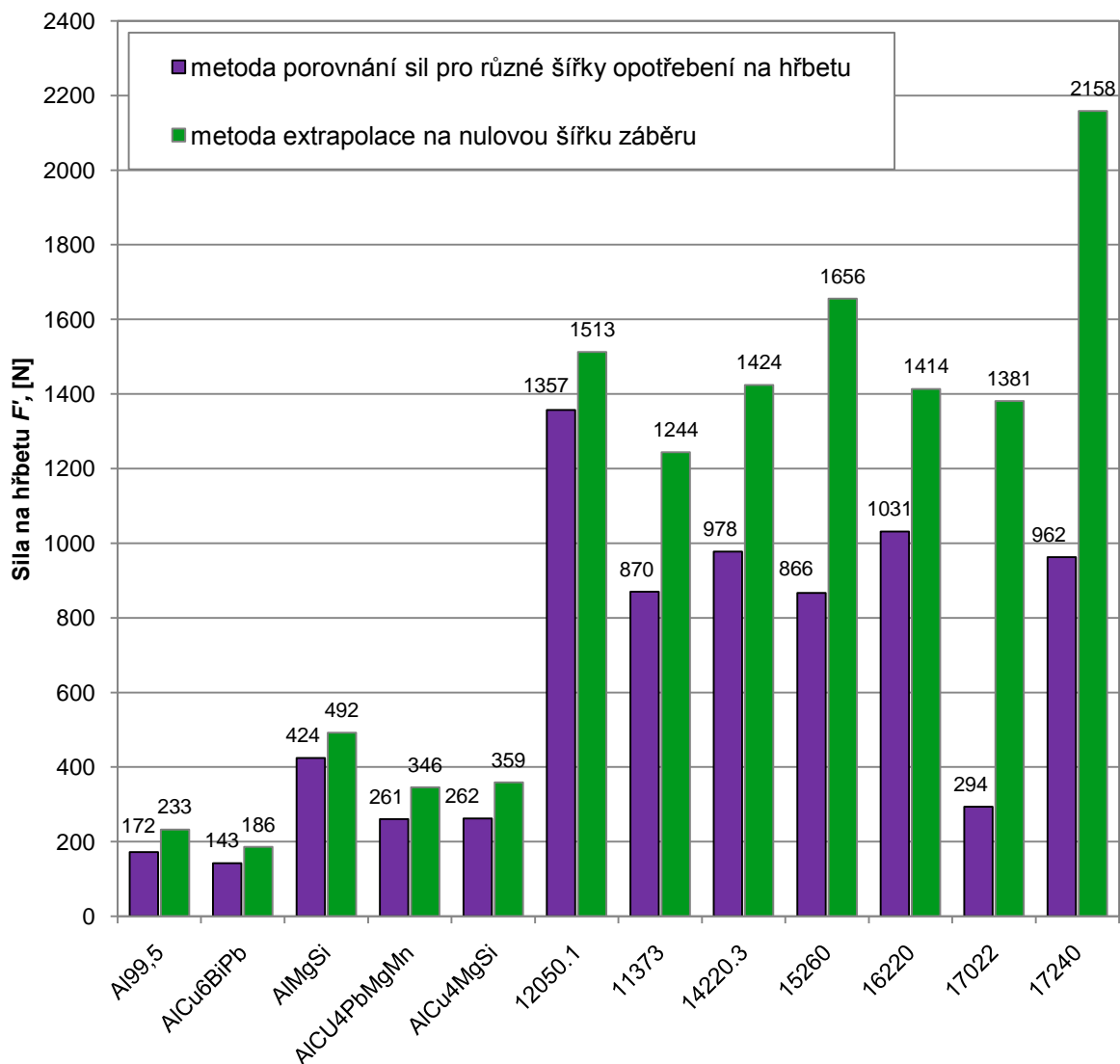
Na Obr. 4.3 (a) je porovnání hodnot takto získané výsledné síly F' pro šířku opotřebení $VB = 0,3$ mm, na Obr. 4.3 (b) pro $VB = 0,3$ mm, a na Obr. 4.3 (c) pro $VB = 0,5$ mm.



a) $VB = 0,03$ mm



b) $VB = 0,3$ mm

c) $VB = 0,5$ mm

Obr. 4.3 Porovnání výsledných sil F' na hřbetu získaných metodou extrapolace na nulovou šířku záběru a metodou porovnání sil pro různé šířky opotřebení na hřbetu při obrábění různých materiálů při různých šířkách opotřebení nástroje na hřbetu VB

Bylo zjištěno, že síly na hřbetu stanovené metodou extrapolace na nulovou šířku záběru jsou podstatně vyšší než hodnoty těchto sil stanovené metodou porovnání sil pro různé šířky opotřebení na hřbetu.

Například při obrábění s šířkou opotřebení na hřbetu $VB = 0,03$ mm (Obr. 4.3, a), hodnoty sil na hřbetu stanovené metodou extrapolace na nulovou šířku záběru při obrábění různých druhů slitin hliníku jsou 3,1 – 9,3 krát vyšší, při obrábění různých konstrukčních ocelí 3,8 – 16,3 krát vyšší a při obrábění korozivzdorných ocelí 21,5 – 63,5

krát vyšší než hodnoty těchto sil na hřbetu stanovené metodou porovnání sil pro různé šířky opotřebení na hřbetu.

Při obrábění s šířkou opotřebení na hřbetu $VB = 0,3$ mm (Obr. 4.3, b), hodnoty sil na hřbetu stanovené metodou extrapolace na nulovou šířku záběru při obrábění různých slitin hliníku jsou o 17 – 98 %, při obrábění různých konstrukčních ocelí o 25 – 126 % a při obrábění korozivzdorných ocelí o 192 – 600 % vyšší než hodnoty těchto sil na hřbetu stanovené metodou porovnání sil pro různé šířky opotřebení na hřbetu.

Při obrábění s šířkou opotřebení na hřbetu $VB = 0,5$ mm (Obr. 4.3, c), hodnoty sil na hřbetu stanovené metodou extrapolace na nulovou šířku záběru při obrábění různých slitin hliníku jsou o 16 – 37 %, při obrábění různých konstrukčních ocelí o 11 – 91 % a při obrábění korozivzdorných ocelí o 124 – 370 % vyšší než hodnoty těchto sil na hřbetu stanovené metodou porovnání sil pro různé šířky opotřebení na hřbetu.

Tyto výsledky v podstatě odpovídají závěrům Stevensona (15), že hodnoty sil na hřbetu řezného nástroje stanovené metodou extrapolace na nulovou šířku záběru jsou podstatně vyšší než hodnoty těchto sil stanovené metodou přímého měření.

Chyba měření nemůže vysvětlit natolik velké rozdíly v hodnotách sil na hřbetu, jak se ukazuje při obrábění dvanácti různých materiálů metodou extrapolace na nulovou šířku záběru a metodou porovnání sil pro různé šířky opotřebení na hřbetu při jinak stejných řezných podmínkách.

Těmito ověřovacími experimenty bylo zjištěno, že hodnoty sil na hřbetu řezného nástroje stanovené metodou extrapolace na nulovou šířku záběru vycházejí podstatně větší, než hodnoty těchto sil stanovené metodou porovnání sil pro různé šířky opotřebení na hřbetu.

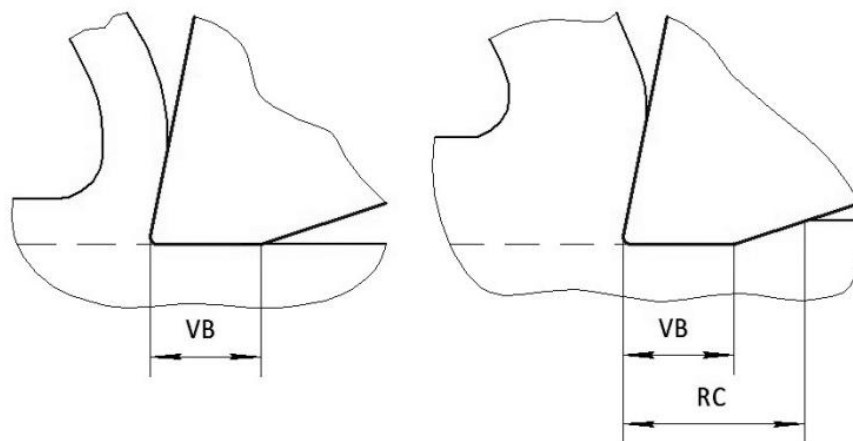
4.3 Metoda porovnání sil pro různé šířky kontaktu hřbetu s obrobenou plochou

V kapitole 4.2 bylo dokázáno, že síly na hřbetu stanovené metodou extrapolace na nulovou šířku záběru vycházejí podstatně větší, než síly stanovené metodou porovnání sil pro různé šířky opotřebení na hřbetu. V tomto kontextu je evidentně důležité zvýšit přesnost stanovení sil na hřbetu a porovnat různé experimentální metody měření těchto sil z aspektu přesnosti.

Pro stanovení sil na hřbetu řezného nástroje se často používá speciální metoda porovnání sil pro různé šířky opotřebení na hřbetu. Tato metoda, která byla navržena Zorevem (13) a pak Colwellem (17) je založena na předpokladu že, pokud jsou všechny podmínky obrábění konstantní a zvětšuje se pouze opotřebení na hřbetu nástroje (Obr.

4.4), obvykle se proces tvorby třísky nemění. Proto se tedy síla působící na čele nástroje také nemění, ale protože kontaktní plocha mezi hřbetem nástroje a obrobenou plochou se zvětšuje, zvětšuje se i síla na hřbetu a tím se zvětšuje výsledná řezná síla. Z tohoto důvodu by mělo být pozorované zvětšování výsledné síly považováno za důsledek zvětšování síly na hřbetu.

Nevýhodou metody porovnání sil pro různé šířky opotřebení na hřbetu řezného nástroje je to, že opotřebení na hřbetu se liší od skutečné kontaktní plochy mezi hřbetem nástroje a obrobenou plochou (Obr. 4.4). Příčina tohoto jevu spočívá v deformaci obrobené plochy.



Obr. 4.4 Teoretický (vlevo) a skutečný (vpravo) kontakt hřbetu nástroje s obrobeným materiálem;

VB – opotřebení na hřbetu řezného nástroje,

RC – šířka reálního kontaktu hřbetu řezného nástroje.

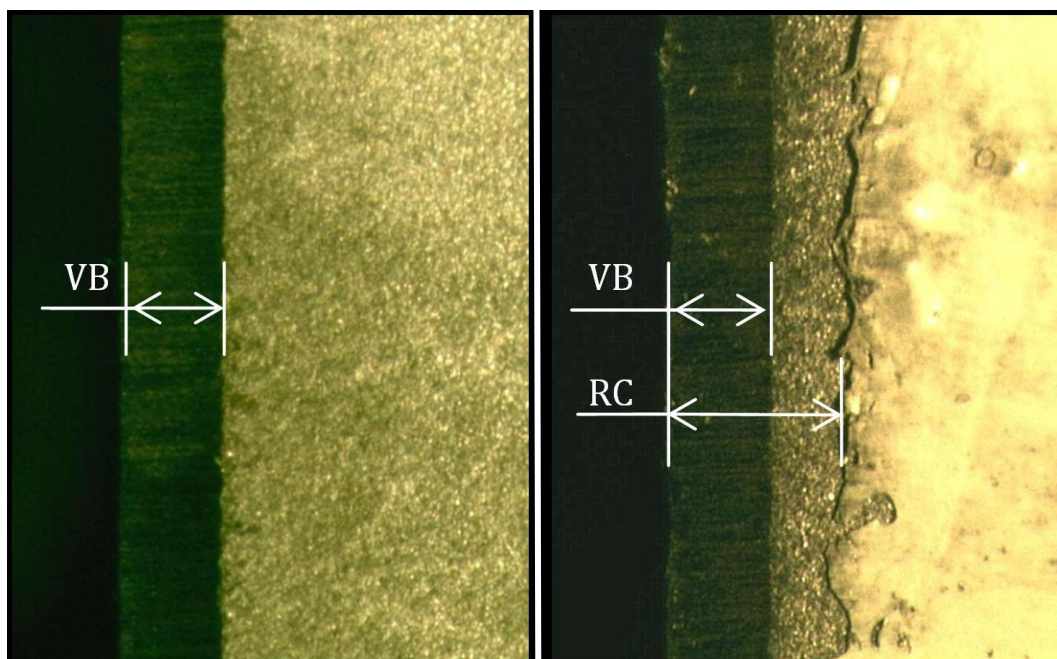
Pro zvýšení přesnosti stanovení sil na hřbetu byla navržena nová metoda, pojmenovaná „Metoda porovnání sil pro různé šířky kontaktu na hřbetu“. Zvýšení přesnosti stanovení sil na hřbetu je založeno na měření skutečné plochy kontaktu hřbetu nástroje a obrobené plochy.

4.4 Experimentální stanovení sil na hřbetu řezného nástroje metodou porovnání sil pro různé šířky kontaktu hřbetu s obrobenou plochou

Pro stanovení sil na hřbetu byla použita metodika uvedená v kapitole 2.4.

Pro měření skutečného kontaktu RC mezi hřbetem řezného nástroje a obrobenou plochou byla doplněna výše uvedená metodika následovně: hřbet nástroje byl před obráběním obarven (Obr. 4.5). Délka skutečného kontaktu RC byla změřena po obrábění

pomocí mikroskopu s tolerance $\pm 0,005$ mm. Každé měření RC bylo opakováno desetkrát, a z naměřených hodnot byl vypočten průměr.



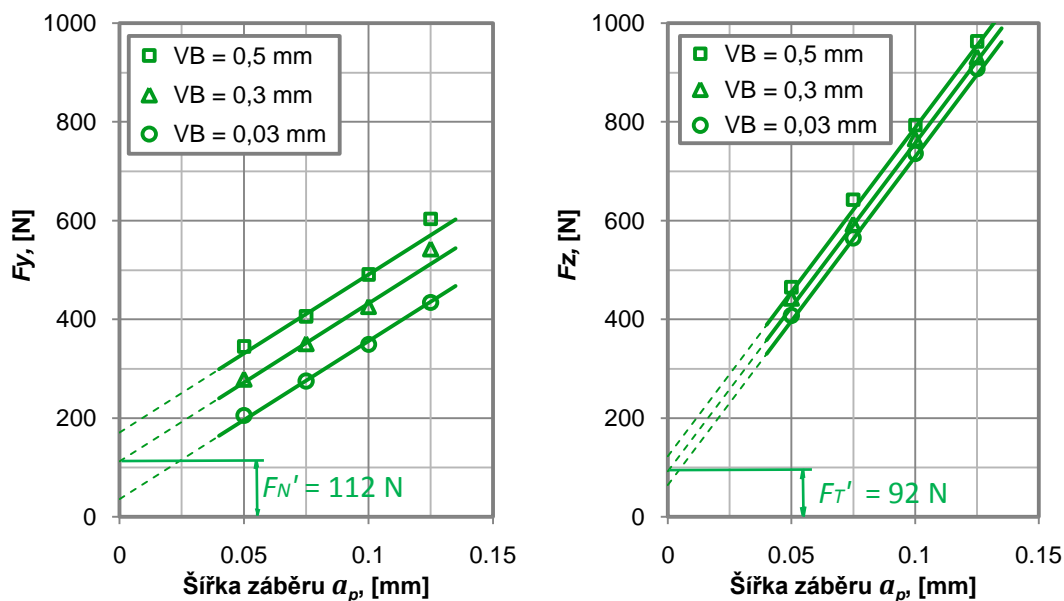
Obr. 4.5 Fotografie hřbetu nástroje před obarvením (vlevo) a po obarvení a obrábění (vpravo)

Tab. 4.1 Šířka opotřebení na hřbetu řezného nástroje *VB* a skutečná šířka kontaktu na hřbetu *RC* s obrobenou plochou při obrábění různých materiálů

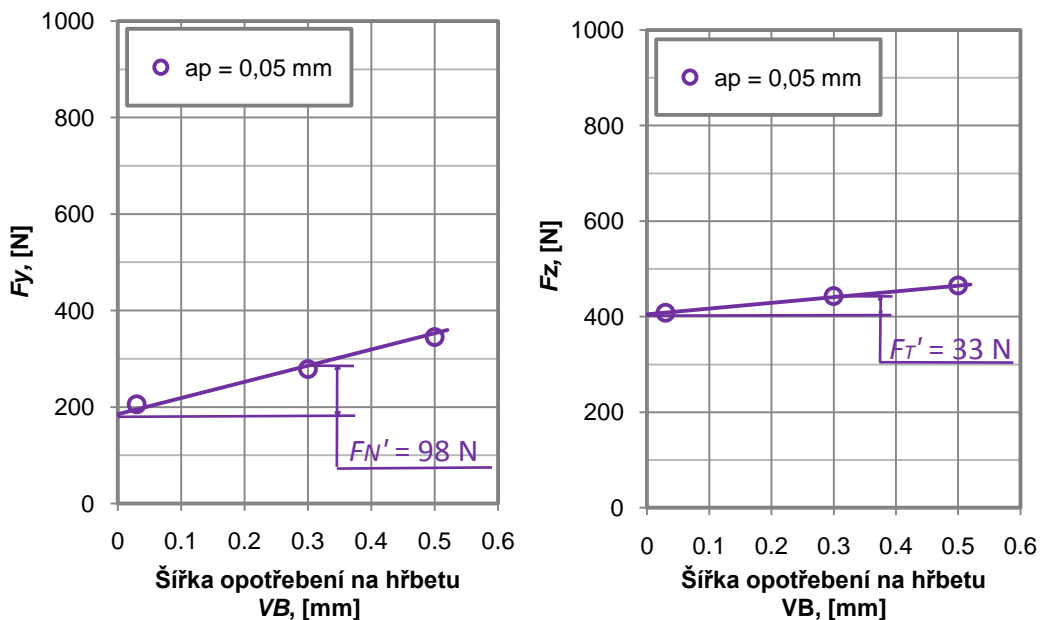
VB, [mm]	RC, [mm]											
	Al99,5	AlCu6BiPb	AlMgSi	AlCu4Pb MgMn	AlCu4MgSi	12050.1	11373	14220.3	15260	16220	17022	17240
0,03	0,19	0,2	0,11	0,14	0,12	0,31	0,29	0,22	0,18	0,3	0,28	0,38
0,3	0,47	0,43	0,42	0,48	0,39	1	0,82	0,96	0,59	0,87	0,78	1,1
0,5	0,91	0,81	0,69	0,72	0,59	1,8	1,38	1,41	1	1,42	1,12	1,71

Tab. 4.1 ukazuje rozdíly mezi šířkou opotřebení na hřbetu *VB* a skutečnou šířkou kontaktu hřbetu *RC* při obrábění různých materiálů. Tyto experimenty byly provedeny při opotřebení na hřbetu *VB* = 0,03, 0,3 a 0,5 mm pro dvanáct druhů materiálů. Nové břitové destičky měly opotřebení *VB* = 0,03 mm, protože rádius jejich řezné hrany byl 0,03 mm. Bylo dokázáno, že skutečná plocha kontaktu mezi hřbetem nástroje a obrobenou plochou je podstatně větší než opotřebení na hřbetu.

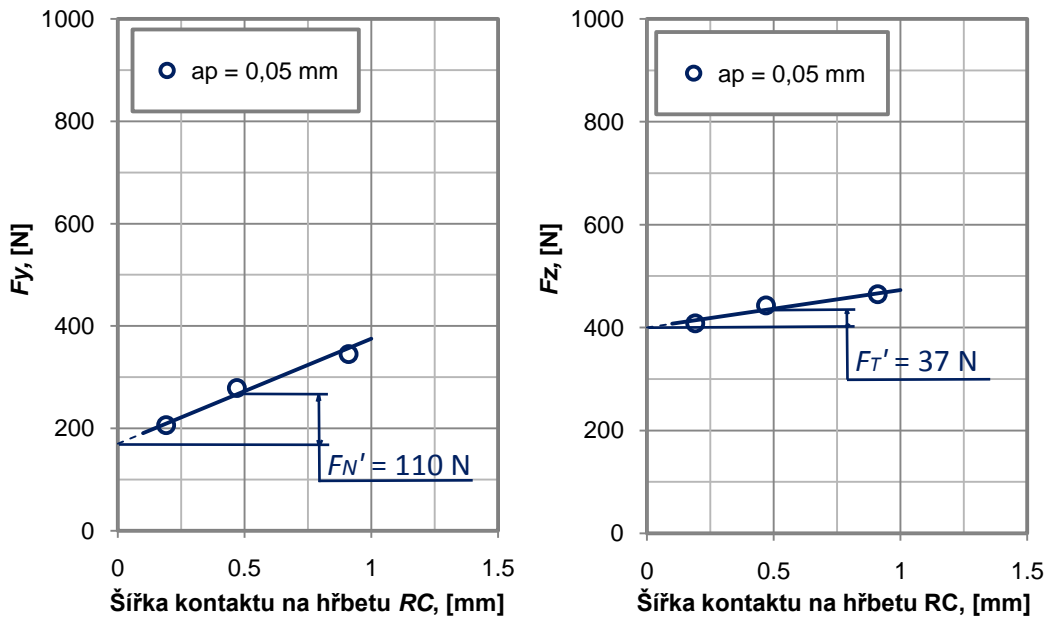
Obr. 4.6 ukazuje výsledky stanovení sil F_y a F_z na hřbetu při obrábění hliníkové slitiny Al99,5 získané metodou extrapolace na nulovou šířku záběru a_p , metodou porovnání sil pro různé šířky opotřebení VB na hřbetu nástroje a metodou porovnání sil pro různé šířky kontaktu RC na hřbetu.



a)



b)



c)

Obr. 4.6 Stanovení síly na hřbetu při obrábění hliníkové slitiny Al99,5 metodou:

- extrapolace na nulovou šířku záběru a_p ;
- porovnání sil pro různé šířky opotřebení VB na hřbetu;
- porovnání sil pro různé šířky kontaktu RC na hřbetu.

Obr. 4.6. (a) ukazuje výsledky stanovení sil na hřbetu metodou extrapolace na nulovou šířku záběru. Experimenty byly prováděny se šířkami $a_p = 0,05; 0,075; 0,1$ a $0,125$ mm. Např. při použití destičky s opotřebením $VB = 0,3$ mm bylo zjištěno, že vertikální složka síly na hřbetu $F_N' = 112$ N a horizontální $F_T' = 92$ N.

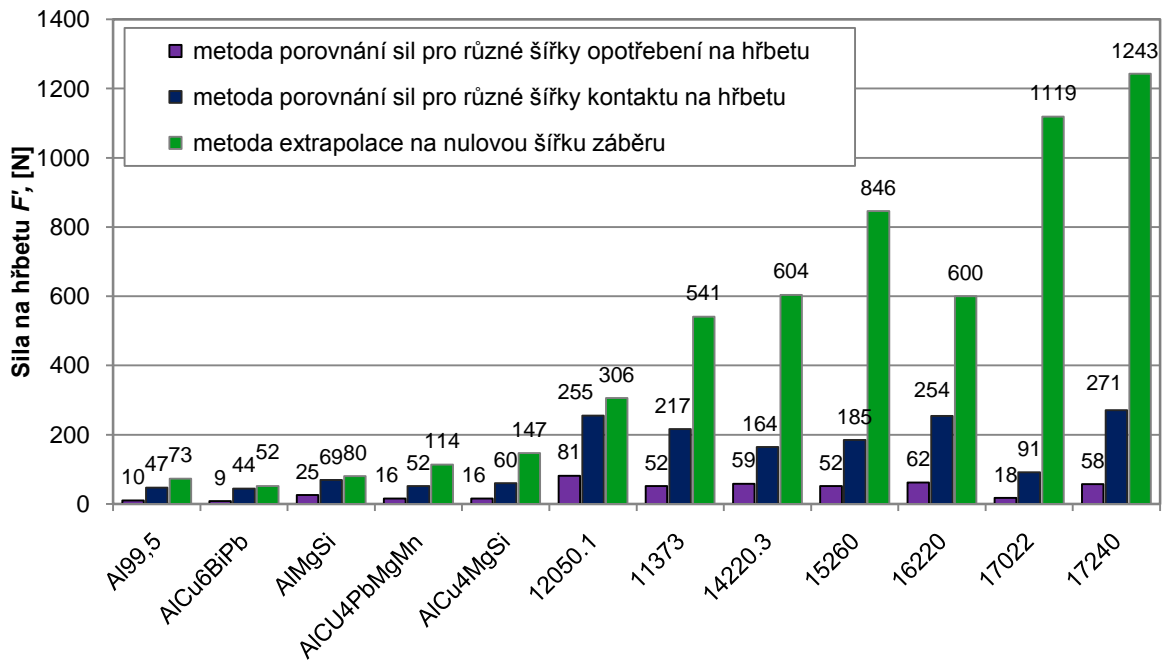
Obr. 4.6. (b) ukazuje výsledky stanovení sil na hřbetu metodou porovnání sil pro různé šířky opotřebení na hřbetu VB . Např. při opotřebení na hřbetu $VB = 0,3$ mm, vertikální složka síly na hřbetu $F_N' = 101$ N a horizontální $F_T' = 36$ N.

Obr. 4.6. (c) ukazuje výsledky stanovení sil na hřbetu metodou porovnání sil pro různé šířky kontaktu na hřbetu RC . Např. při opotřebení na hřbetu $VB = 0,3$ mm, ale skutečném kontaktu hřbetu $RC = 0,47$ mm, vertikální složka síly na hřbetu $F_N' = 94$ N a horizontální $F_T' = 34$ N.

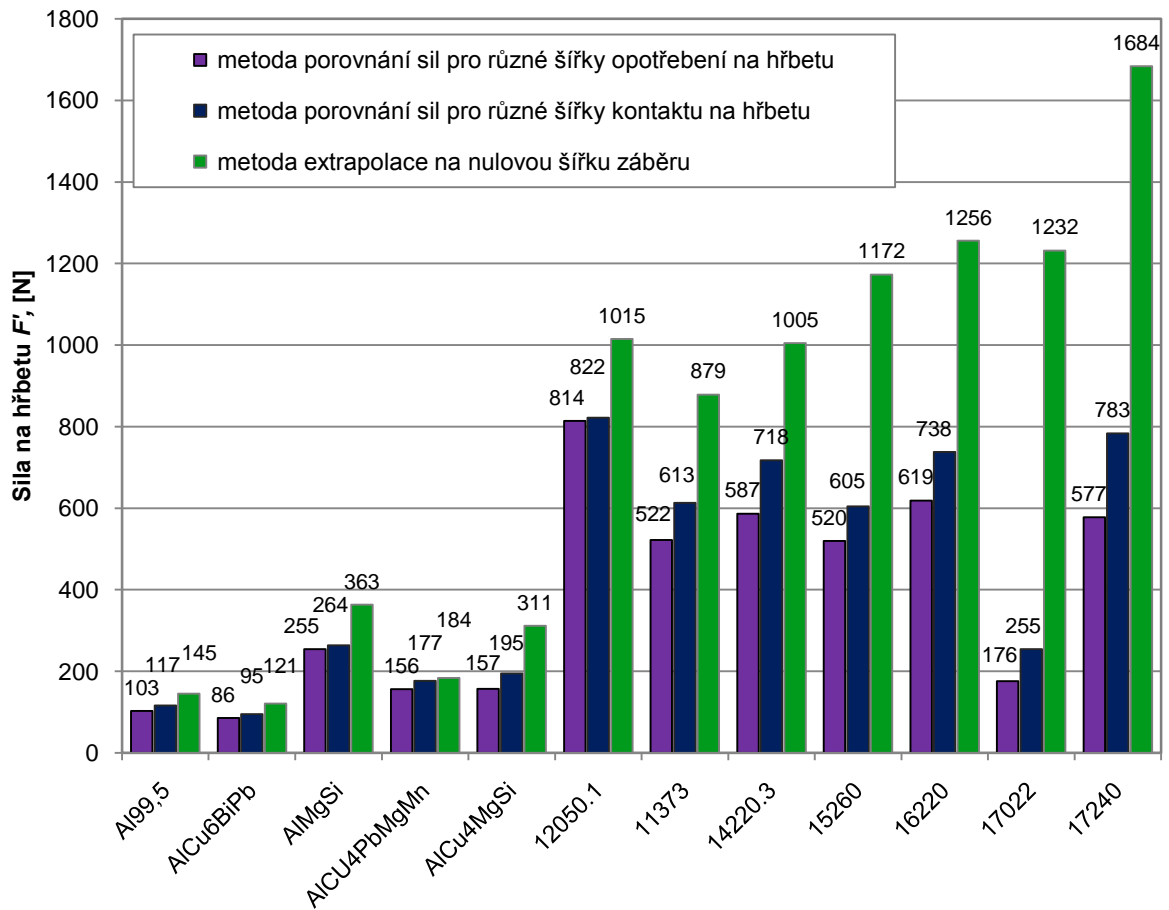
Stanovení sil na hřbetu metodou porovnání sil pro různé šířky kontaktu hřbetu při obrábění dvanácti různých materiálů je uvedeno v příloze 4.

4.5 Výsledky experimentů a jejich analýza

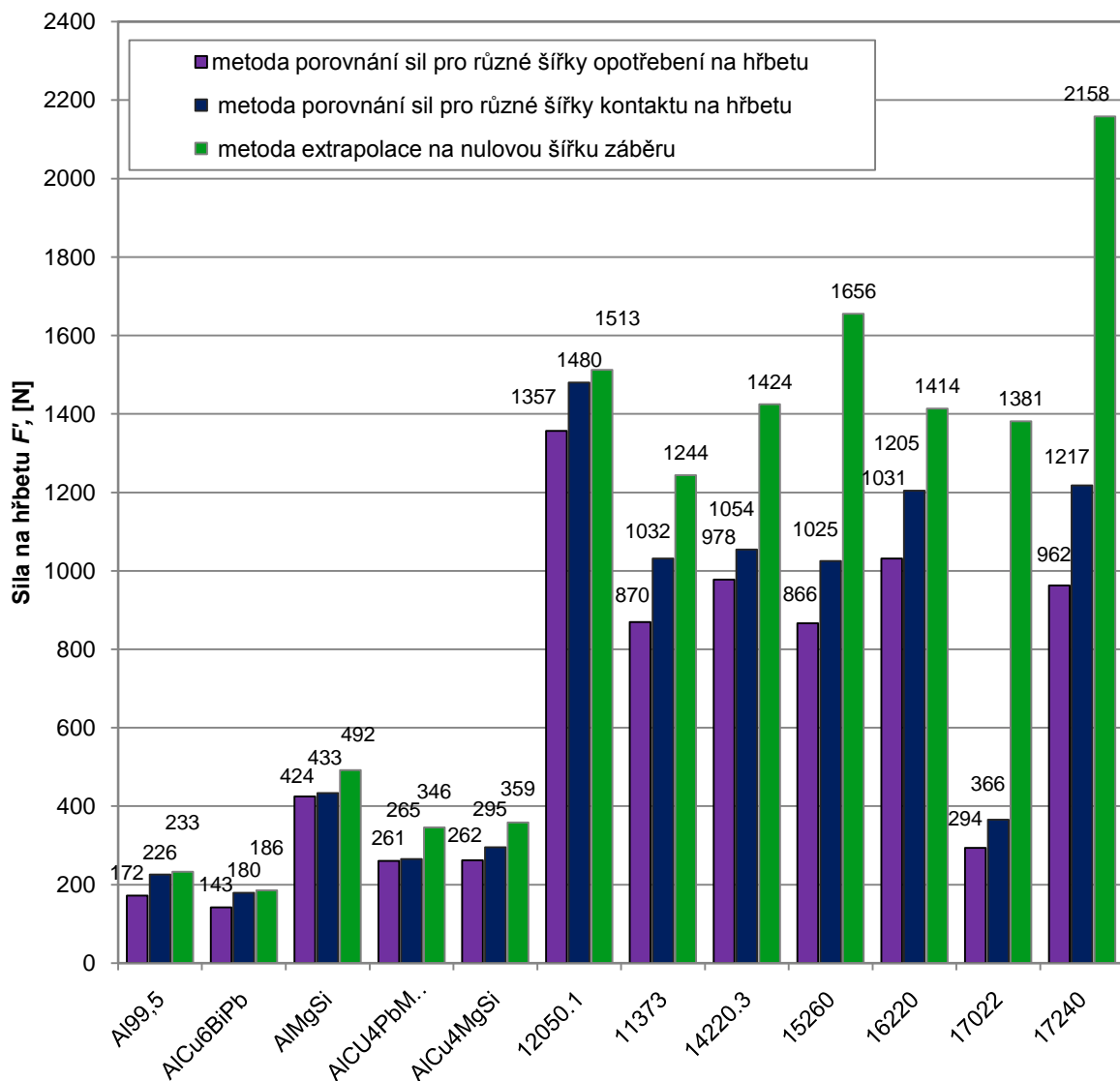
Vertikální složky F_N' a horizontální F_T' , výsledné síly F' na hřbetu byly stanoveny pro dvanáct druhů zkoušeného materiálu. Obr. 4.7 ukazuje rozdíly mezi výslednými silami na hřbetu F' stanovenými metodou extrapolace na nulovou šířku záběru, metodou porovnání sil pro různé šířky opotřebení na hřbetu a metodou porovnání sil pro různé šířky kontaktu hřbetu při obrábění různých druhů zkoušeného materiálu, a to při šířkách opotřebení na hřbetu $VB = 0,03, 0,3$ a $0,5$ mm.



a) $VB = 0,03$ mm



b) $VB = 0,3 \text{ mm}$

c) $VB = 0,5 \text{ mm}$

Obr. 4.7 Porovnání výsledných sil F' na hřbetu získaných metodou extrapolace na nulovou šířku záběru, metodou porovnání sil pro různé šířky opotřebení hřbetu a metodou porovnání sil pro různé šířky kontaktu hřbetu rezného nástroje při obrábění různých materiálů a při různých šířkách opotřebení nástroje na hřbetu VB

Bylo zjištěno, že hodnoty síly na hřbetu stanovené novou metodou porovnání sil pro různé šířky kontaktu hřbetu jsou vyšší než hodnoty stanovené metodou porovnání sil pro různé šířky opotřebení na hřbetu a menší než hodnoty stanovené metodou extrapolace na nulovou šířku záběru.

Například při obrábění s šířkou opotřebení na hřbetu $VB = 0,03 \text{ mm}$ (Obr. 4.7, a), síly na hřbetu stanovené metodou porovnání sil pro různé šířky kontaktu na hřbetu při obrábění různých druhů slitin hliníku jsou 2,7 – 5,2 krát větší, při obrábění různých druhů

konstrukčních ocelí 2,8 – 4,2 krát větší a při obrábění korozivzdorných ocelí 4,7 – 5,2 krát větší než síly na hřbetu stanovené metodou porovnání sil pro různé šířky opotřebení na hřbetu. Síly na hřbetu stanovené metodou porovnání sil pro různé šířky kontaktu na hřbetu při obrábění různých druhů slitin hliníků jsou 1,2 – 2,5 krát menší, při obrábění různých druhů konstrukčních ocelí 1,2 – 4,6 krát menší a při obrábění korozivzdorných ocelí 4,6 – 12,2 krát menší než síly na hřbetu stanovené metodou extrapolace na nulovou šířku záběru.

Při obrábění s šířkou opotřebení na hřbetu $VB = 0,3$ mm (Obr. 4.7, b), síly na hřbetu stanovené metodou porovnání sil pro různé šířky kontaktu na hřbetu při obrábění různých druhů slitin hliníku jsou o 4 – 24 % vyšší a při obrábění různých druhů konstrukčních ocelí o 16 – 22 % vyšší a při obrábění korozivzdorných ocelí o 36 – 45 % vyšší než síly na hřbetu stanovené metodou porovnání sil pro různé šířky opotřebení na hřbetu. Síly na hřbetu stanovené metodou porovnání sil pro různé šířky kontaktu hřbetu při obrábění různých druhů slitin hliníku jsou o 4 – 60 % menší, při obrábění různých druhů konstrukčních ocelí o 23 – 94 % a při obrábění korozivzdorných ocelí o 115 – 384 % menší než síly na hřbetu stanovené metodou extrapolace na nulovou šířku záběru.

Při obrábění s šířkou opotřebení na hřbetu $VB = 0,5$ mm (Obr. 4.7, c), síly na hřbetu stanovené metodou porovnání sil pro různé šířky kontaktu na hřbetu při obrábění různých druhů slitin hliníku jsou o 2 – 31 % vyšší, při obrábění různých druhů konstrukčních ocelí o 8 – 19 % vyšší a při obrábění korozivzdorných ocelí o 25 – 27 % vyšší než síly na hřbetu stanovené metodou porovnání sil pro různé šířky opotřebení na hřbetu. Síly na hřbetu stanovené metodou porovnání sil pro různé šířky kontaktu hřbetu při obrábění různých druhů slitin hliníků jsou o 3 – 30 % menší, při obrábění různých druhů konstrukčních ocelí o 17 – 62 % a při obrábění korozivzdorných ocelí o 77 – 278 % menší než síly na hřbetu stanovené metodou extrapolace na nulovou šířku záběru.

4.6 Závěr

Pro zvýšení přesnosti stanovení sil na hřbetu byla navržena nová metoda stanovení sil na hřbetu, která byla nazvána „Metoda porovnání sil pro různé šířky kontaktu na hřbetu“. Zvýšení přesnosti stanovení sil na hřbetu je založeno na měření skutečné šířky kontaktu mezi hřbetem řezného nástroje a obrobenou plochou. Oproti tomu dříve používaná metoda porovnání sil je založena na měření šířky opotřebení na hřbetu. Bylo však dokázáno, že skutečná šířka kontaktu mezi hřbetem nástroje a obrobenou plochou je podstatně větší než šířka opotřebení na hřbetu řezného nástroje.



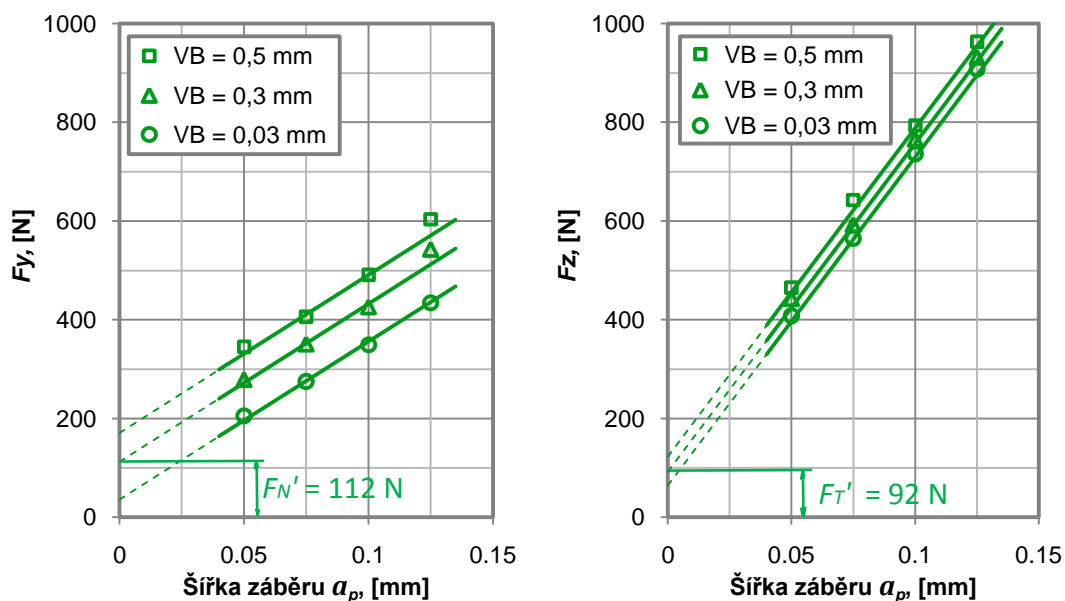
Síly na hřbetu stanovené novou metodou jsou větší než síly stanovené metodou porovnání sil pro různé šířky opotřebení na hřbetu a menší než síly stanovené metodou extrapolace na nulovou šířku záběru.

5. VLIV ŠÍŘKY ZÁBĚRU NA SÍLU NA HŘBETU

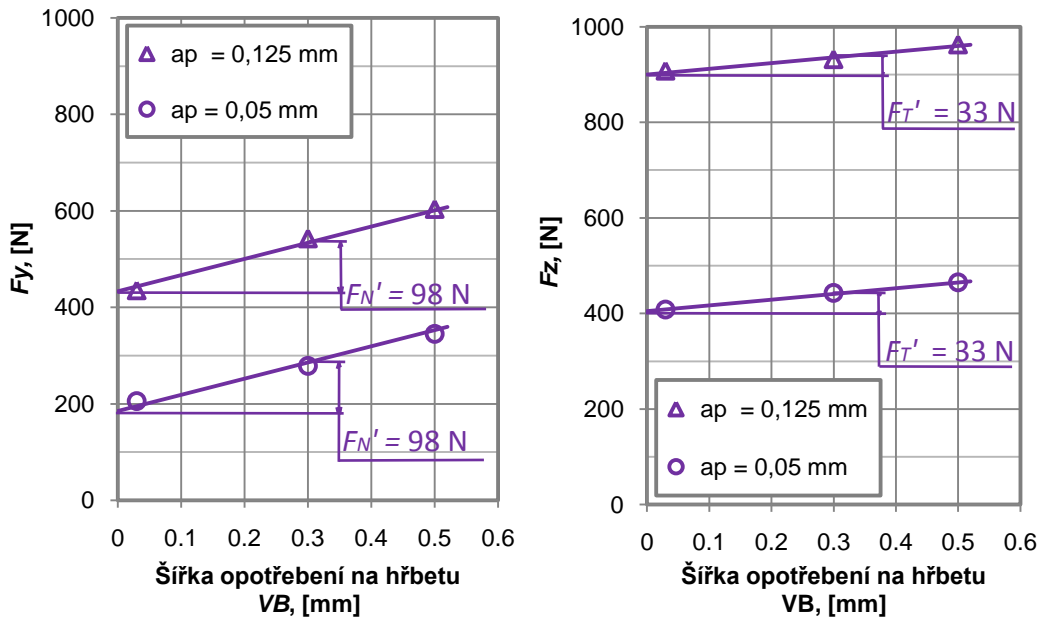
Albrecht (10) uváděl, že síly působící na čele se účastní procesu tvorby třísky. Později, Zorev (13) experimentálně dokázal, že síly na hřbetu nejsou součástí tohoto procesu a uvedl, že tyto síly vznikají jako důsledek elastické reakce obrobeného materiálu na hřbet nástroje (včetně poloměru zaoblení břitu), také předpokládal, že síly na hřbetu nezávisí na silách na čele z čehož se vyvozoval nezávislost sil na hřbetu na šířce záběru.

Z literatury jsou známy metody stanovení sil na hřbetu, a sice metoda extrapolace na nulovou šířku záběru a metoda porovnání sil pro různé šířky opotřebení na hřbetu řezného nástroje, které jsou založeny na předpokladu, že síly na hřbetu nezávisí na silách na čele. Tyto metody byly vyvinuty Albrechtem (10) a Zorevem (13) a používají se pro stanovení sil na hřbetu doposud (16, 18, 42).

V částí 4.4 byly uvedeny výsledky stanovení sil na hřbetu při obrábění hliníkové slitiny Al99,5 metodou extrapolace na nulovou šířku záběru a_p a metodou porovnání sil pro různé šířky opotřebení na hřbetu nástroje VB (Obr. 5.1).



a)



b)

Obr. 5.1 Stanovení síly na hřbetu při obrábění hliníkové slitiny Al99,5

a) metodou extrapolace na nulovou šířku záběru;

b) metodou porovnání sil pro různé šířky opotřebení na hřbetu nástroje

Obr. 5.1 (a) ukazuje výsledky stanovení sil na hřbetu metodou extrapolace na nulovou šířku záběru a_p . Experimenty byly prováděny při šířkách záběru $a_p = 0,05$; $0,075$; $0,1$ a $0,125$ mm. Bylo zjištěno, že při opotřebení $VB = 0,3$ mm vertikální složka síly na hřbetu $F_N' = 112$ N a horizontální $F_T' = 92$ N. Je důležité si uvědomit, že při použití metody extrapolace na nulovou šířku záběru, nejsou složky síly na hřbetu (F_N' , F_T') závislé na šířce záběru a jsou rovny (112 N a 92 N) pro šířku záběru od $0,05$ mm do $0,125$ mm.

Obr. 5.1 (b) ukazuje výsledky stanovení sil na hřbetu metodou porovnání sil pro různé šířky opotřebení VB na hřbetu. Bylo zjištěno, že při opotřebení na hřbetu $VB = 0,3$ mm, vertikální složka síly na hřbetu $F_N' = 98$ N a horizontální $F_T' = 33$ N. Je důležité si uvědomit, že při použití metody porovnání sil pro různé šířky opotřebení na hřbetu, nejsou složky síly na hřbetu (F_N' , F_T') považovány za závislé na šířce záběru a jsou rovny (98 N a 33 N) pro šířku záběru od $0,05$ do $0,125$ mm.

Bylo zjištěno, že při použití metody extrapolace na nulovou šířku záběru a metody porovnání sil pro různé šířky opotřebení na hřbetu, stanovené síly na hřbetu jsou nezávislé na šířce záběru. V tomto kontextu je důležité zjistit vliv šířky záběru na síly na hřbetu použitím nově vyvinuté metody porovnání sil pro různé šířky kontaktu hřbetu.

5.1 Experimentální stanovení sil na hřbetu řezného nástroje metodou porovnání sil pro různé šířky kontaktu na hřbetu

Metoda porovnání sil pro různé šířky kontaktu na hřbetu byla použita pro stanovení sil na hřbetu pro dvanáct různých druhů materiálů. Síly na hřbetu byly porovnány pro šířky záběru 0,05 mm a 0,125 mm. Postup experimentu byl popsán v části 4.4.

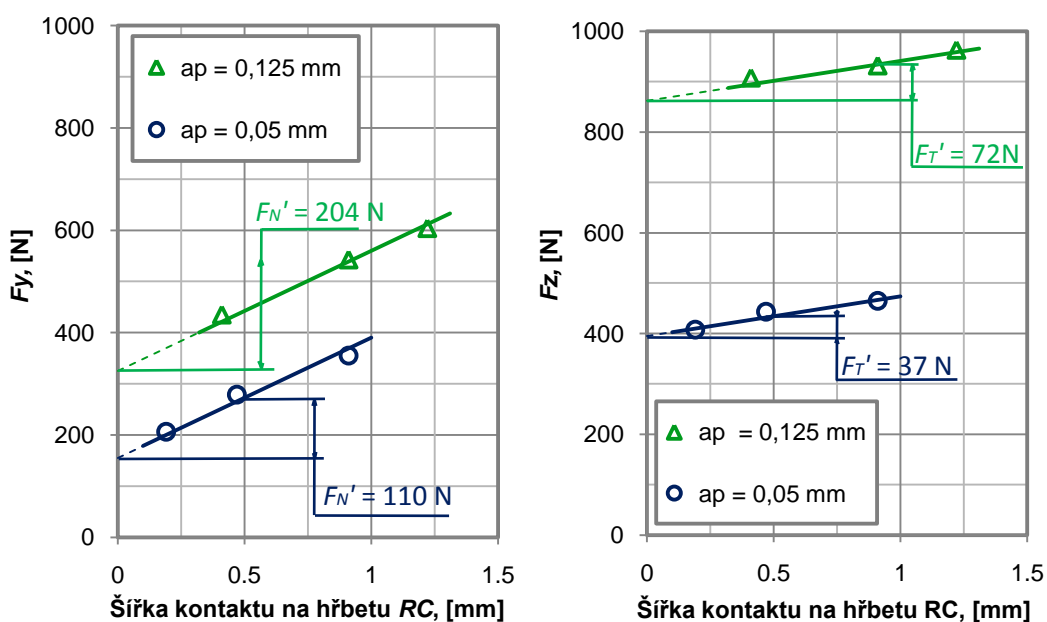
Tab. 5.1 ukazuje rozdíly mezi opotřebením VB na hřbetu a skutečným kontaktem RC hřbetu řezného nástroje a obrobené plochy při obrábění různých materiálů. Tyto experimenty byly provedeny pro opotřebenění $VB = 0,03$ mm; 0,3 mm a 0,5 mm pro dvanáct druhů materiálů. Například bylo zjištěno, že při obrábění materiálu $AlCu4MgSi$ skutečný kontakt $RC = 0,62$ mm stanovený pro šířku záběru $a_p = 0,125$ mm byl o 59 % větší, než skutečný kontakt $RC = 0,39$ mm stanovený pro šířku záběru $a_p = 0,05$ mm při stejném, opotřebenění na hřbetu $VB = 0,3$ mm. Tím bylo dokázáno, že skutečná plocha kontaktu mezi hřbetem řezného nástroje a obrobenou plochou materiálu při šířce záběru $a_p = 0,125$ mm byla podstatně větší, než skutečná plocha kontaktu při šířce záběru $a_p = 0,05$ mm (Tab. 5.1) při stejném opotřebenění VB na hřbetu.

Tab. 5.1 Šířka opotřebenění na hřbetu VB a šířka skutečného kontaktu RC při šířce záběru $a_p = 0,05$ mm a $a_p = 0,125$ mm pro dvanáct materiálů.

RC, [mm]									
Material	Al99,5		AlCu6BiPb		AlMgSi		AlCu4PbMgMn		
a_p , [mm]	0,05	0,125	0,05	0,125	0,05	0,125	0,05	0,125	
VB, [mm]	0,03	0,19	0,41	0,2	0,31	0,11	0,18	0,14	0,23
	0,3	0,47	0,91	0,43	0,48	0,42	0,52	0,48	0,67
	0,5	0,91	1,22	0,81	0,91	0,69	0,83	0,72	0,9
Material	AlCu4MgSi		12050.1		11373		14220.3		
a_p , [mm]	0,05	0,125	0,05	0,125	0,05	0,125	0,05	0,125	
VB, [mm]	0,03	0,12	0,28	0,31	0,38	0,29	0,41	0,22	0,4
	0,3	0,39	0,62	1	1,2	0,82	0,9	0,96	1,34
	0,5	0,59	0,83	1,8	1,92	1,38	1,52	1,41	1,63
Material	15260		16220		17022		17240		
a_p , [mm]	0,05	0,125	0,05	0,125	0,05	0,125	0,05	0,125	
VB, [mm]	0,03	0,18	0,26	0,3	0,42	0,28	0,61	0,38	0,58
	0,3	0,59	0,72	0,87	1	0,78	1,04	1,1	1,52
	0,5	1	1,2	1,42	1,55	1,12	1,37	1,71	1,93

Takže při obrábění hliníkové slitiny Al99,5 (Obr. 5.2) při opotřebení na hřbetu řezného nástroje $VB = 0,3$, při obrábění s šířkou záběru $a_p = 0,05$ mm, vertikální složka síly na hřbetu $F_N' = 110$ N; při obrábění s šířkou záběru $a_p = 0,125$ mm, vertikální složka síly na hřbetu $F_N' = 204$ N. Při obrábění s šířkou záběru $a_p = 0,05$ mm, horizontální složka síly na hřbetu $F_T' = 37$ N; při obrábění s šířkou záběru $a_p = 0,125$ mm, horizontální složka síly na hřbetu $F_T' = 72$ N.

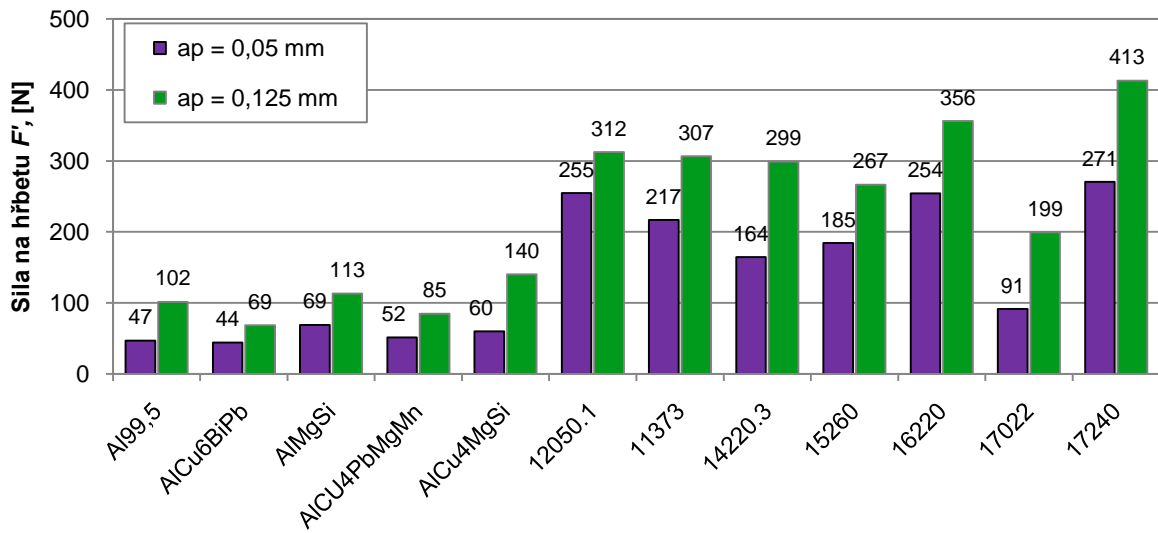
Hodnoty sil na hřbetu stanovené metodou porovnání sil pro různé šířky kontaktu hřbetu při obrábění dvanácti různých materiálů a při šířkách záběru $a_p = 0,05$ a $0,125$ mm jsou uvedeny v příloze 5.



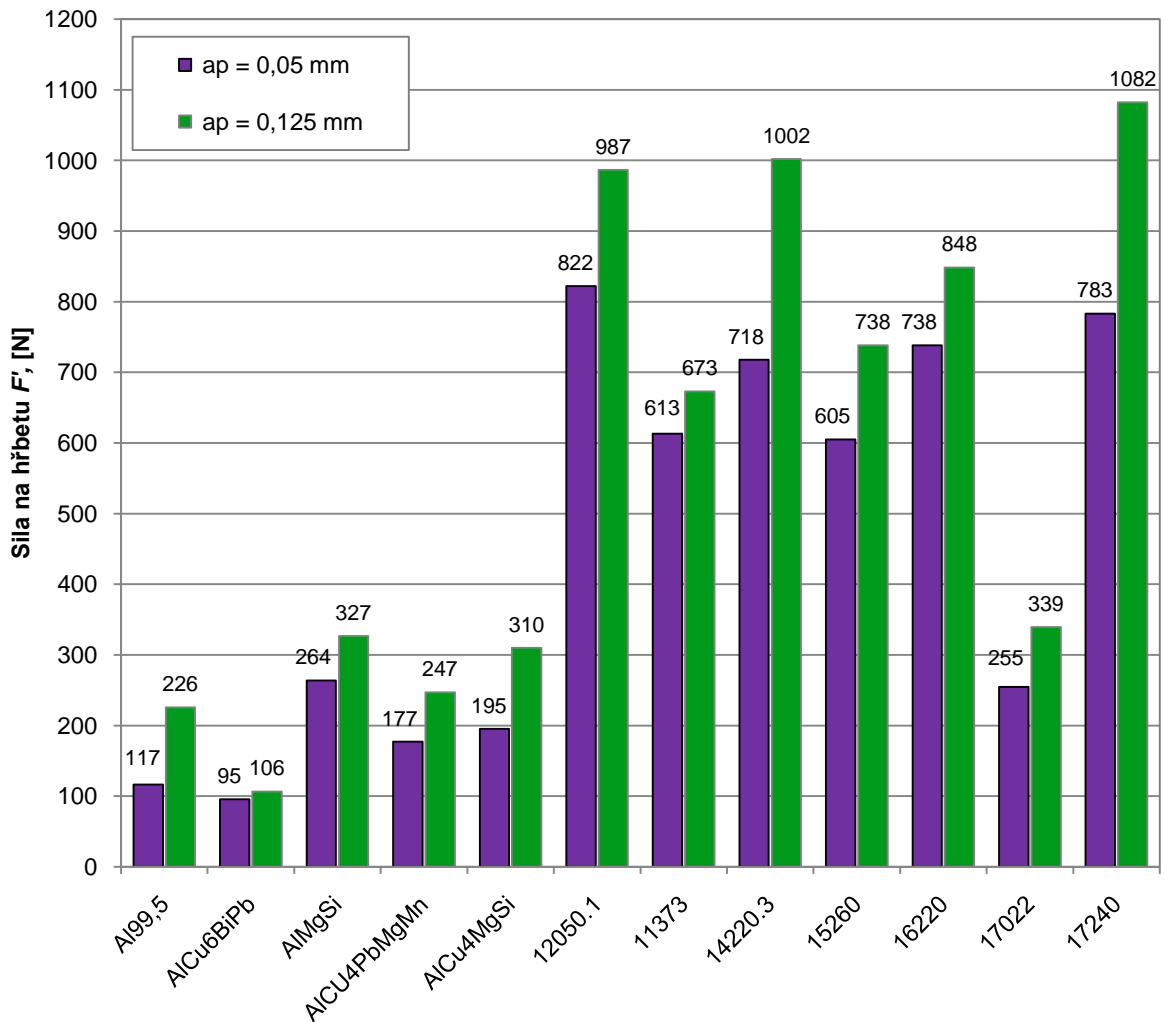
Obr. 5.2 Vertikální složka F_y a horizontální složka F_z výsledné řezné síly R jako funkce šířky kontaktu hřbetu RC při obrábění hliníkové slitiny Al99,5

5.2 Výsledky experimentů a jejich analýza

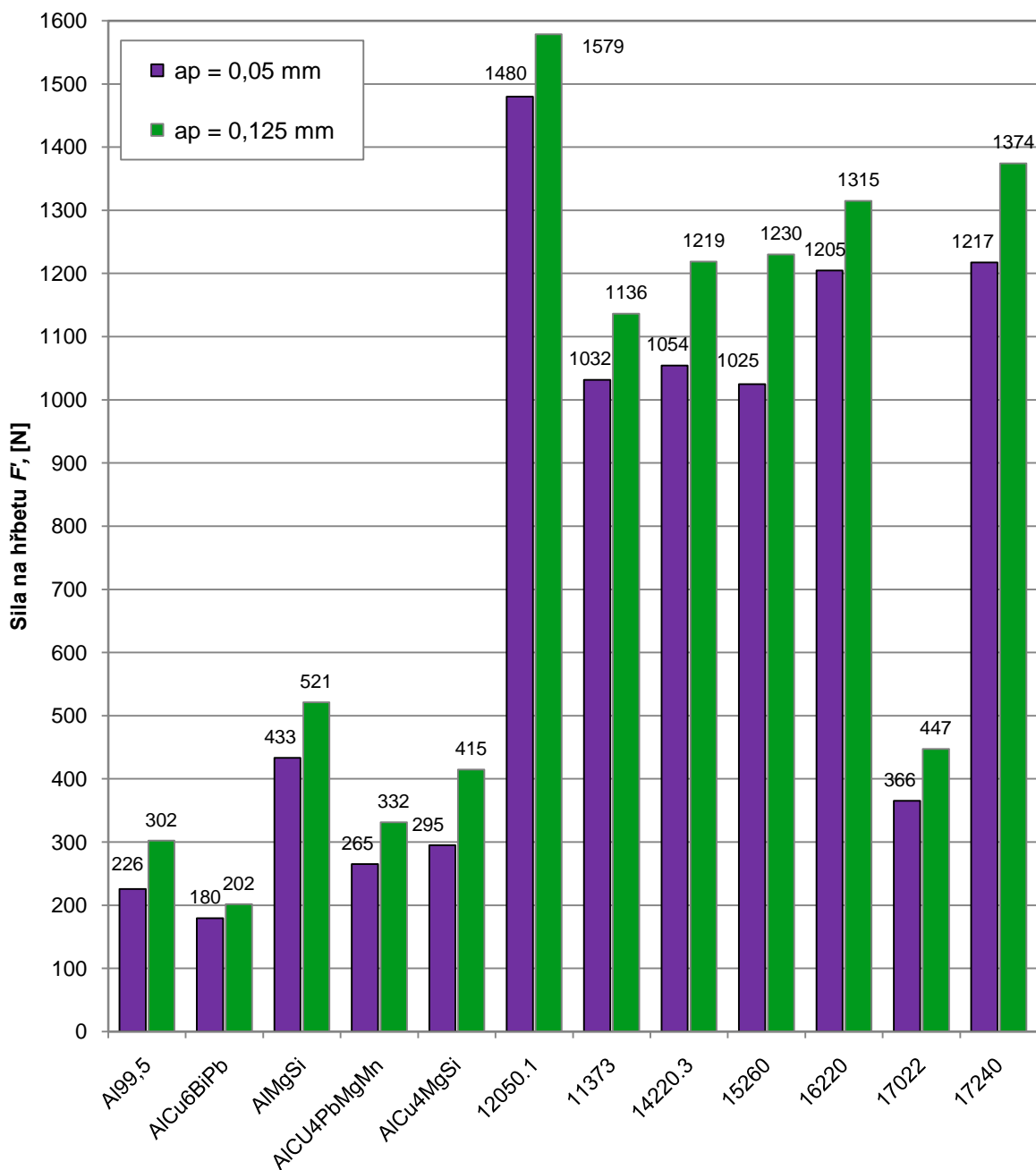
Metodou porovnání sil pro různé šířky kontaktu RC byly stanoveny vertikální a horizontální složky, výsledný síly na hřbetu F' pro dvanáct druhů materiálu. Obr. 4.7 ukazuje rozdíly mezi výslednými silami na hřbetu F' stanovenými touto metodou při obrábění různých materiálů při šířkách záběru $a_p = 0,05$ mm a $a_p = 0,125$ mm.



a) $VB = 0,03$ mm



b) $VB = 0,3$ mm

c) $VB = 0,5$ mm

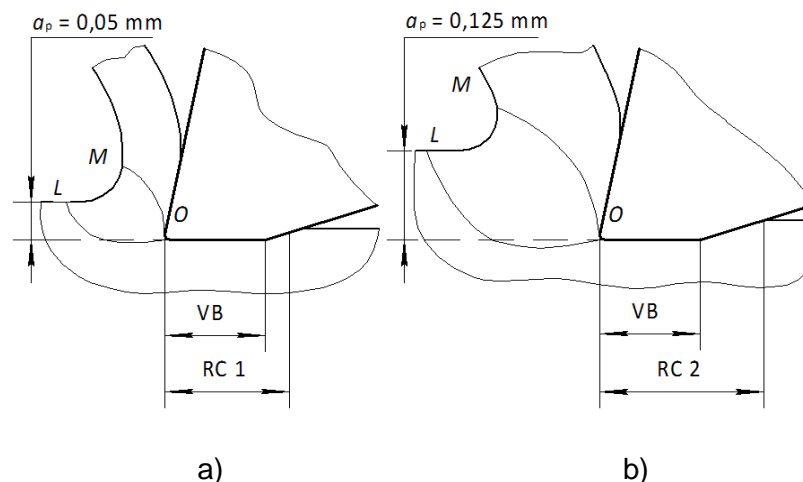
Obr. 5.3 Porovnání sil na hřbetu F' zjištěných metodou porovnání sil pro různé šířky kontaktu RC hřbetu řezného nástroje při obrábění různých materiálů pro různé šířky záběru ($a_p = 0,05$ mm a $a_p = 0,125$ mm) při různých šířkách opotřebení na hřbetu VB .

Tak bylo zjištěno, že šířka záběru a_p ovlivňuje síly na hřbetu: čím větší je šířka záběru, tím větší je síla na hřbetu. Například při obrábění s šířkou opotřebení na hřbetu $VB = 0,03$ mm (Obr. 4.7, a), síly na hřbetu stanovené metodou porovnání sil pro různé šířky kontaktu

hřbetu při obrábění různých druhů materiálů s šířkou záběru $a_p = 0,125$ mm jsou o 23 – 133 % vyšší, při obrábění s šířkou opotřebením na hřbetu $VB = 0,3$ mm (Obr. 4.7, b) o 10 – 94 % vyšší a při obrábění s šířkou opotřebením na hřbetu $VB = 0,5$ mm (Obr. 4.7, c) o 7 – 41 % vyšší, než síly na hřbetu stanovené při obrábění s šířkou záběru $a_p = 0,05$ mm.

Na základě tohoto zjištění je zřejmé, že pro stanovení síl na hřbetu metodu extrapolace na nulovou šířku záběru nelze použít, protože vychází z ne zcela ověřené hypotézy, že šířka záběru neovlivňuje síly na hřbetu (Obr. 5.1, a). Získané výsledky potvrzují závěry Stevenson (14, 15), že metoda extrapolace na nulovou šířku záběru je pro stanovení sil na hřbetu nevhodná.

Výsledky získané ověřovacími experimenty lze vysvětlit následujícím způsobem. Při obrábění s velkou šířkou záběru (Obr. 5.4, b) je před břitem nástroje oblast napětí OLM větší, než při obrábění s malou šířkou záběru (Obr. 5.4, a). Větší oblast OLM má větší vliv na obrobenou plochu i oblast její plastické deformace (čára LO začíná ve větší šířce záběru). Proto obrobená plocha podrobena vyššímu stupni deformace, která zvyšuje její reakci projevující se ve zvětšení sil na hřbetu a zvětšení skutečné plochy kontaktu mezi hřbetem rezného nástroje a obrobenou plochou.



Obr. 5.4 Mechanismus tvorby třísky při obrábění s různými šířkami záběru $a_p = 0,05$ mm (a) a $a_p = 0,125$ mm (b), LO – začátek oblasti primárních plastických deformací, MO – konec oblasti primárních plastických deformací Zoreva (13), VB - opotřebením na hřbetu, RC - skutečný kontakt hřbetu.

5.3 Závěr

Dosud se předpokládalo, že šířka záběru neovlivňuje síly na hřbetu. Na tomto předpokladu byly založeny metoda extrapolace na nulovou šířku záběru a metoda

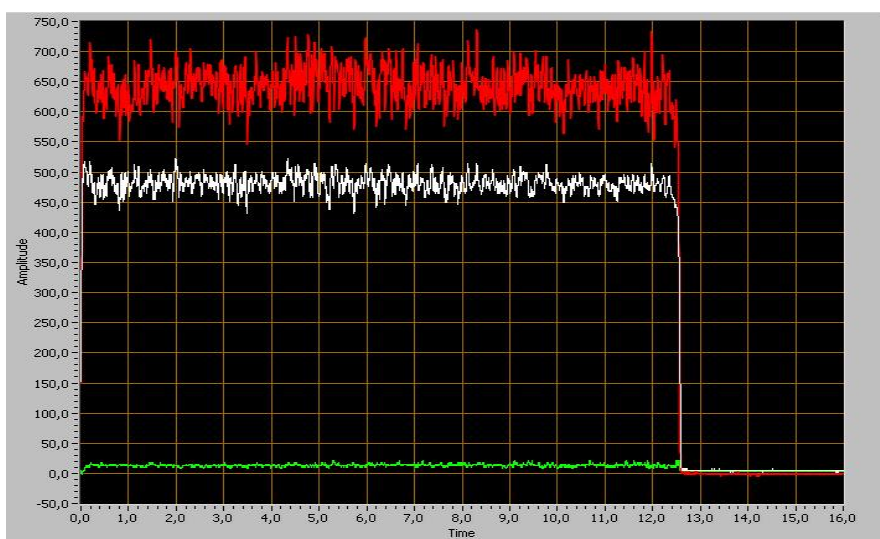


porovnání sil pro různé šířky opotřebení na hřbetu řezného nástroje, které se používají pro stanovení sil na hřbetu doposud. Na základě provedených experimentů bylo poprvé zjištěno, že šířka záběru ovlivňuje síly na hřbetu (čím větší je šířka záběru, tím větší je síla na hřbetu).

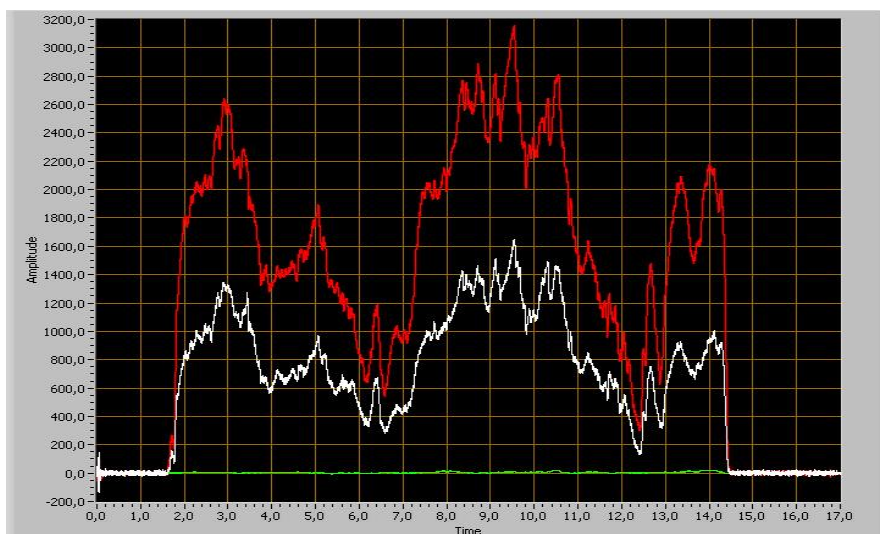
Bylo tak dokázáno, že metodu extrapolace na nulovou šířku záběru pro stanovení sil na hřbetu nelze použít, protože tato metoda byla založena na hypotéze ne zcela ověřené.

6. METODA STANOVENÍ SIL NA HŘBETU ŘEZNÉHO NÁSTROJE PRO MATERIÁLY MÉNĚ PLASTICKY DEFORMOVATELNÉ

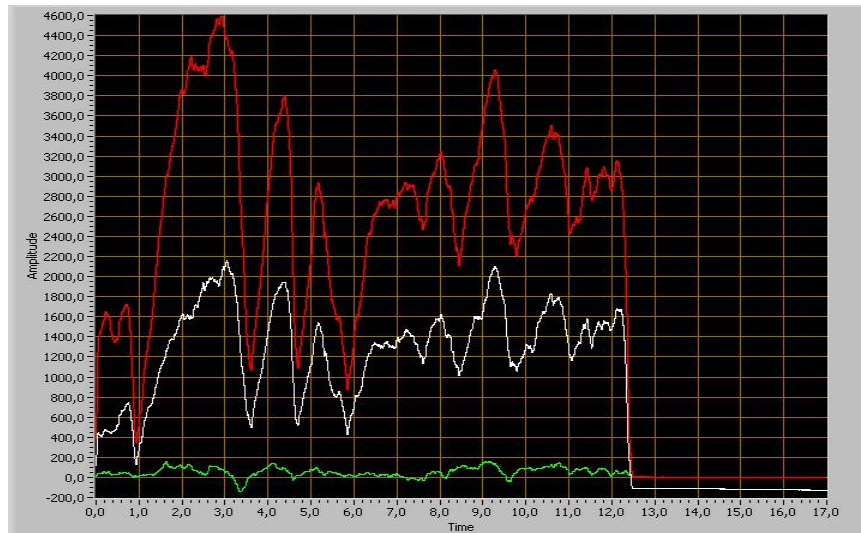
Během pokusů stanovení sil na hřbetu při obrábění materiálů méně plasticky deformovatelné (se sníženou plasticitou nebo s nízkou tážností) bylo zjištěno, že proces obrábění s šířkou opotřebení na hřbetu $VB = 0,03$ mm probíhal bez výrazného vychýlení a umožnil měření sil na hřbetu (Obr. 6.1.a, Obr. 6.2.a). Proces obrábění při použití řezného nástroje s šířkami opotřebení na hřbetu $VB = 0,3$ a $0,5$ mm při obrábění materiálů méně plasticky deformovatelné byl nestabilní a vykazoval velký rozptyl stanovených hodnot řezných sil, což znemožnilo stanovit síly na hřbetu (Obr. 6.1. b, c; Obr. 6.2. b, c).



a)

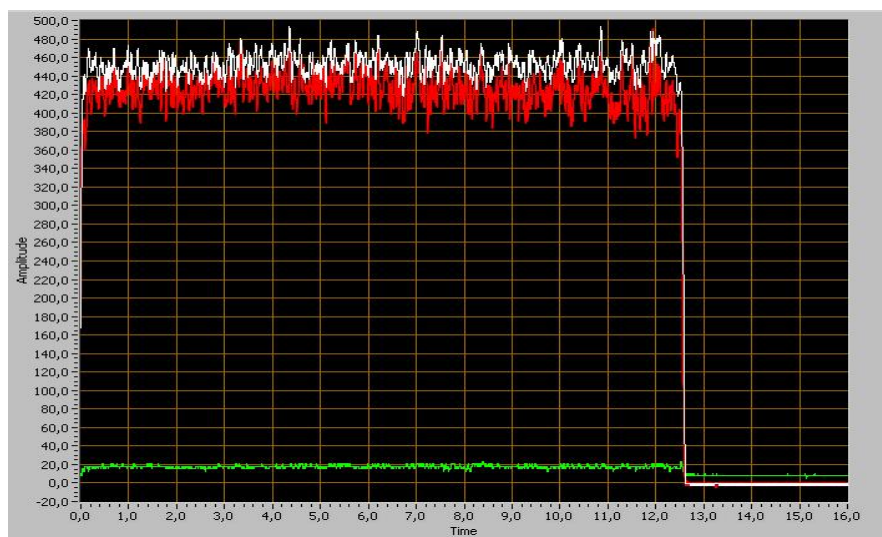


b)

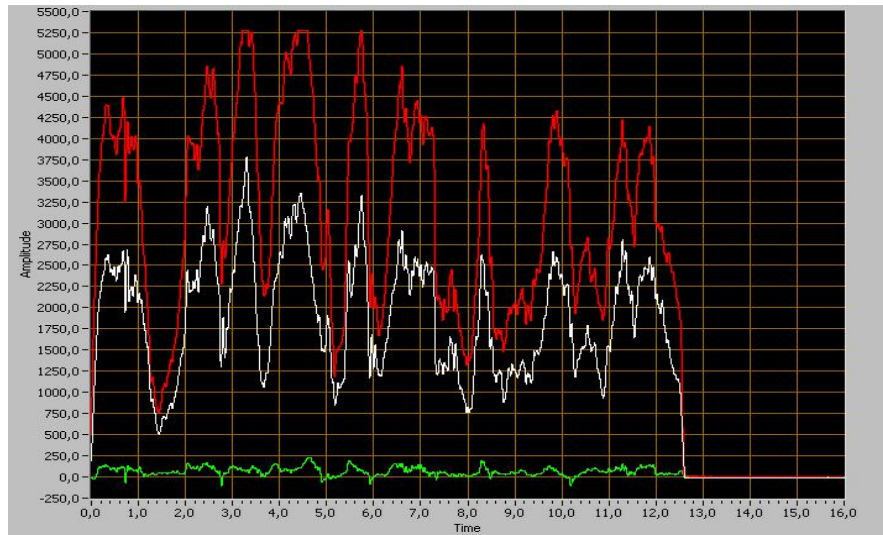


c)

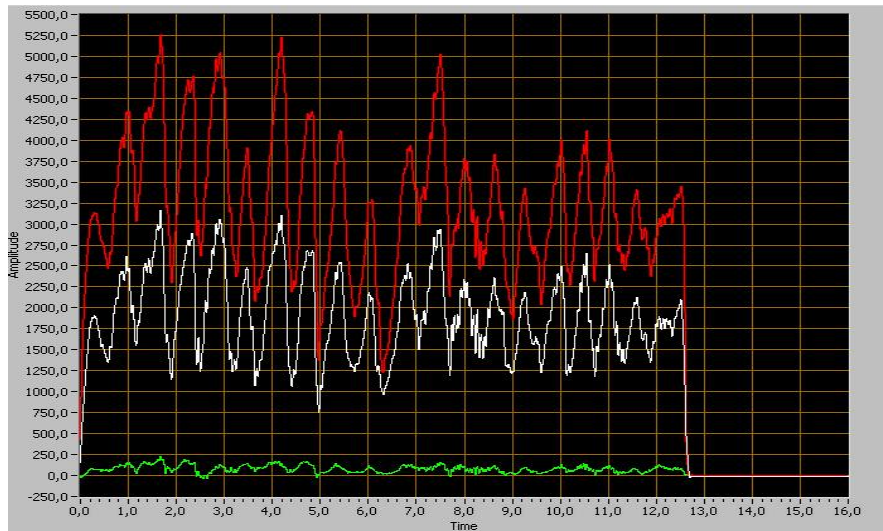
Obr. 6.1 Naměřené hodnoty složek výsledné řezné síly R při obrábění bronzu 423018 a šířce záběru $a_p = 0,05$ mm a opotřebení na hřbetu $VB = 0,03$ mm (a), $VB = 0,2$ mm (b), $VB = 0,5$ mm (c). Bílá čára – vertikální složka F_y ; červená čára – horizontální složka F_z



a)



b)

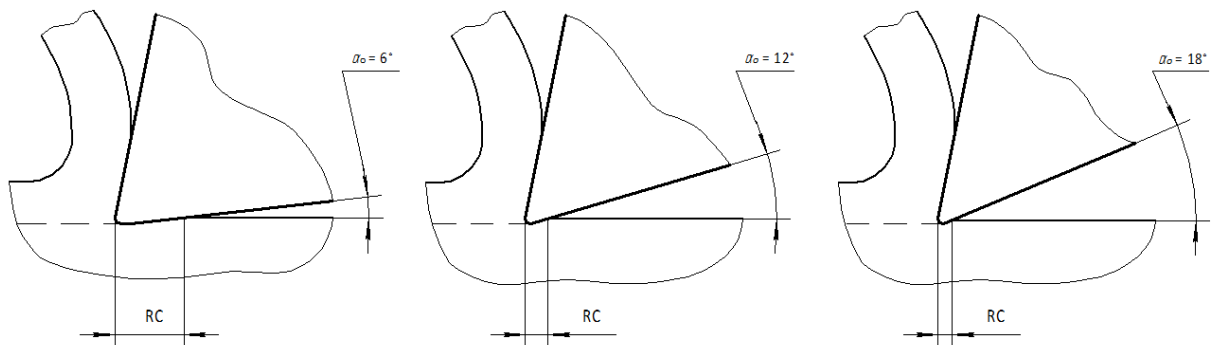


c)

Obr. 6.2 Naměřené hodnoty složek výsledné řezné síly R při obrábění litiny 422420 a šířce záběru $a_p = 0,05$ mm a opotřebení na hřbetu $VB = 0,03$ mm (a), $VB = 0,2$ mm (b), $VB = 0,5$ mm (c). Bílá čára – vertikální složka F_y ; červená čára – horizontální složka F_z

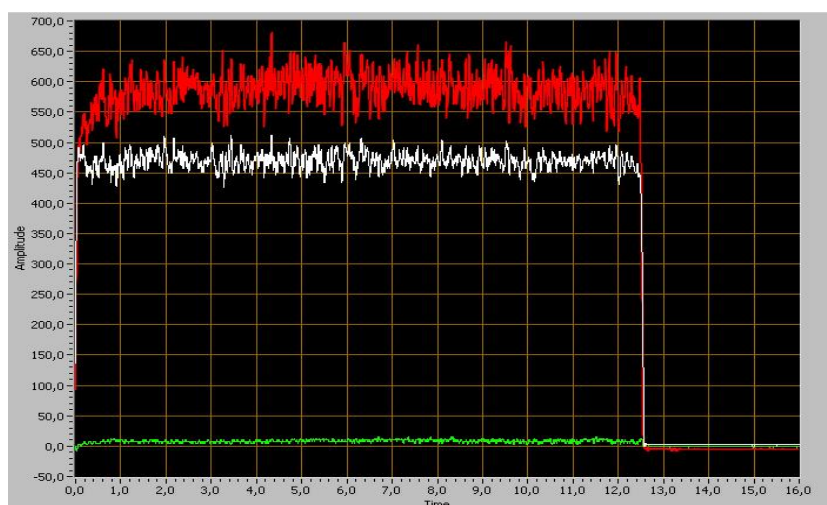
Proto byla navržena nová metoda stanovení sil na hřbetu pro obrábění materiálů méně plasticky deformovatelné. Tato metoda je založena na změně kontaktu mezi hřbetem nástroje a obrobekou plochou tím, že se používají řezné nástroje s různým ortogonálním nástrojovým úhlem hřbetu α_o . Pro vyhodnocení spolehlivosti této metody stanovení sil na hřbetu pro materiály méně plasticky deformovatelné byla navržena sekvence experimentů.

V kapitole 4 byla navržena nová přesnější metoda stanovení sil na hřbetu, (porovnání sil pro různé šířky kontaktu hřbetu). Při obrábění materiálů lehce plasticky deformovatelné (s velkou plasticitou, nebo s velkou tažností), oproti skupině méně plasticky deformovatelné, s opotřebením na hřbetu nástroje, je proces tvorby třísky stabilní, takže je možné tuto metodu použít. Avšak její použití při obrábění materiálů méně plasticky deformovatelné není vhodné, kvůli velké variaci hodnot řezných sil při použití nástroje s opotřebením na hřbetu (Obr. 6.1, Obr. 6.2).

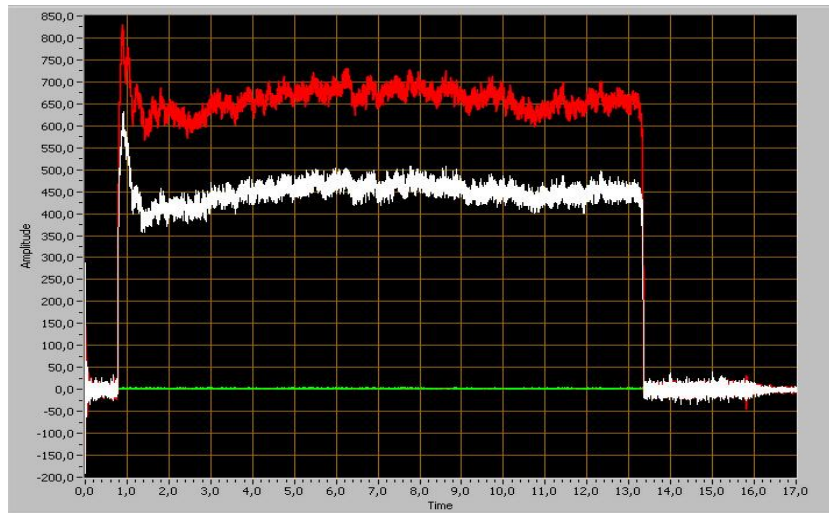


Obr. 6.3 Proces tvorby třísky při řezání s různými ortogonálními nástrojovými úhly hřbetu 6° (vlevo), 12° (uprostřed) a 18° (vpravo). RC – šířka kontaktu na hřbetu.

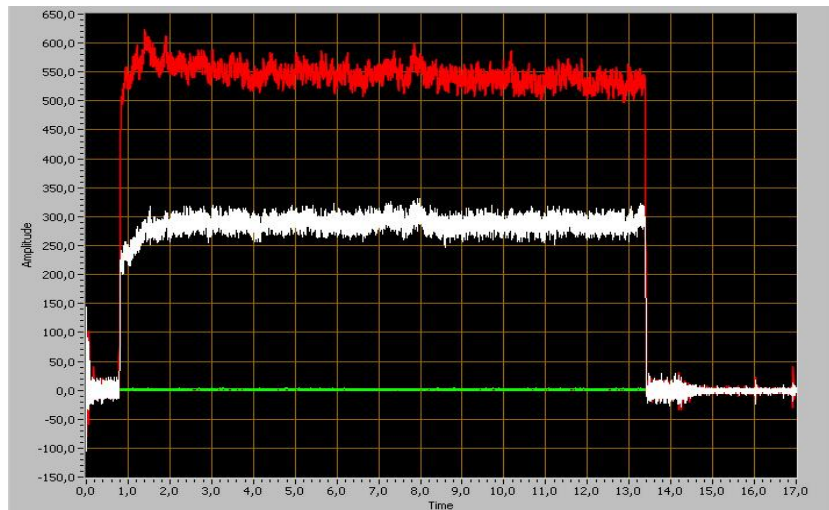
Bylo navrženo změnit délku kontaktu hřbetu řezného nástroje s obrobenou plochou změnou ortogonálního nástrojového úhlu hřbetu (Obr. 6.3). Pro změření sil na hřbetu byla použita nová metoda a řezné nástroje s různými ortogonálními nástrojovými úhly hřbetu $\alpha_0 = 6^\circ$, 12° a 18° . Proces tvorby třísky při obrábění materiálů méně plasticky deformovatelné při různých ortogonálních nástrojových úhlech hřbetu byl stabilní a získané hodnoty sil na hřbetu to potvrdily (Obr. 6.4).



a)



b)



c)

Obr. 6.4 Naměřené hodnoty složek výsledné řezné síly R při obrábění bronzu 423018 a šířce záběru $a_p = 0,05$ mm pro různé ortogonální nástrojové úhly hřbetu $\alpha_o = 6^\circ$ (a), 12° (b) a 18° (c). Bílá čára – vertikální složka F_y ; červená čára – horizontální složka F_z

6.1 Nová metoda pro stanovení sil na hřbetu řezného nástroje pro materiály méně plasticky deformovatelné

Pro stanovení sil na hřbetu byla použita metodika uvedená v kapitole 2.4.

Pomocí dynamometru byly změřeny dvě složky výsledné řezné síly R (vertikální F_y a horizontální F_z) při různých šířkách záběru a různých šířkách opotřebení na hřbetu. Vertikální složka F_N' a horizontální F_T' výsledné síly na hřbetu F' byly stanoveny pomocí nové metody porovnání sil pro různé šířky kontaktu na hřbetu.

Měření řezných sil bylo provedeno při ortogonálním 2D obrábění hoblováním (43) na univerzální frézce FA4A – 4. Řezný nástroj byl upnut svisle ve speciálním držáku na frézovací hlavě. Jako nástroj pro hoblování byl použit soustružnický nůž Pramet CTCPN 2514 M16 s vyměnitelnou břitovou destičkou ze slinutého karbidu TPUN 160304; S26. Nástrojový ortogonální úhel čela řezného nástroje $\gamma_o = 5^\circ$ a nástrojový ortogonální úhel hřbetu α_o byl broušen na 6° , 8° a 12° . Obrobek byl upnut ve svěráku, který byl upevněn na dynamometru KISTLER 9265B. Dynamometr byl upnut na stole frézky. Přísuv a posuv byl na stroji nastavován manuálně a kontrolován indikátorem s přesností $\pm 0,001$ mm. Obrábění probíhalo v automatickém cyklu, konstantní rychlosti $v_c = 0,45$ m/min podélného pohybu stolu. Chyba měření složek výsledné řezné síly nepřekročila ± 10 %. Každé měření sil bylo opakováno 5x. Z výsledků měření byla vypočítána průměrná hodnota řezné síly, směrodatná odchylka a statistický interval spolehlivosti. Obrobky o rozměrech 100×8 mm byly z následujících materiálů: mosaz 42 3222 (110 HB), bronz 42 3046 (120 HB), 42 3018 (139 HB) a litina 42 2420 (182 HB). Jako procesní kapalina byla použita voda.

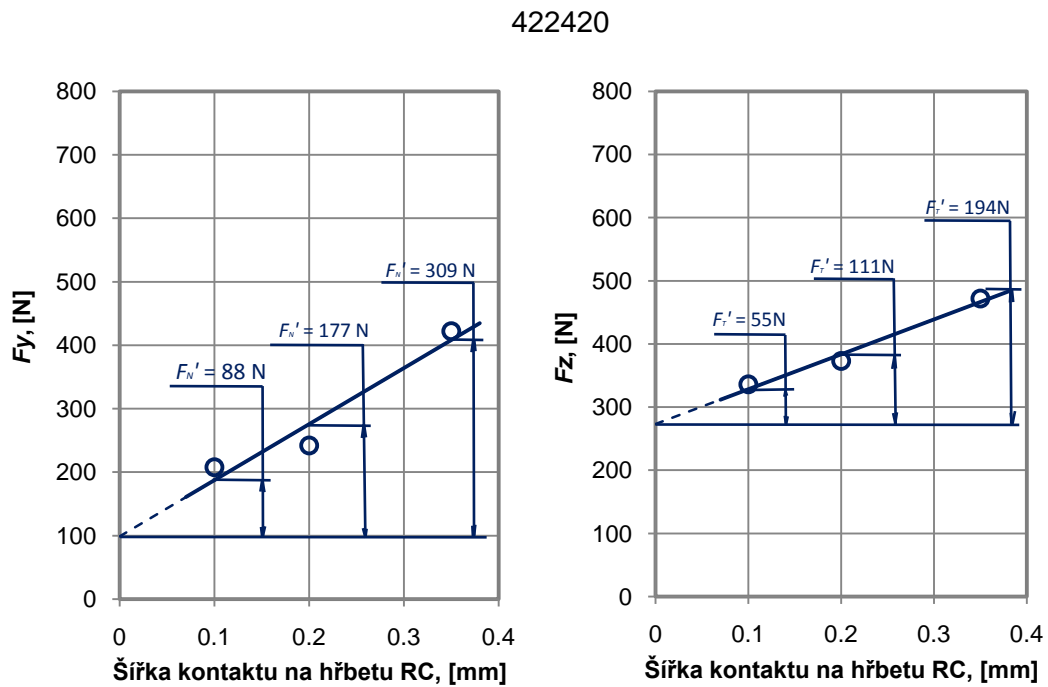
Použití minimální řezné rychlosti a vody jako procesní kapaliny zabránilo vzniku nárůstku na čele řezného nástroje a zajistilo plný kontakt mezi hřbetem řezného nástroje a obrobenou plochou. Opatření na hřbetu bylo imitováno broušením hřbetu nástroje na nástrojařské brusce. Šířka opotřebení na hřbetu byla kontrolována pomocí nástrojového ručního mikroskopu MPB - 2 (lupa Brinell) při dvacetičtyřnásobném zvětšení (24x).

Pro měření skutečného kontaktu RC mezi hřbetem řezného nástroje a obrobenou plochou materiálu byla doplněna výše uvedená metodika následovně: hřbet nástroje byl před obráběním obarven. Délka skutečného kontaktu RC byla změřena po obrábění pomocí mikroskopu s přesností $\pm 0,005$ mm. Každé měření RC bylo opakováno desetkrát a z naměřených hodnot byl vypočten aritmeticky průměr. Tímto způsobem zjištěné a statisticky zpracované hodnoty skutečného kontaktu RC hřbetu řezného nástroje s obrobenou plochou při různých nástrojových ortogonálních úhlech hřbetu α_o pro materiály méně plasticky deformovatelné jsou v Tab. 6.1.

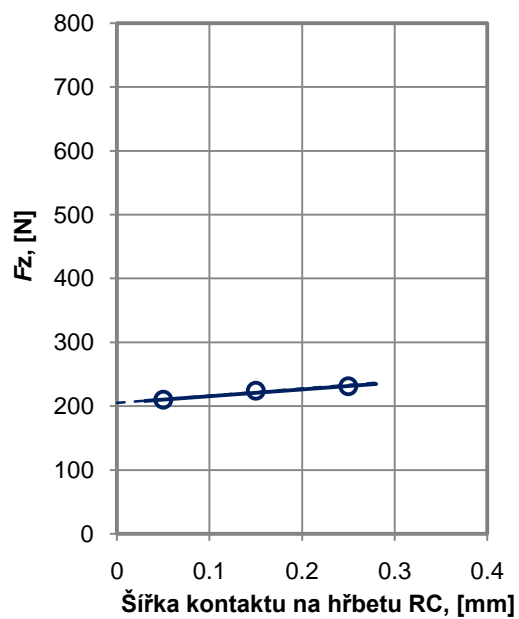
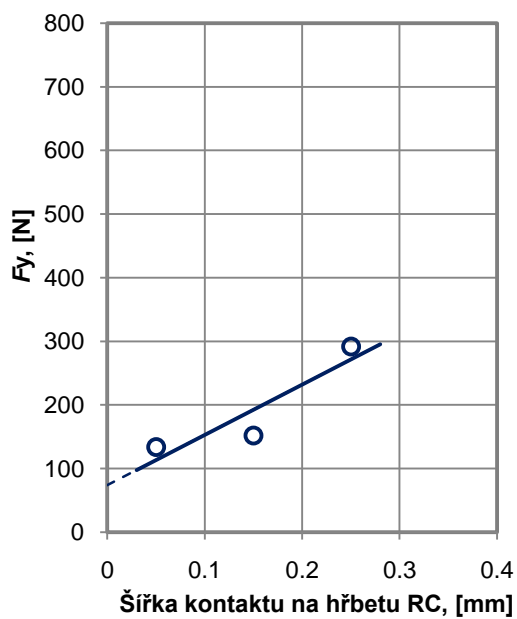
Tab. 6.1 Nástrojový ortogonální úhel hřbetu α_0 a skutečný kontakt hřbetu řezného nástroje s obrobenou plochou RC při obrábění materiálů méně plasticky deformovatelné.

α_0 , [°]	RC, [mm]			
	42 3222	42 3046	42 2420	42 3018
6°	0,26	0,25	0,36	0,31
12°	0,16	0,15	0,2	0,19
18°	0,04	0,05	0,1	0,09

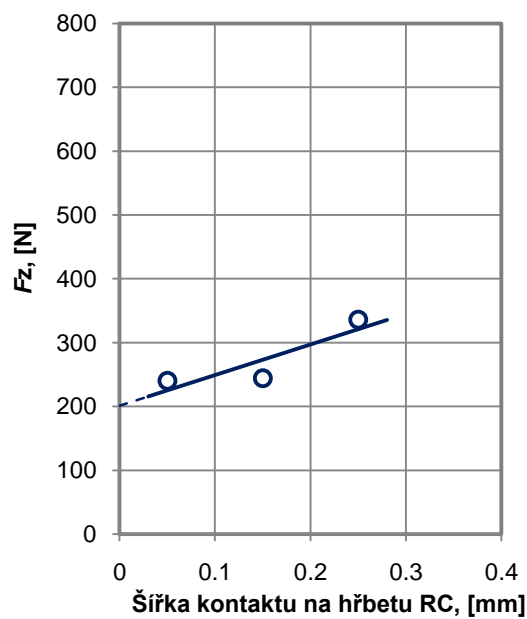
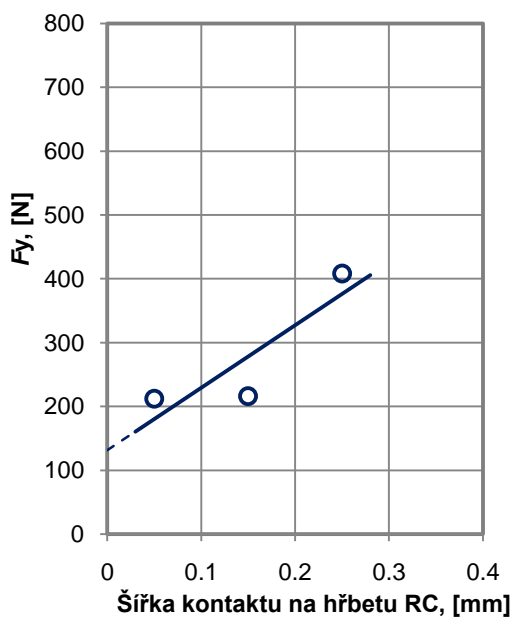
Obr. 6.5 ukazuje grafy stanovených hodnot složek výsledné řezné síly R (F_y a F_z) na hřbetu řezného nástroje při obrábění čtyř různých materiálů méně plasticky deformovatelné.



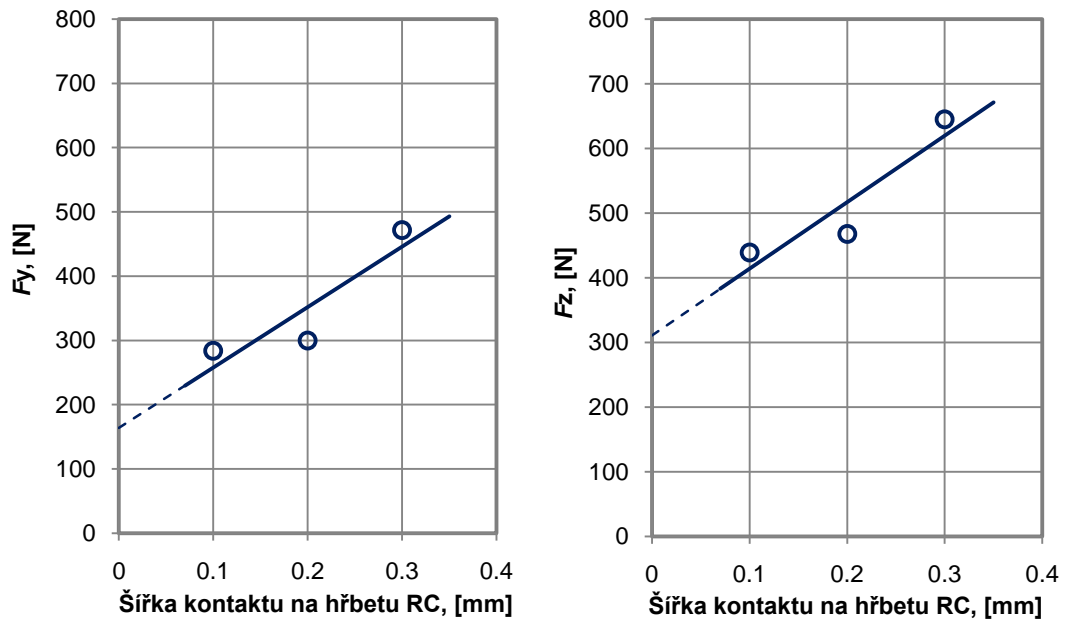
42 3222



42 3046



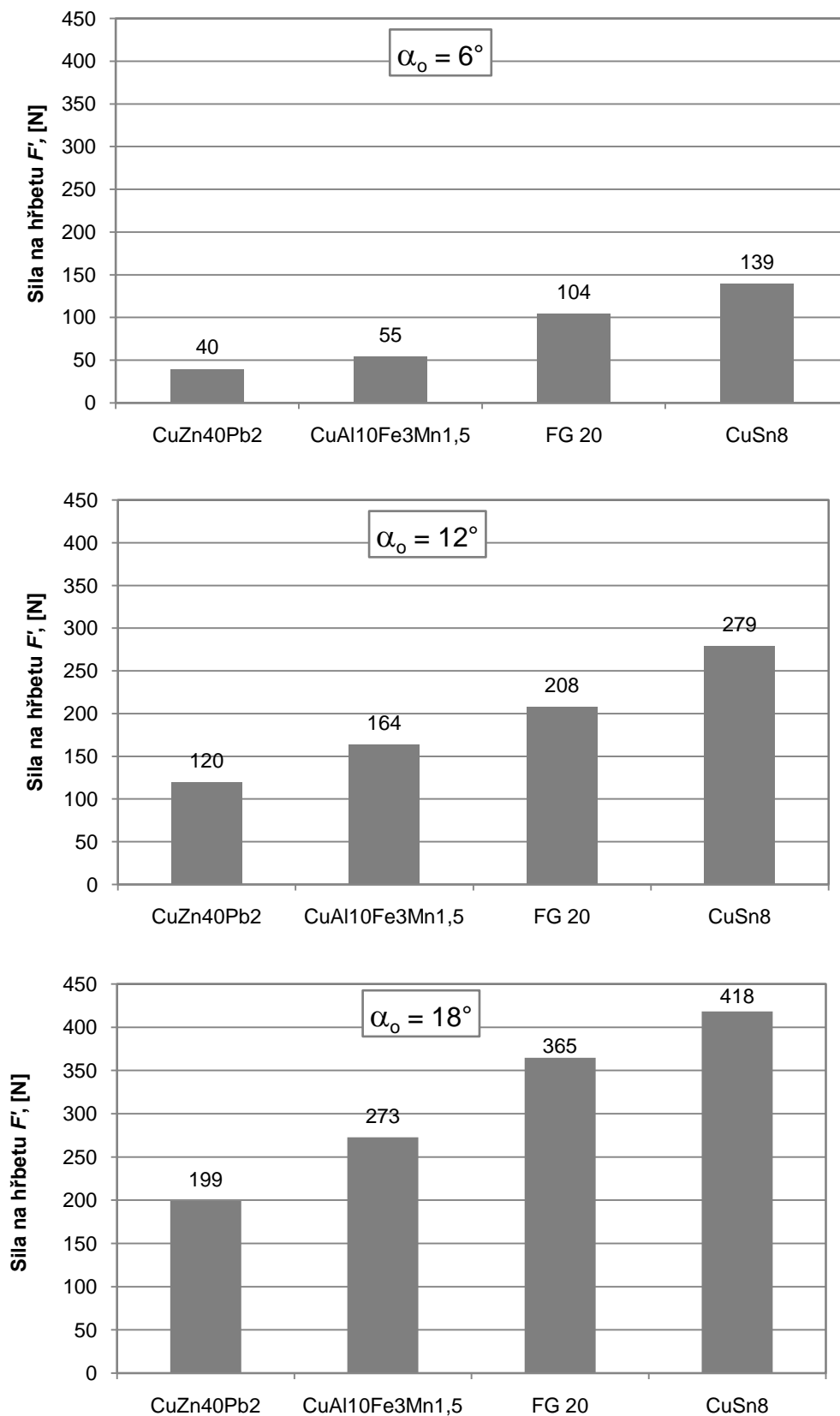
42 3018



Obr. 6.5 Vertikální složka F_y a horizontální F_z výsledné řezné síly R jako funkce šířky kontaktu RC hřbetu při obrábění materiálů méně plasticky neformovatelné.

Obr. 6.5 ukazuje hodnoty sil na hřbetu stanovené metodou pro obrábění materiálů méně plasticky deformovatelné. Tak např. při obrábění litiny 422420 při $\alpha_0 = 6^\circ$, vertikální složka síly na hřbetu $F_N' = 309$ N a horizontální $F_T' = 194$ N, při $\alpha_0 = 12^\circ$, $F_N' = 177$ N a $F_T' = 111$ N a při $\alpha_0 = 18^\circ$, $F_N' = 88$ N a $F_T' = 55$ N. Analogicky byly stanoveny i složky sil na hřbetu pro další obráběné materiály.

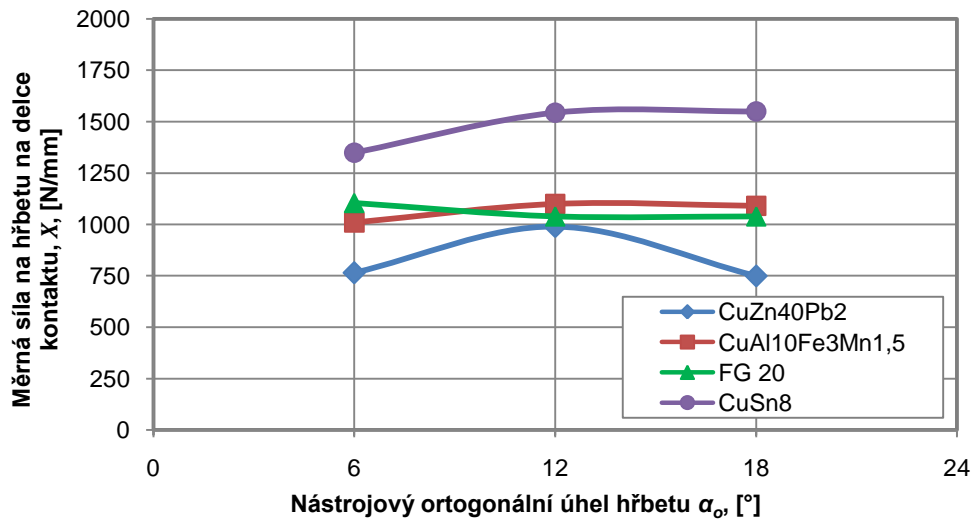
Na základě hodnot horizontální a vertikální složky síly na hřbetu (Obr. 6.5), byly zjištěny hodnoty výsledné síly na hřbetu F' pro uvedené čtyři druhy materiálů méně plasticky deformovatelné při různých nástrojových ortogonálních uhlech hřbetu α_0 (Obr. 6.6).



Obr. 6.6 Závislosti výsledné síly na hřbetu F' získané metodou pro obrábění materiálů méně plasticky deformovatelné při různých ortogonálních nástrojových úhlech na hřbetu

α_0

Takto zjištěné hodnoty vykazují značné rozdíly mezi silami na hřbetu, mohou se lišit o 100 až 250% (Obr. 6.6), v závislosti na obráběném materiálu. Síly na hřbetu dosahují své maximální hodnoty při obrábění mosazi 42 3222 a minimální hodnoty při obrábění bronzu 42 3018.



Obr. 6.7 Závislost měrné řezné síly na hřbetu (X) na nástrojovém ortogonálním úhlu hřbetu řezného nástroje (α_o)

Obr. 6.7 ukazuje hodnoty měrné síly X na hřbetu, která závisí na nástrojovém ortogonálním úhlu hřbetu řezného nástroje. Měrná síla na hřbetu je definována jako síla na hřbetu, která připadá na 1 mm délky skutečného kontaktu na hřbetu řezného nástroje. Například při obrábění bronzu 42 3018 s $\alpha_o = 12^\circ$, výsledná síla na hřbetu $F' = 279$ N, skutečná délka kontaktu RC hřbetu řezného nástroje a obrobku byla 0,19 mm a specifická řezná síla na hřbetu $X = 1550$ N/mm.

Z hodnot zobrazených na Obr. 6.7 je zřejmé, že měrné síly na hřbetu téměř nezávisí na nástrojovém ortogonálním úhlu hřbetu α_o a potažmo i tvaru hřbetu nástroje.

6.2 Ověření nové metody stanovení sil na hřbetu řezného nástroje pro materiály méně plasticky deformovatelné

Pro úspěšné použití nové metody pro stanovení sil na hřbetu řezného nástroje při obrábění materiálů méně plasticky deformovatelné je nezbytné ověřit její spolehlivost. Ověření vychází z hypotézy, že novou metodu lze aplikovat nejen pro obrábění materiálů méně plasticky deformovatelné, ale i pro materiálů lehce plasticky deformovatelné.

Proto bylo navrženo porovnat hodnoty výsledných sil na hřbetu, stanovené dvěma různými metodami: nově vyvinutou metodou pro stanovení sil na hřbetu řezného nástroje pro obrábění materiálů méně plasticky deformovatelné a metodou porovnání sil pro různé šířky kontaktu hřbetu, při obrábění stejných materiálů lehce plasticky deformovatelné za stejných řezných podmínek tj. se stejným skutečným kontaktem hřbetu řezného nástroje s obrobenou plochou a se stejným nástrojovým ortogonálním úhlem hřbetu řezného nástroje.

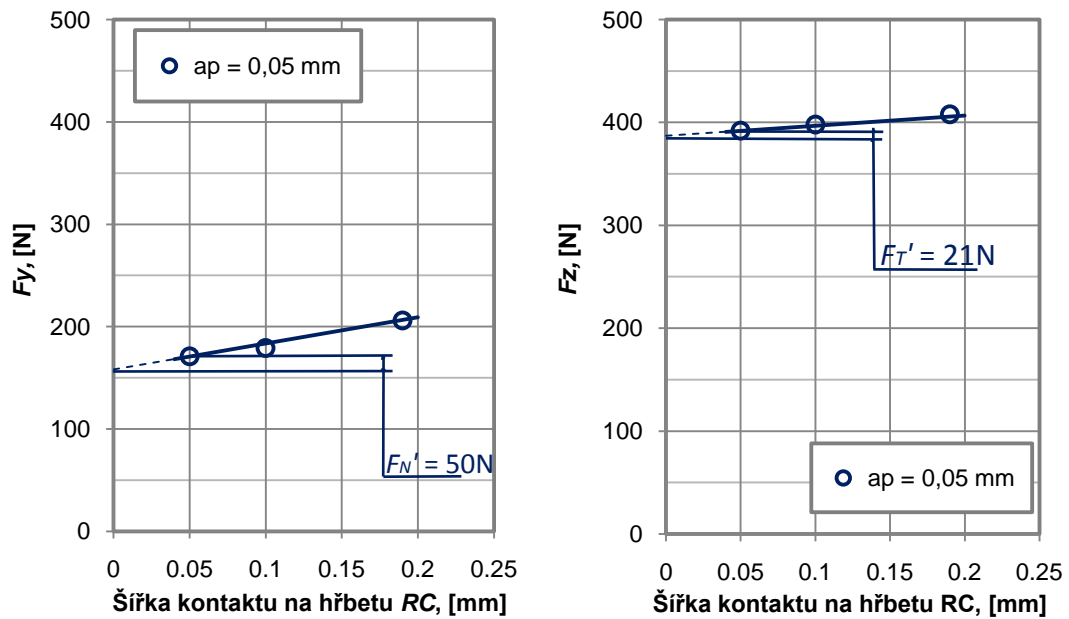
Jestliže síly na hřbetu stanovené různými metodami pro stejný skutečný kontakt RC hřbetu řezného nástroje s obrobenou plochou, a pro stejný nástrojový ortogonální úhel hřbetu α_0 , se nebudou při obrábění stejného materiálu významně lišit, bude spolehlivost nové metody pro stanovení sil na hřbetu pro materiály méně plasticky deformovatelné prokázána.

Pro stanovení sil na hřbetu byla použita metodika, která uvedená v kapitole 6.1. Síly na hřbetu byly stanoveny pro dvanáct různých materiálů: slitiny hliníku Al99,5, AlCu6BiPb, AlMgSi, AlCu4PbMgMn, AlCu4MgSi, konstrukční ocel 12050.1, 11373, 14220.3, 15260, 16220 a korozivzdorné oceli 17022 a 17240.

Hodnoty skutečného kontaktu hřbetu RC řezného nástroje a obrobené plochy pro různé ortogonální nástrojové úhly hřbetu α_0 při obrábění materiálů lehce plasticky deformovatelné jsou uvedeny v Tab. 6.2

Tab. 6.2 Nástrojový ortogonální úhel hřbetu α_0 a skutečná šířka kontaktu RC při obrábění materiálů lehce plasticky deformovatelné

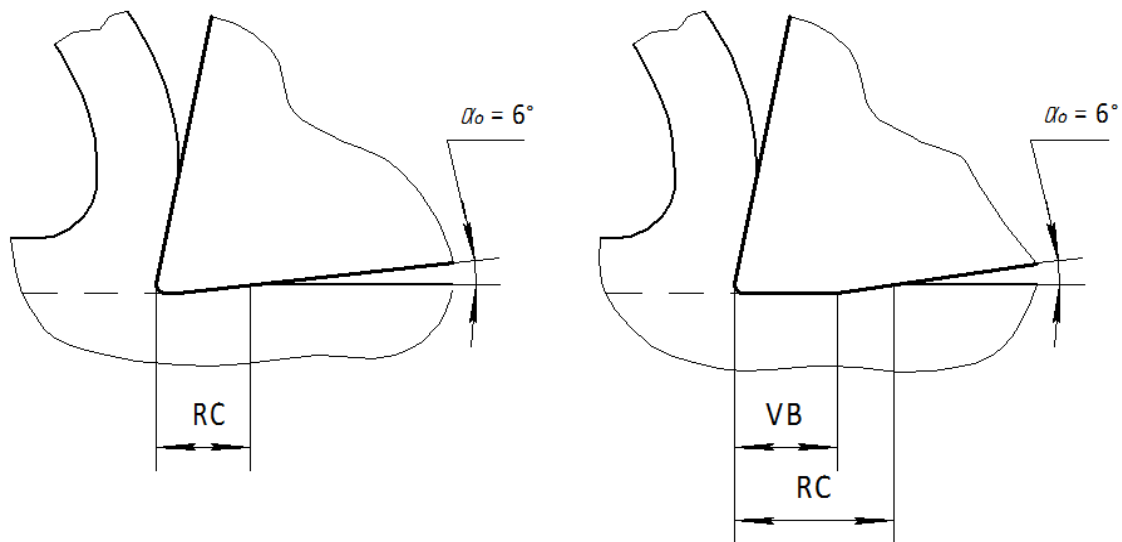
α_0 , [°]	RC, [mm]											
	Al99,5	AlCu6BiPb	AlMgSi	AlCu4PbMgMn	AlCu4MgSi	12050.1	11373	14220.3	15260	16220	17022	17240
6°	0,19	0,2	0,11	0,14	0,12	0,31	0,29	0,22	0,18	0,3	0,28	0,38
12°	0,1	0,1	0,05	0,08	0,1	0,2	0,19	0,1	0,1	0,21	0,21	0,3
18°	0,05	0,04	0,025	0,04	0,05	0,14	0,1	0,05	0,05	0,1	0,1	0,21



Obr. 6.8 Vertikální složka F_y a horizontální složka F_z výsledné řezné síly R jako funkce šířky kontaktu na hřbetu RC při různých nástrojových ortogonálních úhlech hřbetu α_0 a obrábění slitiny hliníku Al99,5

Stanovení sil na hřbetu řezného nástroje metodou pro materiály méně plasticky deformovatelné při obrábění dvanácti druhů materiálů lehce plasticky deformovatelné v tahu je uvedeno v příloze 6.

Stanovení sil na hřbetu nástroje metodou porovnání sil na hřbetu pro různé šířky kontaktu RC hřbetu dosažené použitím řezného nástroje s různým opotřebením na hřbetu $VB = 0,03, 0,3$ a $0,5$ mm bylo provedeno pro hodnotu nástrojového ortogonálního úhlu hřbetu $\alpha_0 = 6^\circ$ (Obr. 6.9). Experimenty byly provedeny na dvanácti různých materiálech: slitinách hliníku Al99,5, AlCu6BiPb, AlMgSi, AlCu4PbMgMn, AlCu4MgSi, konstrukčních ocelí 12050.1, 11373, 14220.3, 15260, 16220 a korozivzdorných ocelí 17022 a 17240 metodikou uvedenou v kapitole 4.3. Hodnoty sil na hřbetu stanovených touto metodou jsou uvedeny v kapitole 4.4 a 4.5.

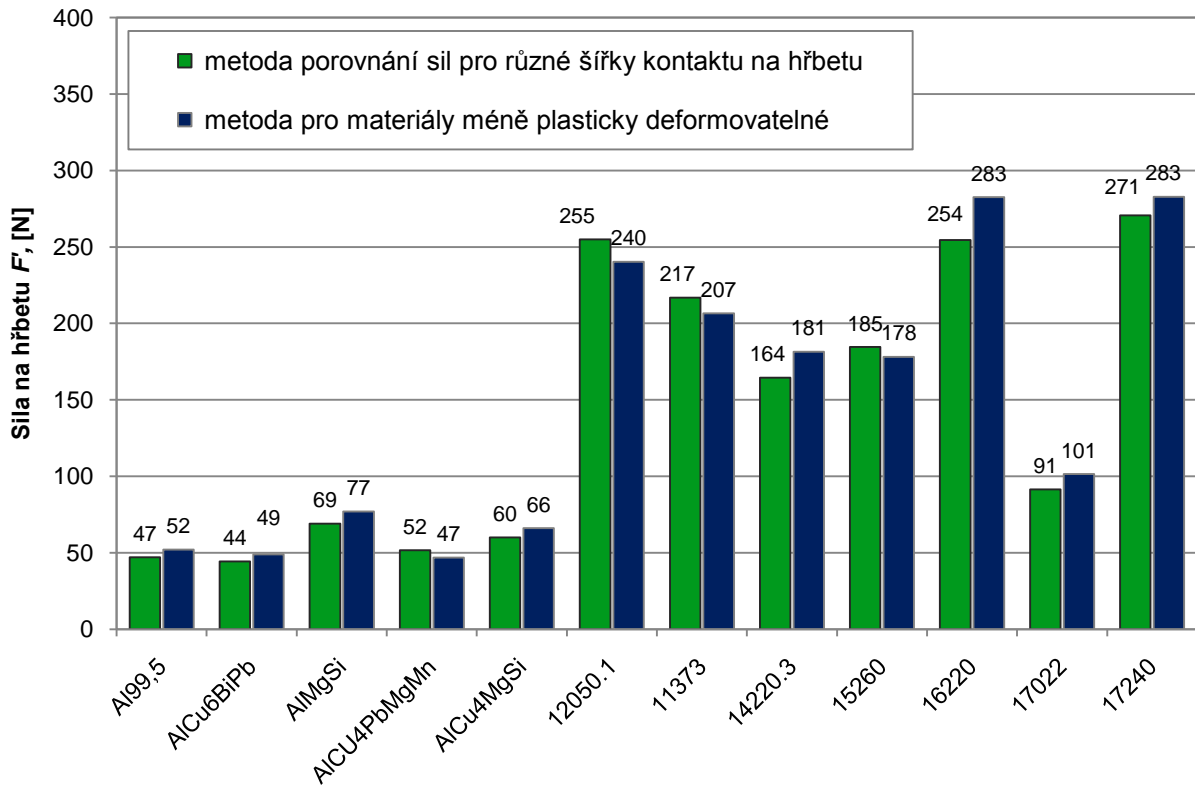


Obr. 6.9 Proces tvorby třísky: nástrojem ostrým (vlevo), nástrojem opotřebovaným na hřbetu (vpravo).

6.3 Výsledky experimentů a jejich analýza

Síly na hřbetu byly stanoveny pomocí dvou metod (metodou vyvinutou pro stanovení sil na hřbetu řezného nástroje pro obrábění materiálů méně plasticky deformovatelné a metodou porovnání sil pro různé šířky kontaktu hřbetu) při obrábění stejných materiálů lehce plasticky deformovatelné v tahu se stejnou šířkou skutečného kontaktu RC řezného nástroje s obrobenou plochou a se stejným nástrojovým ortogonálním úhlem hřbetu $\alpha_o = 6^\circ$. Pro porovnání sil na hřbetu byl použit následující postup, např. pro obrábění slitiny hliníku Al99,5 nástrojem s úhlem $\alpha_o = 6^\circ$ z Tab. 6.2, byla zjištěna skutečná šířka kontaktu $RC = 0,19$ mm. Pro tuto šířku (viz Obr. 6.8) byly nejprve stanoveny dvě složky výsledné síly na hřbetu (vertikální $F_N' = 50$ N a horizontální $F_T' = 21$ N) metodou stanovení sil na hřbetu pro materiály méně plasticky deformovatelné, následně byla vypočtena výsledná síla na hřbetu $F' = 54$ N. Poté, pro skutečnou šířku kontaktu hřbetu $RC = 0,19$ mm (viz Obr. 4.6, c; v kapitole 4.5): a pro slitinu hliníku Al99,5 byly stanoveny dvě složky výsledné síly na hřbetu (vertikální $F_N' = 45$ N a horizontální $F_T' = 15$ N) metodou porovnání sil pro různé šířky kontaktu hřbetu (kapitola 4.3), nakonec byla vypočtena výsledná síla na hřbetu $F' = 47$ N.

Analogický postup byl použit pro stanovení sil na hřbetu pro všech dvanácti druhů materiálu lehce plasticky deformovatelné. Výsledky jsou zobrazeny na Obr. 6.10.



Obr. 6.10 Porovnání výsledných sil F' na hřbetu stanovených metodou porovnání sil pro různé šířky kontaktu na hřbetu řezného nástroje a metodou pro materiály méně plasticky deformovatelné při obrábění různých druhů materiálů lehce plasticky deformovatelné

Obr. 6.10 ukazuje hodnoty sil na hřbetu nástroje stanovené dvěma různými metodami při obrábění dvanácti druhů materiálů lehce plasticky deformovatelné se stejnou šířkou kontaktu hřbetu řezného nástroje s obrobenou plochou a se stejným ortogonálním nástrojovým úhlem hřbetu $\alpha_0 = 6^\circ$. Je nezbytné si uvědomit, že porovnání bylo provedeno při stejných skutečných šířkách kontaktu řezného nástroje a obrobené plochy každého z materiálů, ale že pro různé materiály byly tyto šířky kontaktu různé, za jinak identických podmínek, což je důsledek odlišných fyzikálních a mechanických vlastností každého z materiálů. Bylo zjištěno, že rozdíl hodnot sil na hřbetu stanovených různými metodami ne překročil 11%.

6.4 Závěr

Byla navržena nová metoda stanovení sil na hřbetu pro materiály méně plasticky deformovatelné. Potřebu takové speciální metody si vynutila nemožnost stanovení sil na hřbetu metodou používající nástroj s opotřebením na hřbetu kvůli nestabilnímu procesu obrábění a velkému rozptylu stanovených hodnot řezných sil při obrábění materiálů méně

plasticky deformovatelné. Nová metoda spočívá ve změně šířky kontaktu hřbetu řezného nástroje s obrobenou plochou změnou nástrojového ortogonálního uhlu hřbetu, realizovanou použitím řezných nástrojů s různými ortogonálními nástrojovými úhly hřbetu.

Pro ověření spolehlivosti této metody pro stanovení sil na hřbetu byly provedeny experimenty při obrábění materiálů lehce plasticky deformovatelné, oproti skupině méně plasticky deformovatelné, s tím, že se předpokládala její aplikovatelnost nejen při obrábění materiálů méně plasticky deformovatelné, ale i materiálů lehce plasticky deformovatelné. Při testování spolehlivosti nové metody při obrábění takových materiálů bylo získáno, že síly na hřbetu stanovené novou metodou pro materiály méně plasticky deformovatelné a síly na hřbetu stanovené metodou porovnání sil pro různé šířky kontaktu na hřbetu se liší maximálně o 11 %. Tato malá odchylka ukazuje na spolehlivost metody a možnost aplikování nové metody pro stanovení sil na hřbetu pro materiály méně plasticky deformovatelné.

7. ZÁVĚRY

1. Dosavadní výzkum ukázal, že použití procesní kapaliny při obrábění s malými šířkami záběru zvyšuje výslednou řeznou sílu a předpokládalo se, že příčinou tohoto zvětšení výsledné řezné síly při obrábění s malými šířkami záběru je zvětšení síly na hřbetu.

V této disertační práci byla specifikována další, dosud neznámá, příčina tohoto zvětšení. Bylo zjištěno, že procesní kapalina zabraňuje vzniku nárůstku, obrábění pak probíhá s negativním úhlem čela řezného nástroje a tedy větší výslednou řeznou silou, než při obrábění bez procesní kapaliny. Naopak při obrábění bez procesní kapaliny se na čele řezného nástroje nárůstek vytváří, a tím se pracovní úhel čela stává pozitivní, to je skutečný důvod poklesu výsledné řezné síly, při obrábění bez použití procesní kapaliny.

Na základě provedených experimentů a použití metody extrapolace na nulovou šířku záběru bylo zjištěno, že použití procesní kapaliny zmenšuje sílu na hřbetu řezného nástroje. Z toho vyplývá, že zvětšení výsledné řezné síly při použití procesní kapaliny při malých šířkách záběru nelze vysvětlit zvětšením síly na hřbetu při použití procesní kapaliny, jak se původně předpokládalo.

2. Pro zvýšení přesnosti stanovení sil na hřbetu byla navržena nová metoda stanovení sil na hřbetu, která byla nazvána „Metoda porovnání sil pro různé šířky kontaktu na hřbetu“. Zvýšení přesnosti stanovení sil na hřbetu je založeno na měření skutečné šířky kontaktu mezi hřbetem řezného nástroje a obrobenou plochou. Oproti tomu dříve používaná metoda porovnání sil je založena na měření šířky opotřebení na hřbetu. Bylo však dokázáno, že skutečná šířka kontaktu mezi hřbetem nástroje a obrobenou plochou je podstatně větší než šířka opotřebení na hřbetu řezného nástroje.

Síly na hřbetu stanovené novou metodou jsou větší než síly stanovené metodou porovnání sil pro různé šířky opotřebení na hřbetu a menší než síly stanovené metodou extrapolace na nulovou šířku záběru.

3. Dosud se předpokládalo, že šířka záběru neovlivňuje síly na hřbetu. Na tomto předpokladu byly založeny metoda extrapolace na nulovou šířku záběru a metoda porovnání sil pro různé šířky opotřebení na hřbetu řezného nástroje, které se používají pro stanovení sil na hřbetu doposud. Na základě provedených experimentů

bylo poprvé zjištěno, že šířka záběru ovlivňuje síly na hřbetu (čím větší je šířka záběru, tím větší je síla na hřbetu).

Bylo tak dokázáno, že metodu extrapolace na nulovou šířku záběru pro stanovení sil na hřbetu nelze použít, protože tato metoda byla založena na hypotéze ne zcela ověřené.

4. Byla navržena nová metoda stanovení sil na hřbetu pro materiály méně plasticky deformovatelné. Potřebu takové speciální metody si vynutila nemožnost stanovení sil na hřbetu metodou používající nástroj s opotřebením na hřbetu kvůli nestabilnímu procesu obrábění a velkému rozptylu stanovených hodnot řezných sil při obrábění materiálů méně plasticky deformovatelné. Nová metoda spočívá ve změně šířky kontaktu hřbetu řezného nástroje s obrobenou plochou změnou nástrojového ortogonálního uhlu hřbetu, realizovanou použitím řezných nástrojů s různými ortogonálními nástrojovými úhly hřbetu.

Pro ověření spolehlivosti této metody pro stanovení sil na hřbetu byly provedeny experimenty při obrábění materiálů lehce plasticky deformovatelné, oproti skupině méně plasticky deformovatelné, s tím, že se předpokládala její aplikovatelnost nejen při obrábění materiálů méně plasticky deformovatelné, ale i materiálů lehce plasticky deformovatelné. Při testování spolehlivosti nové metody při obrábění takových materiálů bylo získáno, že síly na hřbetu stanovené novou metodou pro materiály méně plasticky deformovatelné a síly na hřbetu stanovené metodou porovnání sil pro různé šířky kontaktu na hřbetu se liší maximálně o 11 %. Tato malá odchylka ukazuje na spolehlivost metody a možnost aplikování nové metody pro stanovení sil na hřbetu pro materiály méně plasticky deformovatelné.

8. POUŽITÁ LITERATURA

1. PŘIKRYL, Z., MUSÍLKOVÁ, R. *Teorie obrábění*. 3, vyd, Praha, SNTL 1982.
2. OXLEY, P., L. Rate of strain effect in metal cutting. ASME 1963.
3. LOLADZE, G., N. *Chip forming in metal cutting*. Moscow, Mashgiz, 1952.
4. OKUSHIMA, K., HITSMI, K. *An analysis of the mechanism of orthogonal cutting and its application to discontinuous chip formation*. ASME 60 – WA 79
5. MERCHANT, M. E., ZLATIN, N. *New methods of analysis of machining processes*. Proc. S. E. S. A. 1946, č. 2(3).
6. LEE, E., H., Shaffer, B., W. *The theory of plasticity applied to the problem of machining*, Journal of applied mechanics. 1951, č. 4(18).
7. THOMPSEN, E., G. *Prediction of forces and energy in metal cutting*, Journal of the Institution of the production engineers. 1962.
8. SADOW, M., Cutting forces and cutting power in orthogonal cutting machine tool. Design and Research 1965, N ½.
9. GAZDA, J. *Teorie obrábění – průvodce tvorbou třísky*, Liberec 2009, ISBN: 978-80-7083-498-6.
10. ALBRECHT, P., *New developments in the theory of the metal cutting processes, Part 1. The ploughing process in metal cutting*, ASME J., Eng. Ind. 1960, 82: 348-357.
11. ZORJEV, N., N. *Issledovanija elementov mehaniki processa rezanija*. Moskva, Mashgiz, 1952.
12. ZORJEV, N., N. *Voprosy mehaniki processa rezanija metallov*. 1 vyd., Moskva, Mashgiz, 1956.
13. ZOREV, N. *Metal cutting mechanics*. Pergamon Press, 1966, Oxford, 135-180.
14. STEVENSON, R., STEVENSON, D. *The Mechanical Behavior of Zink During Machining*. Trans. ASME J., Eng. Mater, Technol. 1995, 117:172–178. ISSN:0094-4289.
15. STEVENSON, R. *The Measurement of Parasitic Forces in Orthogonal Cutting*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1998, 38 (1–2):113–130, ISSN: 0890-6955.

16. WYEN, C., WEGENER, K., ZYUST, R. *Influence of cutting edge radius on cutting forces in machining titanium*. Annals of the CIRP, 2010, 59(1):89-92, ISSN: 0007-8506.
17. COLWELL, L. *Methods for sensing the rate of tool wear*. Annals of the CIRP, 1970, 4:647-651. ISSN: 0007-8506
18. LIPATOV, A., CHIGIRINDKII, Y., KORMILITSYN, S. *Determining the Cutting Forces at the Rear Tool Surface*. Russian Eng. Research, 2010, 30(11):1158-1160, ISSN: 1068-798X.
19. KISTLER HOLDING AG, Corporation web [online], 2014, [cit. 03. 02. 2014], Dostupné z: <http://www.kistler.com/>.
20. 3-KOMPONENT DYNAMOMETER [online], 2014, [cit. 03. 02. 2014], Dostupné z www: http://www.helmar.com.pl/helmar/plik/9265b_nn3842.pdf.
21. ČSN ISO 8688-1. *Testovanie trvanlivosti pri frézovaní. Časť 1: Rovinné frézovanie*, 1993, Praha: Centrum služeb pro normalizaci.
22. JERSAK, J., LEDVINA, M., DUGIN, A., POPOV, A. *Metodika hodnocení antiadhezní schopnosti procesních kapalin*. PUV 2014-29759, Česká republika, Užité vzor, Číslo zápisu: 27323, 21.11.2014.
23. REKTORYS, K. *Přehled užití matematiky I a II*. 7. Vyd. Praha: Prometheus, spol. s r. o. 2000, 1594 s, ISBN 80-7196-179-5.
24. TAYLOR, F., W. *On the art of cutting metals by Mr. F. W. Taylor; an address made at the opening of the annual meeting in New York, December 1906, 1907*, The American society of mechanical engineers.
25. JAYAL, A., D., BALAJI, A., K. *Effects of cutting fluid application on tool wear in machining: Interactions with tool-coatings and tool surface features*. Wear, 2009, 267(9-10): 1723–1730. ISSN: 0043-1648.
26. AXINTE, D., A., DE CHIFFRE, L. *Effectiveness and resolution of tests for evaluating the performance of cutting fluids in machining aerospace alloys*. CIRP Annals, 2008, 57(1):129-132. ISSN: 0007-8506.
27. DE CHIFFRE, L., BELLUCO, W. *Comparison of Methods for Cutting Fluid Performance Testing*. CIRP Annals, 2000, 49(1): 57-60. ISSN: 0007-8506.
28. STANCEKOVA, D., KURNAVA, T., SAJGALIK, M., NAPRSTKOVA, N., STRUHARNANSKY, J., ŠČOTKA, P. *Identification of machinability of ceramic*

- materials by turning*. Manufacturing Technology, 2014, vol, 14, No, 1, pp, 91-97. ISSN: 1213-2489.
29. KHAN, M., M., A., MITHU, M., A., H., DHAR. *Effects of minimum quantity lubrication on turning AISI 9310 alloy steel using vegetable oil-based cutting fluid*. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209 (15-16): 5573–5583. ISSN: 0924-0136.
30. THEPSONTHIA, T., HAMDI, M., MITSUI, K. *Investigation into minimal-cutting-fluid application in high-speed milling of hardened steel using carbide mills*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2009, 49(2): 156–162. ISSN: 0890-6955.
31. KOURIL, K., CEP, R., JANASEK, A., KRIZ, A., STANCEKOVA, D. *Surface integrity at reaming operation by MT3 head*. Manufacturing Technology, 2014, vol. 14, No. 2, pp. 193-199. ISSN: 1213-2489.
32. VASILKO, K. *New experimental dependence of machining*. Manufacturing Technology, 2014, vol. 14, No. 1, pp. 111-116. ISSN: 1213-2489.
33. LÓPEZ DE LACALLE, L., N. ANGULO, C., LAMIKIZ, A., SÁNCHEZ, J., A. *Experimental and numerical investigation of the effect of spray cutting fluids in high speed milling*, Journal of Materials Processing Technology, 2006, 172(1): 11–15. ISSN: 0924-0136.
34. RIVERO, A., ARAMENDI, G., HERRANZ, S., LÓPEZ DE LACALLE, L., N. *An experimental investigation of the effect of coatings and cutting parameters on the dry drilling performance of aluminium alloys*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2006, 28 (1-2): 1-11. ISSN: 0268-3768.
35. ASTAKHOV, V., P. *Metal cutting theory foundations of near-dry (MQL) machining*, International Journal of Machining and Machinability of Materials, 2010, 7(1/2): 1-16. ISSN: 1748-5711
36. CELAYA, A., LÓPEZ DE LACALLE, L., N. LAMIKI, A. *Assisted machining processes*, In: Davim P. (ed.). Metal cutting: research advances, Nova Science Publishers, New York, 2010. ISBN: 978-1-61122-573-0.
37. LI, K., - M., LIANG, S., Y. *Modeling of cutting forces in near dry machining under tool wear effect*. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2007, 47:1292–1301. ISSN: 0890-6955.
38. KLOCKE, F., EISENBLATTER, G. *Dry Cutting*. Annals of the CIRP, 1997, 46(2): 519-526. ISSN: 0007-8506.

39. BORDIN, A., BRUSCHI, S., GHIOTTI, A. *The Effect of Cutting Speed and Feed Rate on the Surface Integrity in Dry Turning of CoCrMo Alloy*. Procedia CIRP, 2014, 13:219–224. ISSN: 2212-8271.
40. QEHAJA, N., JAKUPI, K., BUNJAKU, A., BRUÇI, M., OSMANI, H. *Effect of Machining Parameters and Machining Time on Surface Roughness in Dry Turning Process*. Procedia Engineering, 2015, 100: 135–140. ISSN: 1877-7058.
41. GUO, Y., CHOU, Y. *Determination of ploughing force and its influence on material properties in metal cutting*. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 148(3): 368-375. ISSN: 0924-0136.
42. KALYAN, C., SAMUEL, G., L. Cutting mode analysis in high speed finish turning of AlMgSi alloy using edge chamfered PCD tools. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 216: 146–159. ISSN: 0924-0136.
43. MKADDEM, A., SOUSSIA, A., B., MANSORI, M., E. *Wear resistance of CVD and PVD multilayer coatings when dry cutting fiber reinforced polymers (FRP)*. Wear, 2013, 302: 946–954. ISSN: 0043-1648.
44. ARMAREGO, E., J., BROWN, R., H. *The Machining of Metals*, Prentice-Hall, 1969.
45. TRENT, E., M., MET, D., *Metal cutting*, Butterworths, 1977.
46. TRENT, E., M., WRIGHT, P., K. *Metal cutting*, America: Butterworth-Heinemann, 2000. ISBN 0-7506-7069-X.
47. KÜMMEL, J., GIBMEIER, J., MÜLLER, E., SCHNEIDER, R., SCHULZE, V., WANNER, A. *Detailed analysis of microstructure of intentionally formed built-up edges for improving wear behaviour in dry metal cutting process of steel*. Wear, 2014, 311(1-2): 21-30. ISSN: 0043-1648.

9. SEZNAM PUBLIKOVANÝCH PRACÍ

Články v časopisu s Impakt Factorem:

1. POPOV, A., DUGIN, A. *A comparison of experimental estimation methods of the ploughing force in orthogonal cutting*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 65 (2013): 37- 40. ISSN:0890-6955.
2. POPOV, A., DUGIN, A. *Effect of uncut chip thickness on the ploughing force in orthogonal cutting*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 76 (9-12): 1937-1945. ISSN:0268-3768.
3. POPOV, A., DUGIN, A. *Study of reasons of increased active force using coolant with uncut chip thickness*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 70(9-12): 1555-1562. ISSN:0268-3768.

Články v časopisech zařazených do databáze SCOPUS:

4. DUGIN, A., POPOV, A. *Effect of the processing materials on the ploughing force values*. Manufacturing Technology, 2012, 12(13): 87-89. ISSN: 1213-2489.
5. POPOV, A., DUGIN, A. *Experimental methods of determining the cutting forces at the tool's rear surface*. Russian Engineering Research, 2012, 32(1): 68-69. ISSN: 1068-798X.
6. DUGIN, A., POPOV, A. *Increasing the accuracy of the effect of processing materials and cutting tool wear on the ploughing force values*. Manufacturing Technology, 2013, 13(2): 169-173. ISSN: 1213-2489.
7. POPOV, A., DUGIN, A. *Influence of lubricant and coolant fluid on the cutting force in small-increment planning*. Russian Engineering Research, 2013, 33(2): 84-85, ISSN: 1068-798X.
8. DUGIN, A., JERSAK, J., POPOV, A. *Method for determining of the anti-adhesion ability of cutting fluids*. Manufacturing Technology, 2014, 14(2): 145-149. ISSN: 1213-2489.
9. DUGIN, A., VOTOCEK, J., POPOV, A. *Method for determining the tribological properties of the cutting fluid*. Manufacturing Technology, 2014, 14(2): 149-153. ISSN: 1213-2489.
10. DUGIN, A., VOLESKY, L. *Effect of cutting fluids on the tool life in turning and milling of construction steel*. Manufacturing Technology, 2014, 14(3): 290-296. ISSN: 1213-2489.

Ostatní publikace:

11. DUGIN, A. Výzkum sil na hřbetu řezných nástrojů. Sb. Svetlanka, 2011, ISBN 978-80-7372-765-9.
12. DUGIN, A. *Features of cooling effect on active cutting force as a function of the uncut chip thickness*. Transfer inovací, 2011, 21: 131-134. ISSN 1337-7094.
13. DUGIN, A., POPOV, A. Závislost opotřebení na síly na hřbetě řezného nástroje. Strojírenská technologie, 2012, 17(1, 2):19-23, ISSN: 1211-4162.

Užitný vzor:

14. JERSAK, J., LEDVINA, M., DUGIN, A., POPOV, A. *Metodika hodnocení antiadhezní schopnosti procesních kapalin*. PUV 2014-29759, Česká republika, Užitný vzor, Číslo zápisu: 27323, 21.11.2014.

Skripta:

15. POPOV, A., DUGIN, A. *Study of ploughing forces on the flank face of cutting tools*. Technická univerzita v Liberci, Liberec 2014, ISBN 978-80-7494-133-7.

CITACE PUBLIKOVANÝCH PRACÍ

Články v časopisech zařazených do databáze SCOPUS:

1. Náprstková, N., Svobodová, J., Cais, J. *Influence of strontium in AlSi7Mg0.3 alloy on the tool wear*. Manufacturing Technology, 2013, 13(3): 368-373. ISSN: 1213-2489.
2. Józwik, J., Kuric, I., Sága, M., Lonkvic, P. *Diagnostics of CNC machine tools in manufacturing process with laser interferometer technology*. Manufacturing Technology, 2014, 14(1): 23-30, ISSN: 1213-2489.
3. Náprstková, N., Cais, J., Stanceková, D. *Influence of AlSi7Mg0.3 alloy modification by Sb on the tool wear*. Manufacturing Technology, 2014, 14(1): 75-79, ISSN: 1213-2489.
4. Kouril, K., Cep, R., Janasek, A., Kriz, A., Stancekova, D. *Surface integrity at reaming operation by MT3 head*. Manufacturing Technology, 2014, 14(2): 193-199, ISSN: 1213-2489.



5. Jozwik, J., Kuric, I., Semotiuk, L. *Laser interferometer diagnostics of CNC machine tools*. *Komunikacie*. 2014, 16(3a): 169-175.
6. Bakalova, T., Louda, P., Voleský, L., Andršová, Z. *The use of optical microscopy to evaluate the tribological properties*. *Manufacturing Technology*, 2014, 14(3): 256-261. ISSN: 1213-2489. ISSN:1335-4205.
7. Pimenov, D. *Mathematical modeling of power spent in face milling taking into consideration tool wear*. *Journal of Friction and Wear*, 2015, 36(1): 45-48. ISSN:1068-3666.

10. SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Hodnoty kritického rozdělení $t_{\alpha, n-1}$, Tabulka z publikace: REKTORYS, K, Přehled užití matematiky
- Příloha 2 Stanovení sil na hřbetu metodou extrapolace na nulovou šířku záběru při obrábění různých materiálů
- Příloha 3 Stanovení sil na hřbetu metodou porovnání sil pro různé šířky opotřebení na hřbetu při obrábění různých materiálů
- Příloha 4 Stanovení sil na hřbetu metodou porovnání sil pro různé šířky kontaktu na hřbetu
- Příloha 5 Stanovení sil na hřbetu metodou porovnání sil pro různé šířky kontaktu na hřbetu při obrábění dvanácti různých materiálů a při různých šířkách záběru $a_p = 0,05$ a $0,125$ mm
- Příloha 6 Stanovení sil na hřbetu řezného nástroje metodou pro materiály méně plasticky deformovatelné při obrábění dvanácti druhů materiálů lehce plasticky neformovatelné.

Příloha 1

Tabulka z publikace : REKTORYS, K, Přehled užití matematiky

- kritické rozdělení $t_{\alpha, n-1}$ pro úroveň spolehlivosti 95

%

n	n-1	$t_{0,95}(n-1)$	n	n-1	$t_{0,95}(n-1)$
1	0				
2	1	12,7060	52	51	2,0086
3	2	4,3027	53	52	2,0086
4	3	3,1825	54	53	2,0086
5	4	2,7764	55	54	2,0086
6	5	2,5706	56	55	2,0086
7	6	2,4469	57	56	2,0086
8	7	2,3646	58	57	2,0086
9	8	2,3060	59	58	2,0086
10	9	2,2622	60	59	2,0003
11	10	2,2281	61	60	2,0003
12	11	2,2010	62	61	2,0003
13	12	2,1788	63	62	2,0003
14	13	2,1604	64	63	2,0003
15	14	2,1448	65	64	2,0003
16	15	2,1315	66	65	2,0003
17	16	2,1199	67	66	2,0003
18	17	2,1098	68	67	2,0003
19	18	2,1009	69	68	2,0003
20	19	2,0931	70	69	2,0003
21	20	2,0860	71	70	1,9944
22	21	2,0796	72	71	1,9944
23	22	2,0739	73	72	1,9944
24	23	2,0687	74	73	1,9944
25	24	2,0639	75	74	1,9944
26	25	2,0595	76	75	1,9944
27	26	2,0595	77	76	1,9944
28	27	2,0595	78	77	1,9944
29	28	2,0595	79	78	1,9944
30	29	2,0423	80	79	1,9944
31	30	2,0423	81	80	1,9901
32	31	2,0423	82	81	1,9901
33	32	2,0423	83	82	1,9901
34	33	2,0423	84	83	1,9901
35	34	2,0423	85	84	1,9901
36	35	2,0301	86	85	1,9901
37	36	2,0301	87	86	1,9901
38	37	2,0301	88	87	1,9901
39	38	2,0301	89	88	1,9901
40	39	2,0211	90	89	1,9901
41	40	2,0211	91	90	1,9867
42	41	2,0211	92	91	1,9867



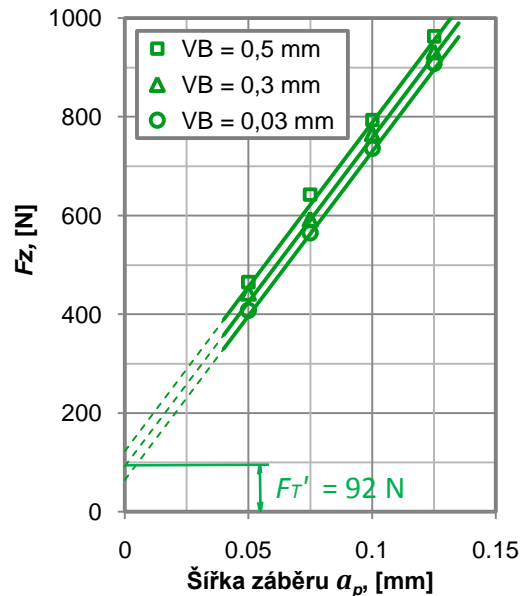
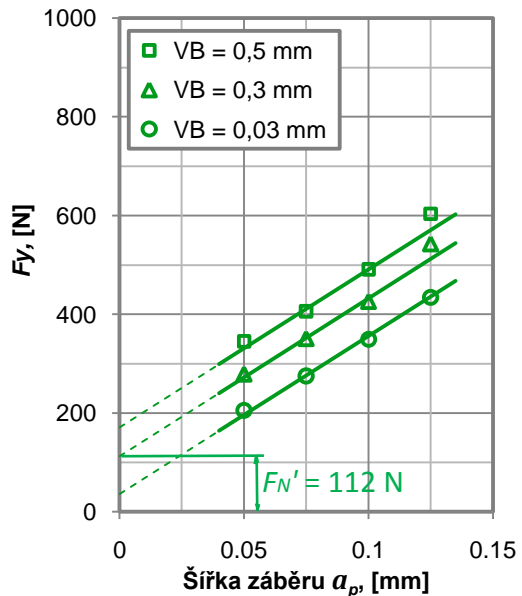
43	42	2,0211	93	92	1,9867
44	43	2,0211	94	93	1,9867
45	44	2,0211	95	94	1,9867
46	45	2,0141	96	95	1,9867
47	46	2,0141	97	96	1,9867
48	47	2,0141	98	97	1,9867
49	48	2,0141	99	98	1,9867
50	49	2,0141	100	99	1,9867
51	50	2,0086	101	100	1,9840

Příloha 2

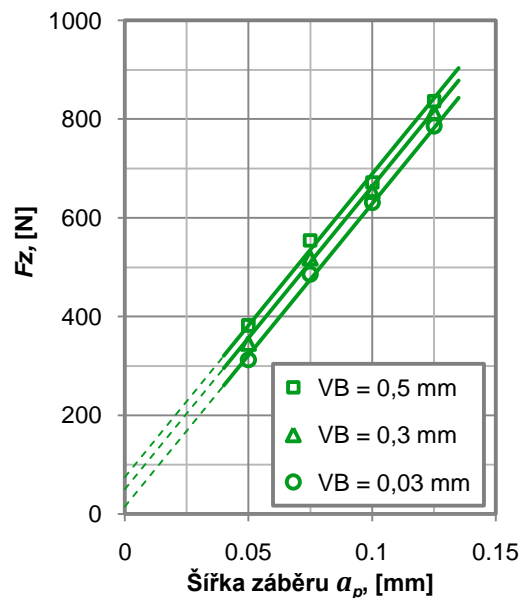
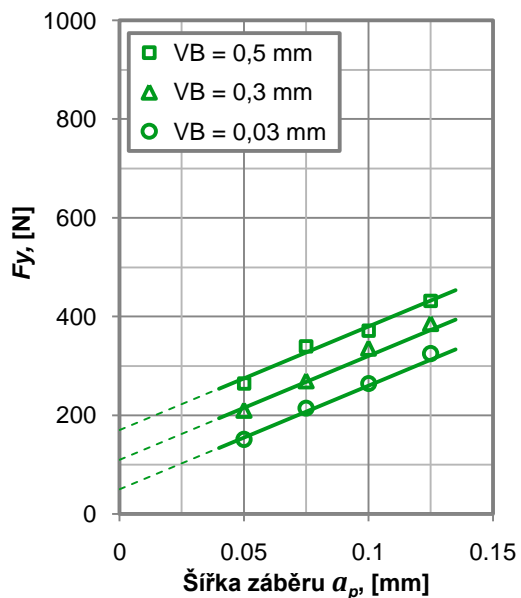
Stanovení sil na hřbetu metodou extrapolace na nulovou šířku záběru při obrábění různých materiálů.

Vertikální složka F_y a horizontální složka F_z výsledné řezné síly R jako funkce šířky záběru a_p pro různé šířky opotřebení na hřbetu VB při obrábění různých materiálů.

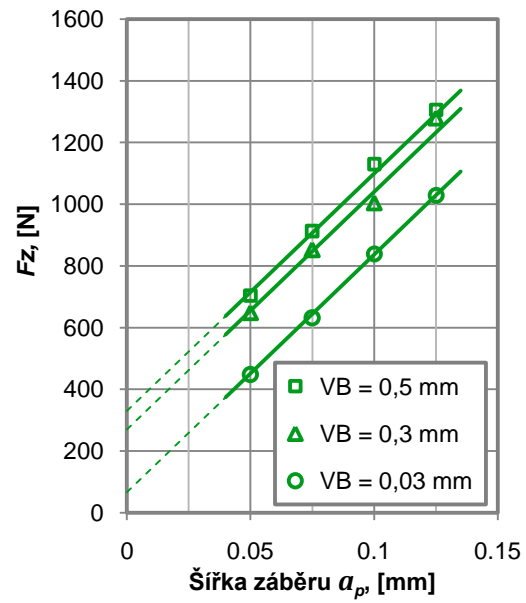
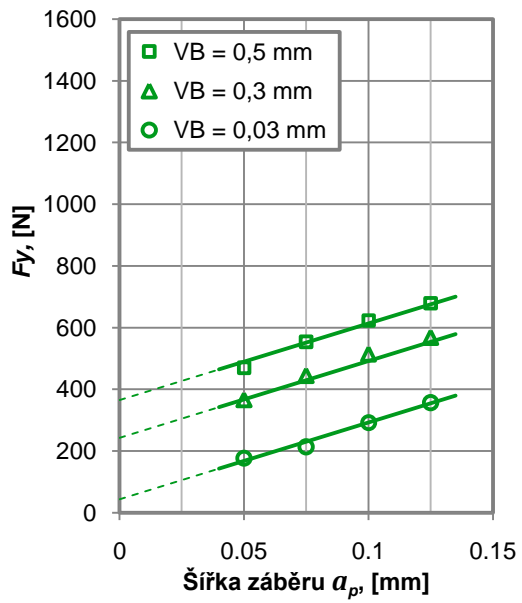
Al99,5



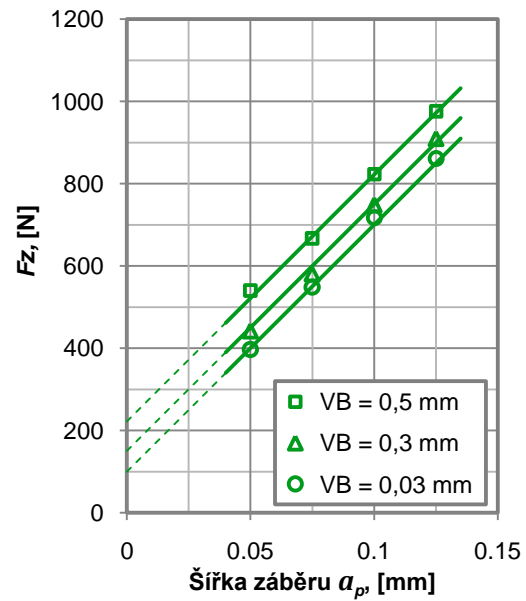
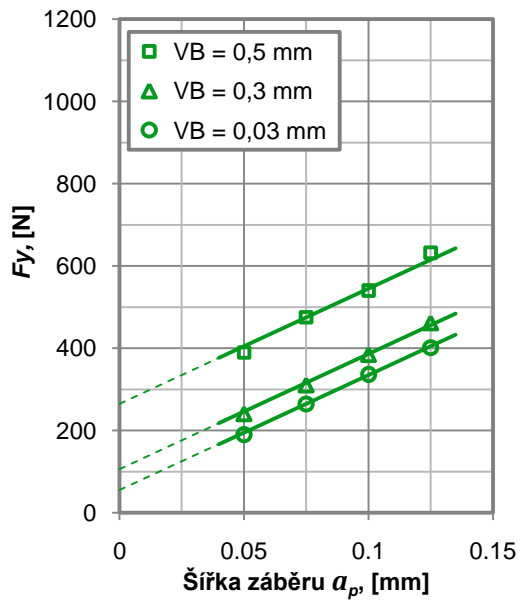
AlCu6BiPb



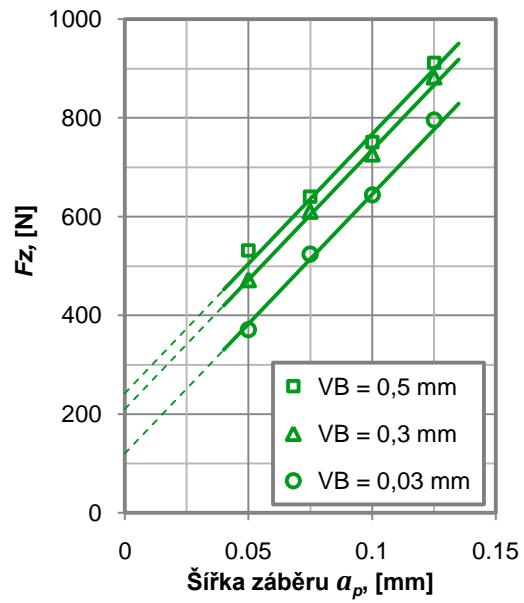
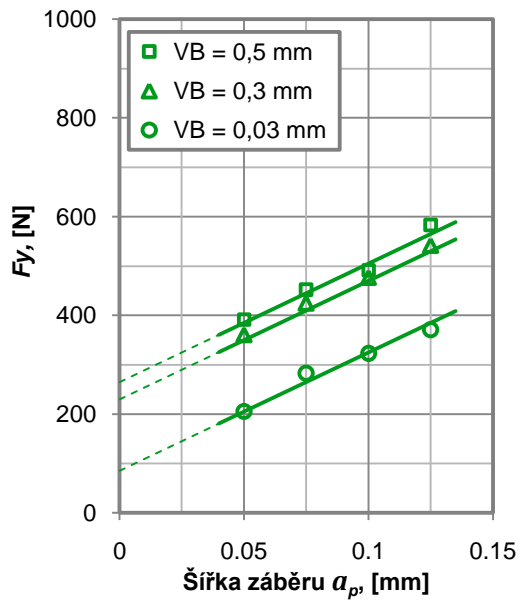
AlMgSi



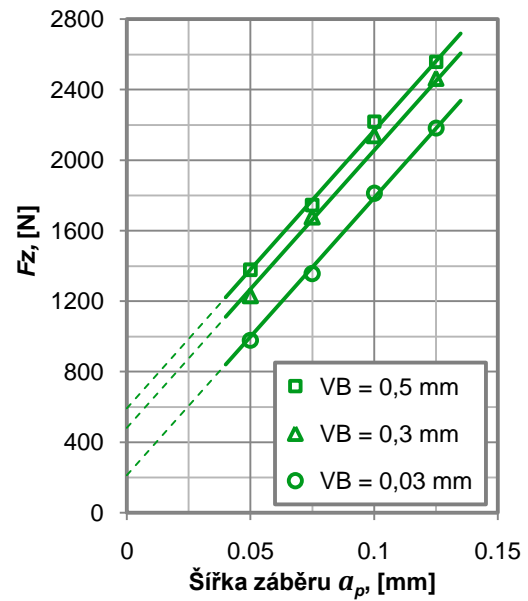
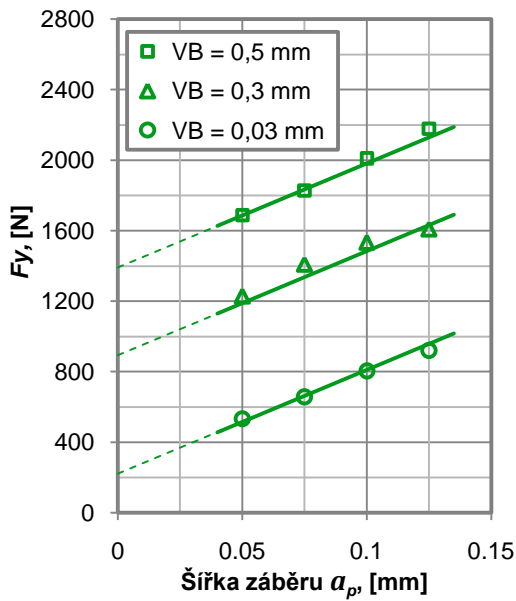
AICU4PbMgMn



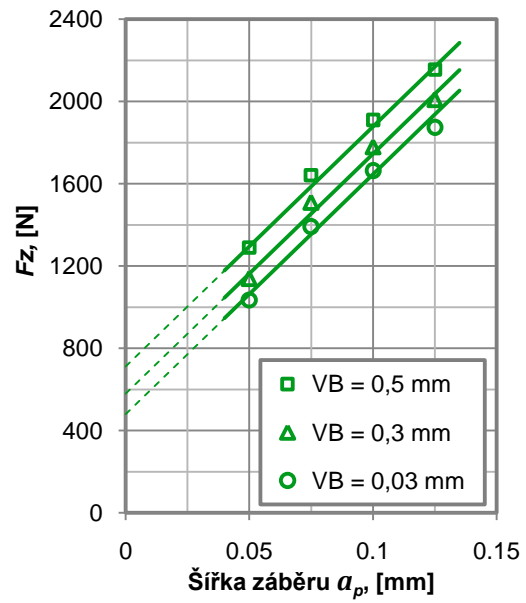
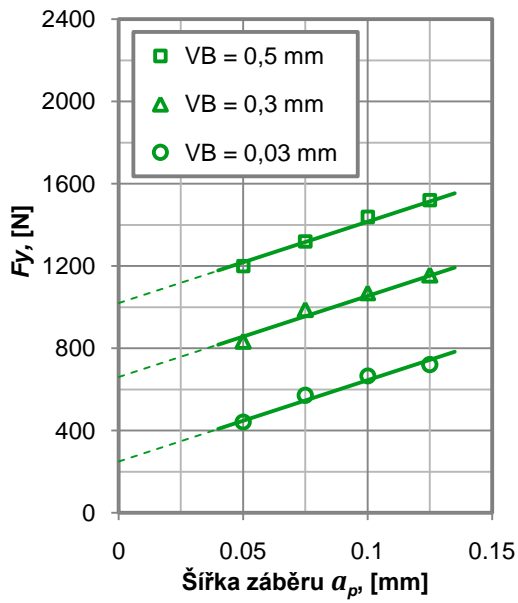
AlCu4MgSi



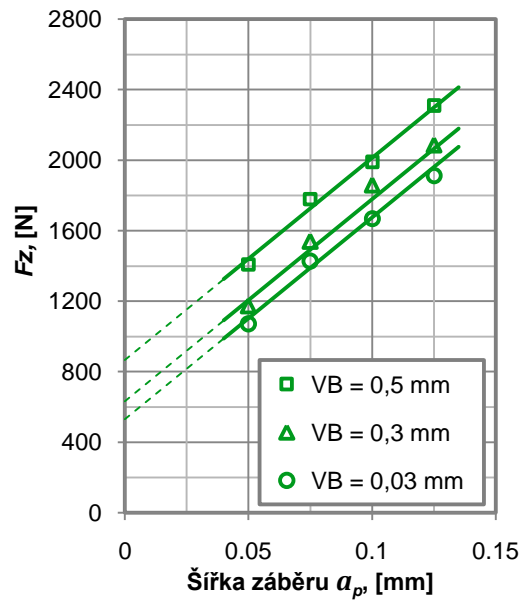
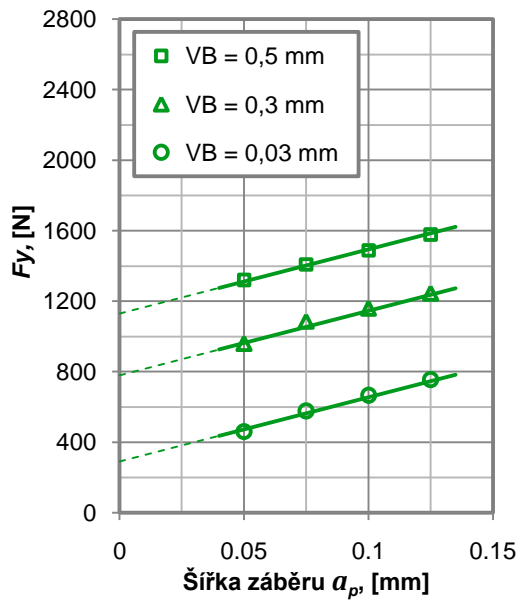
12050.1



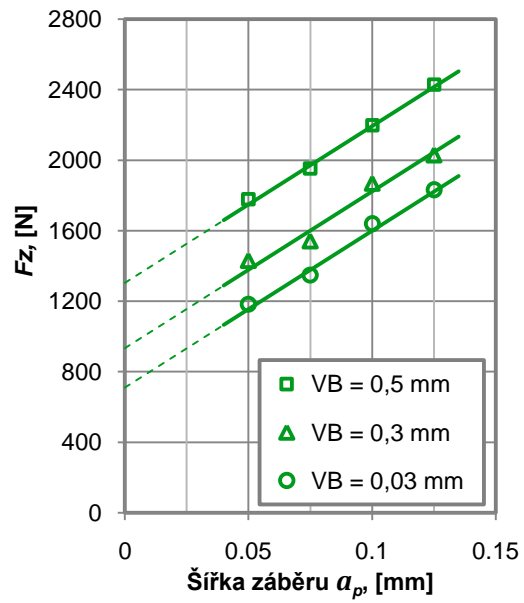
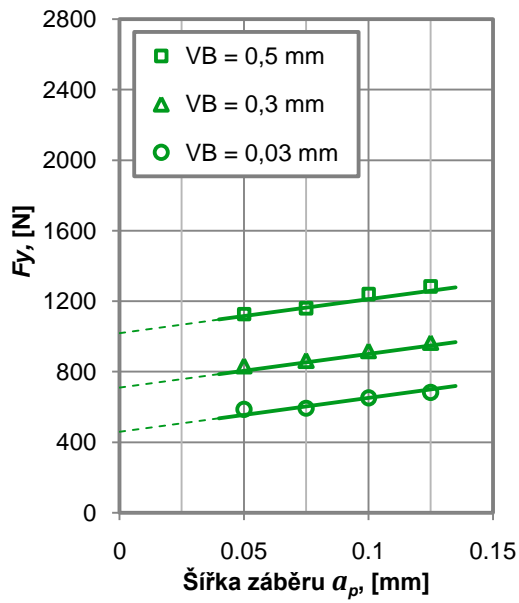
11373



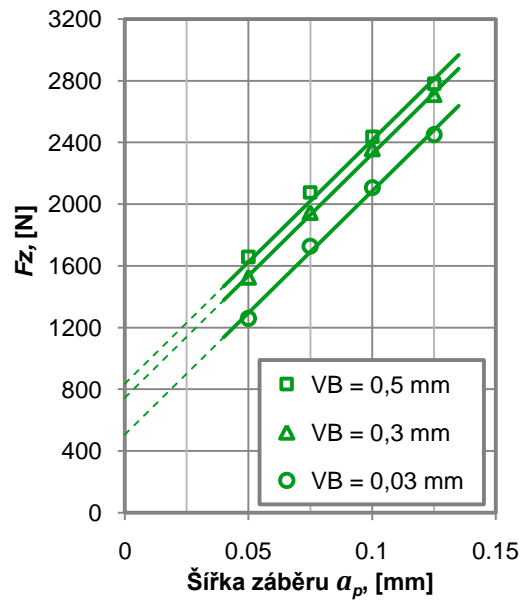
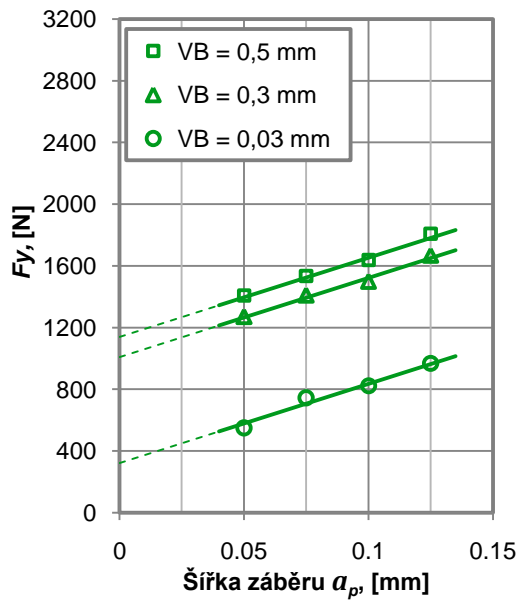
14220.3



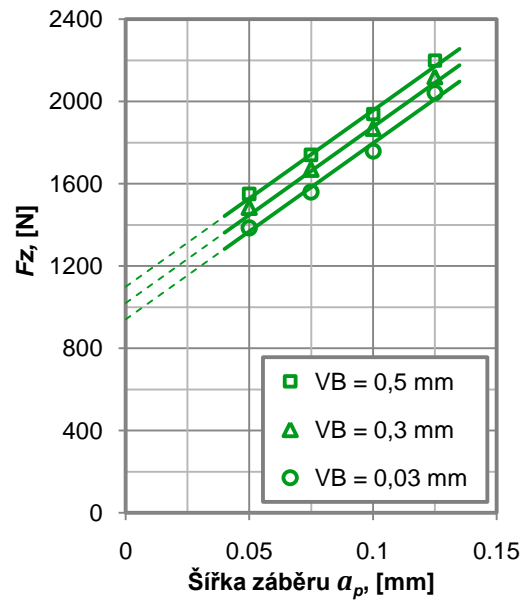
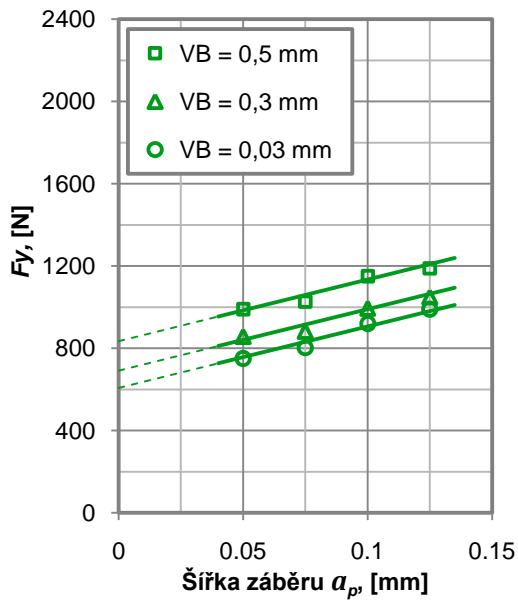
15260



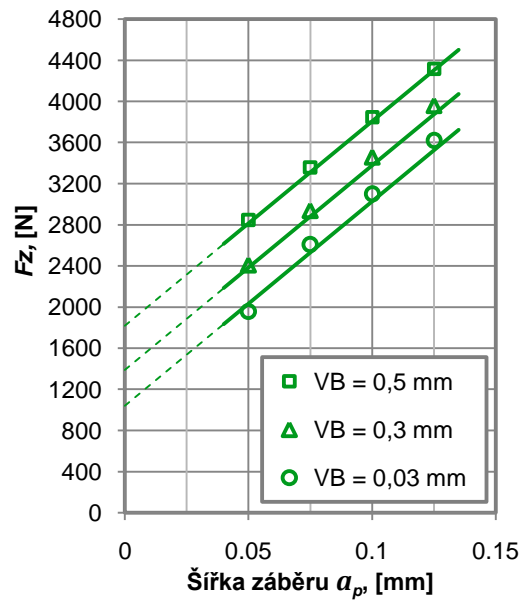
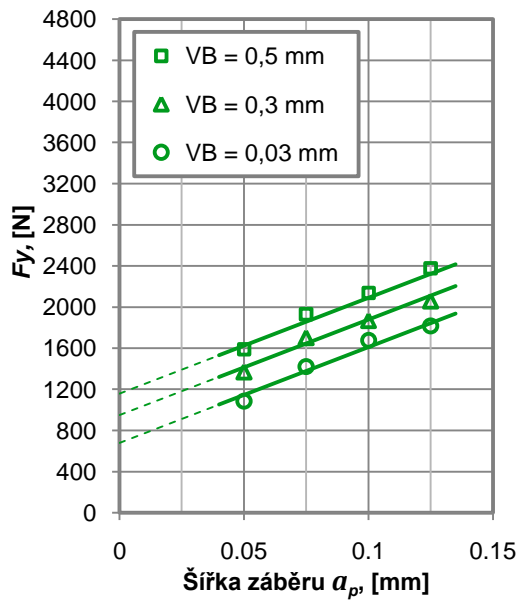
16220



17022



17240

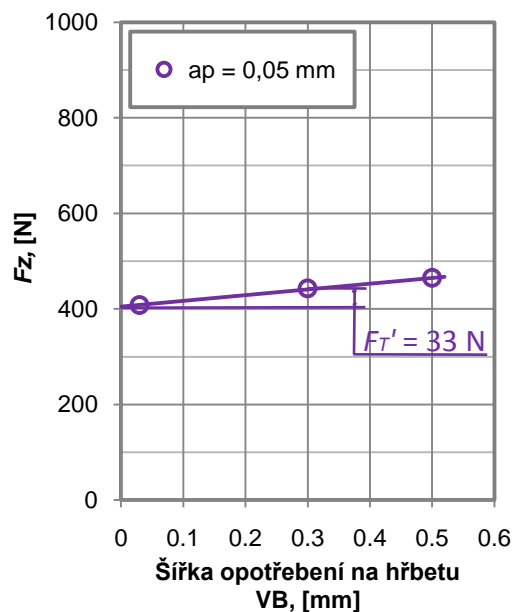
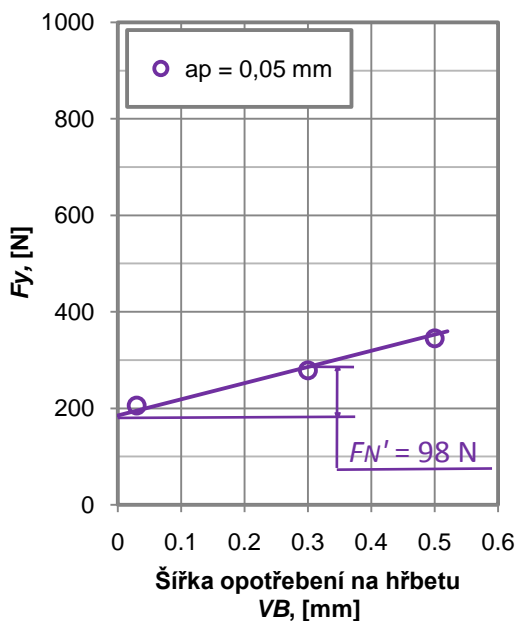


Příloha 3

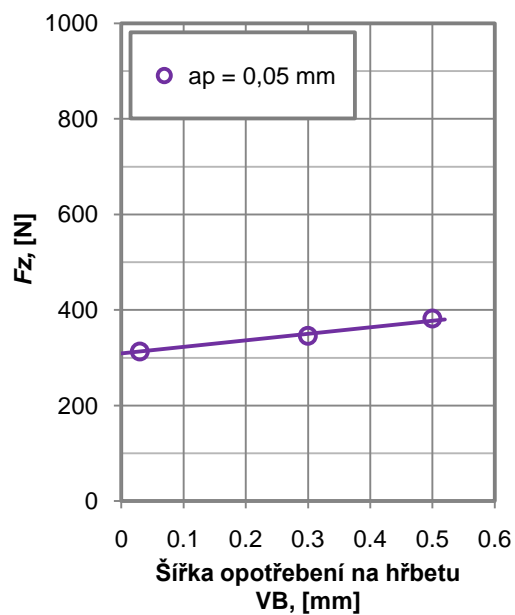
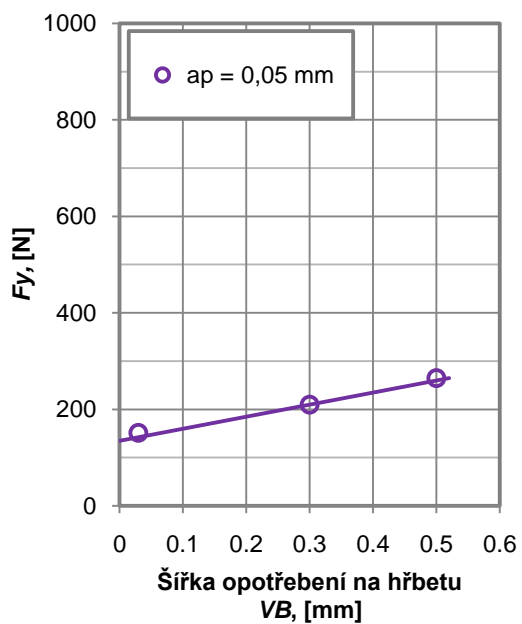
Stanovení sil na hřbetu metodou porovnání sil pro různé šířky opotřebení na hřbetu při obrábění různých materiálů.

Vertikální složka F_y a horizontální složka F_z výsledné řezné síly R jako funkce šířky opotřebení na hřbetu VB při obrábění různých materiálů.

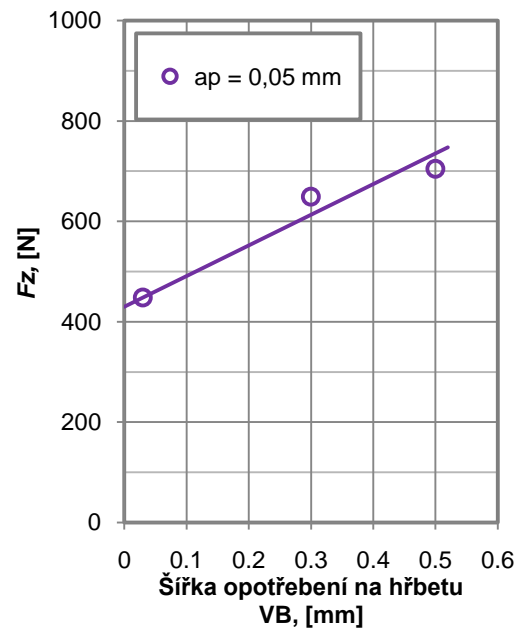
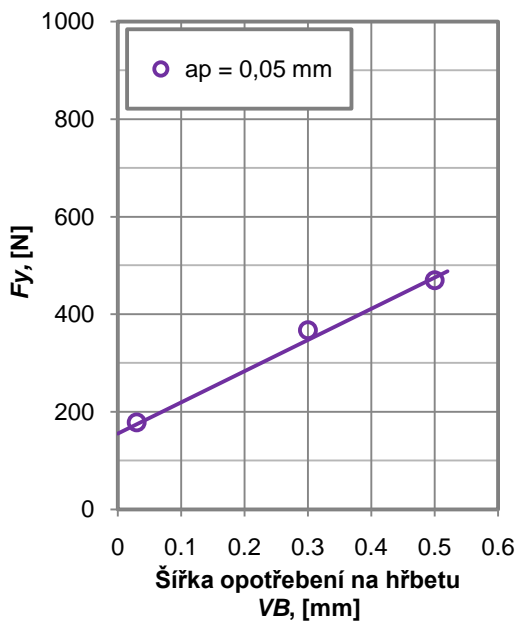
Al99,5



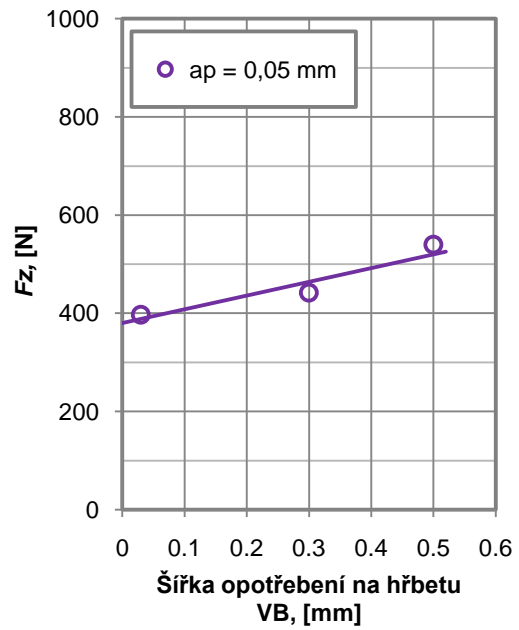
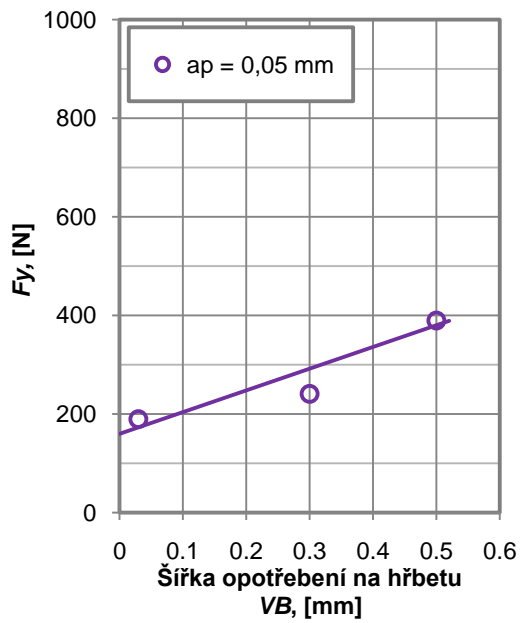
AlCu6BiPb



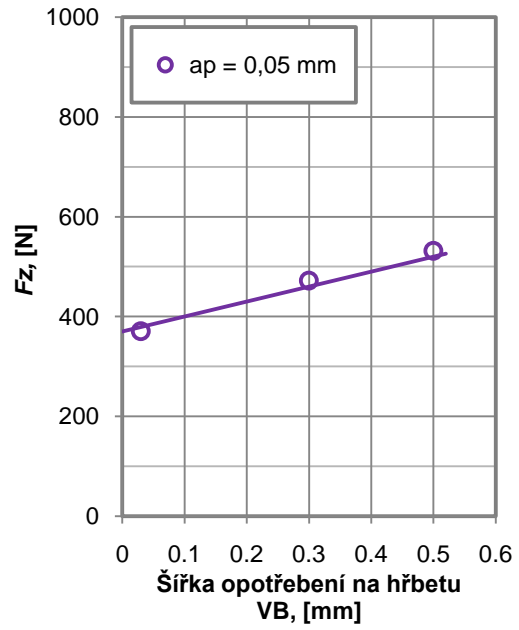
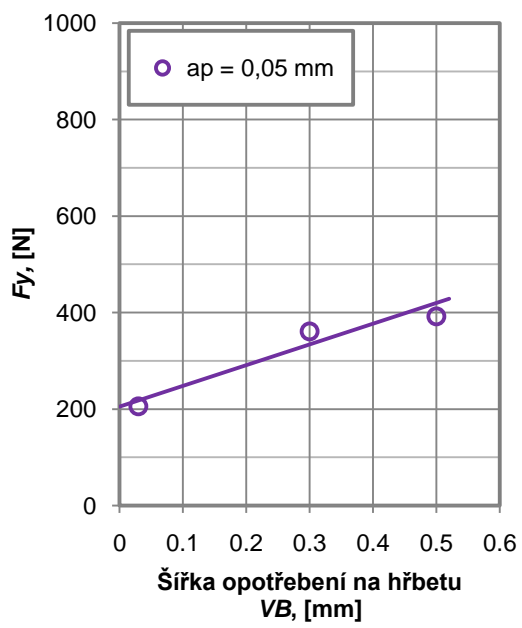
AlMgSi



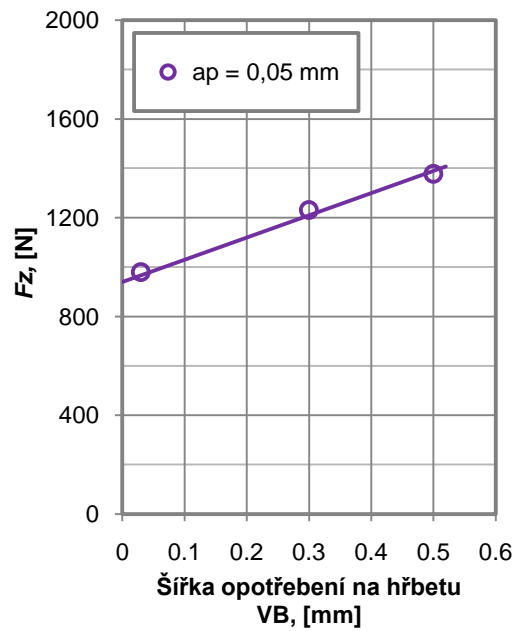
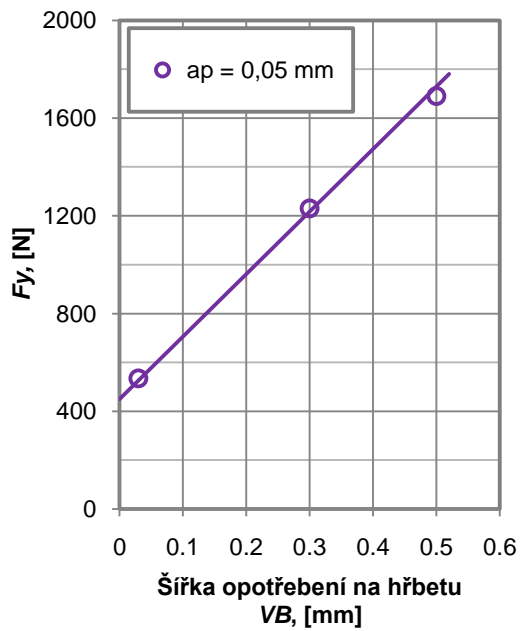
AICU4PbMgMn



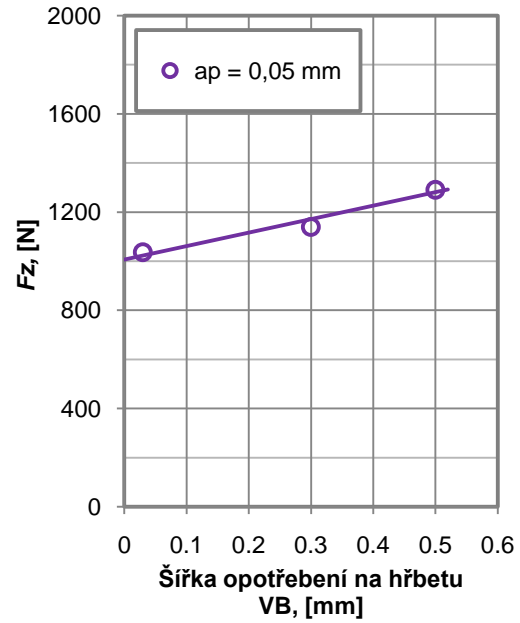
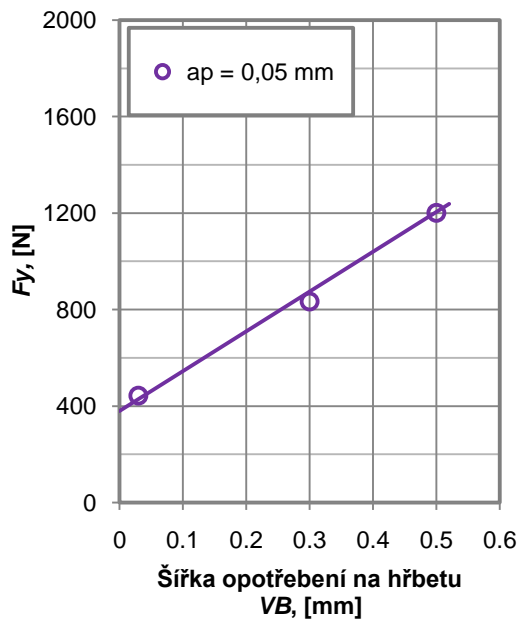
AlCu4MgSi



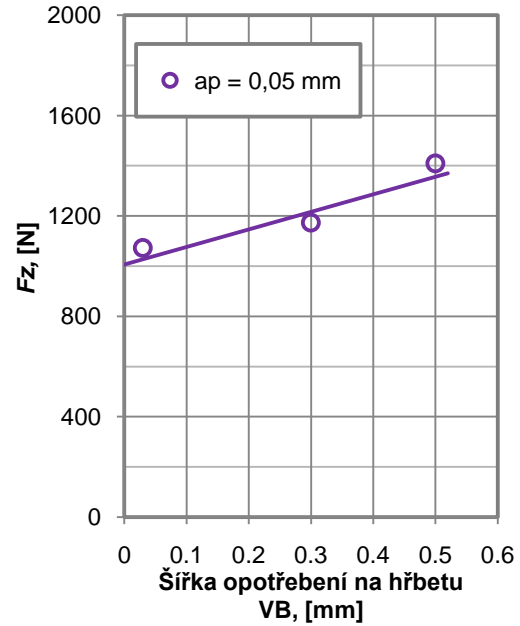
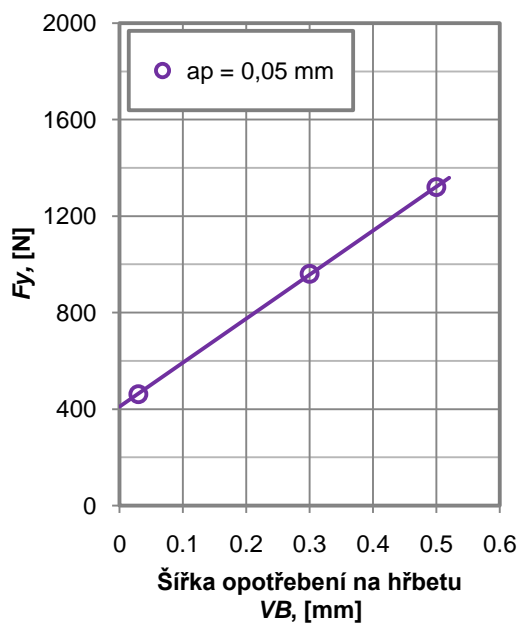
12050.1



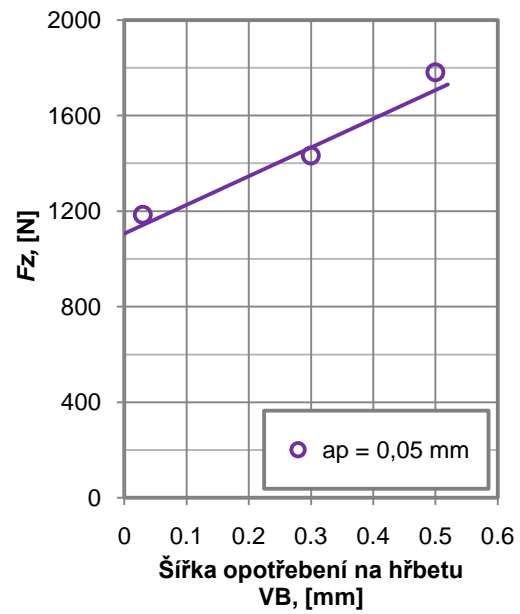
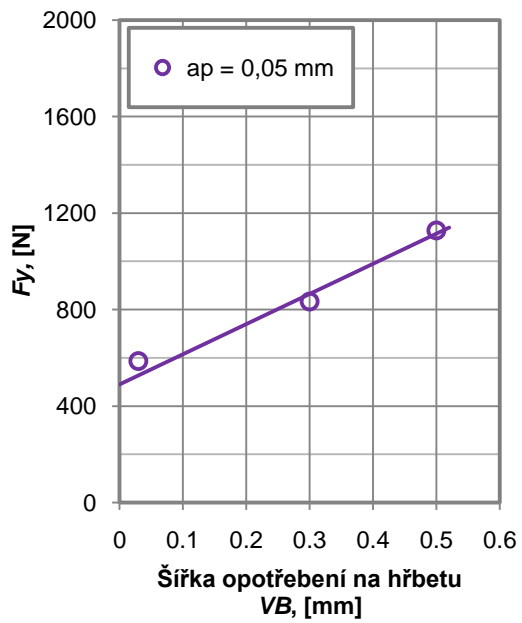
11373



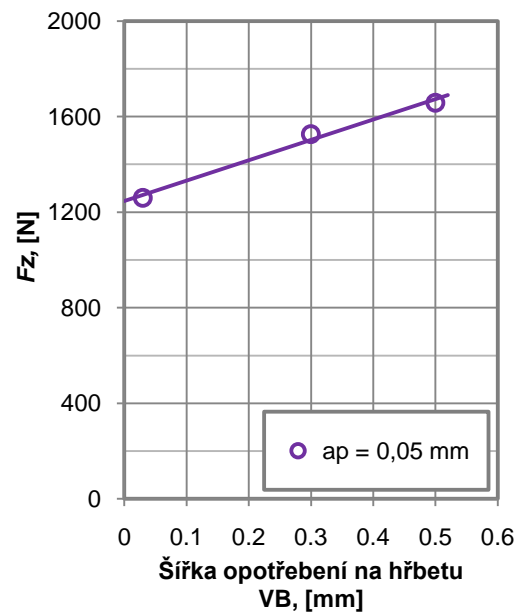
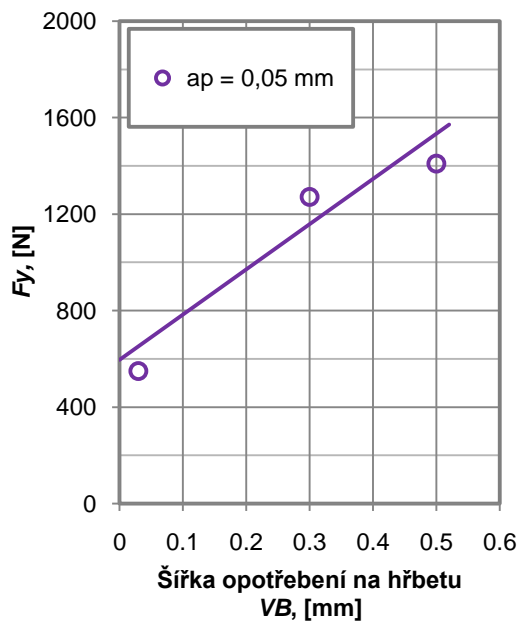
14220.3



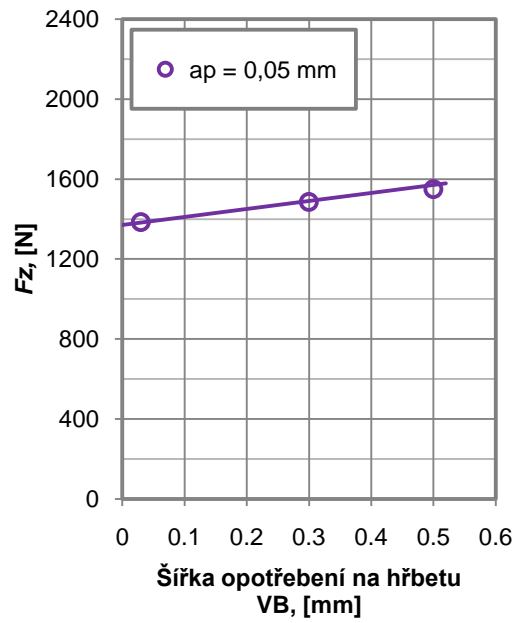
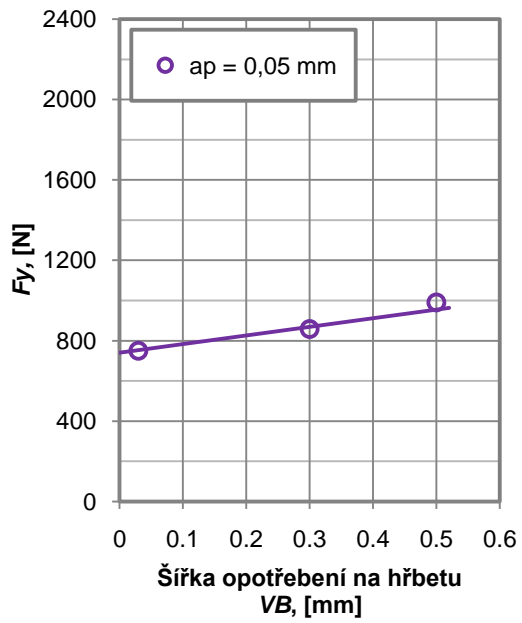
15260



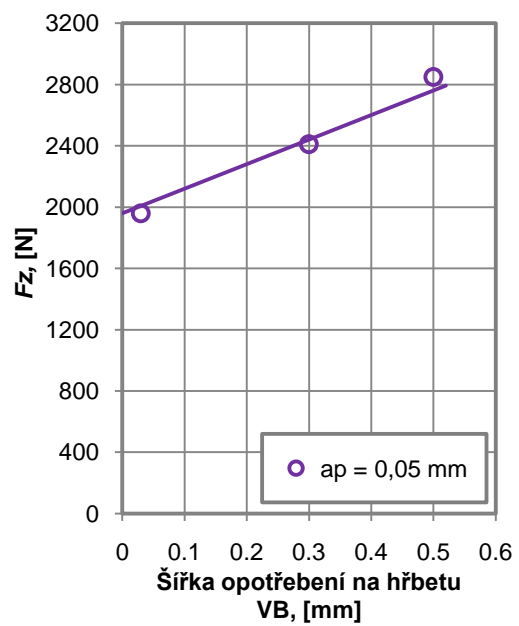
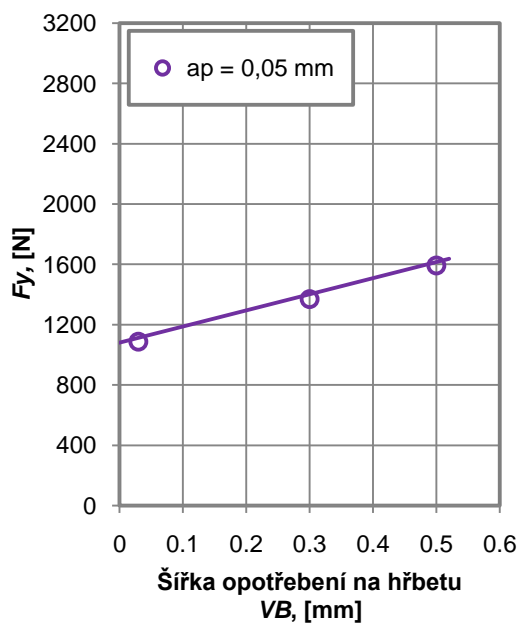
16220



17022



17240

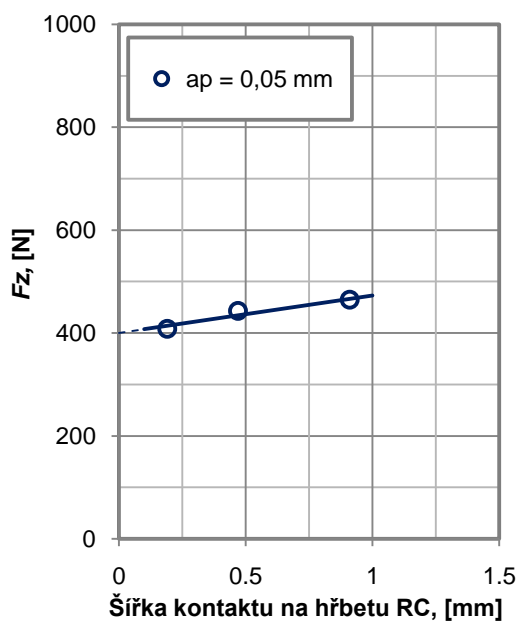
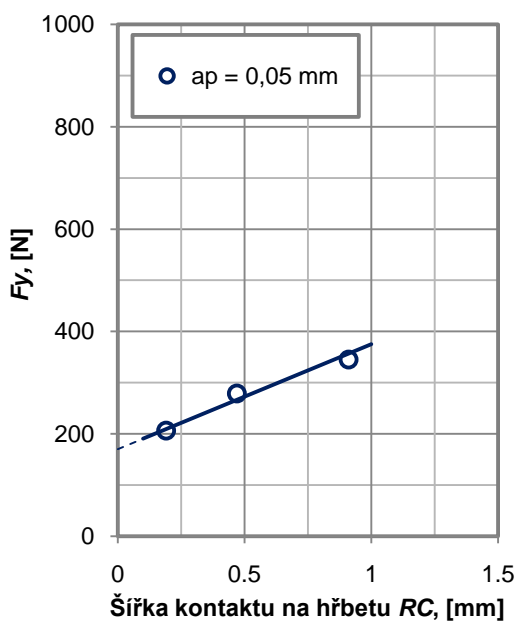


Příloha 4

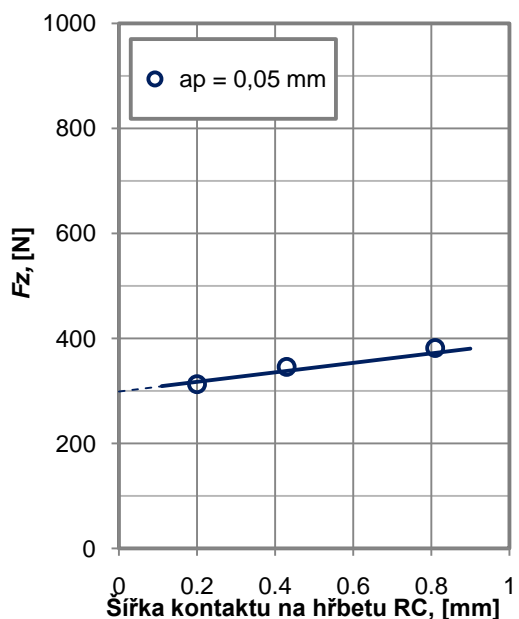
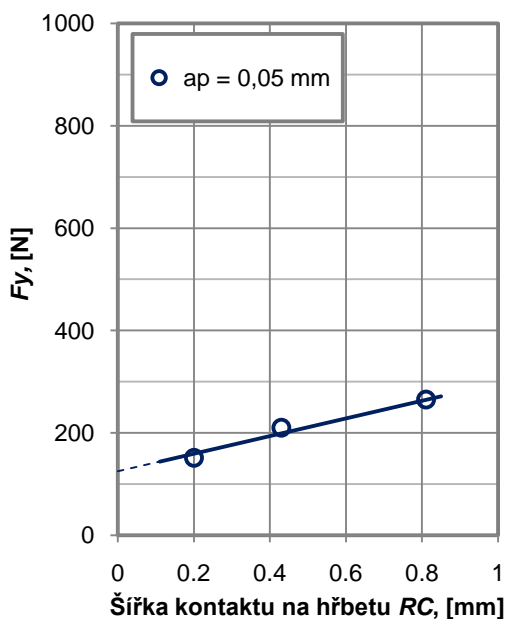
Stanovení sil na hřbetu metodou porovnání sil pro různé šířky kontaktu na hřbetu.

Vertikální složka F_y a horizontální F_z výsledné řezné síly R jako funkce šířky kontaktu RC hřbetu při obrábění různých materiálů.

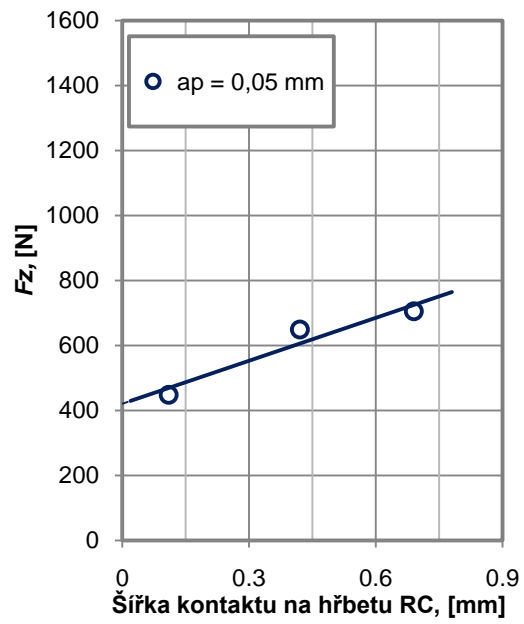
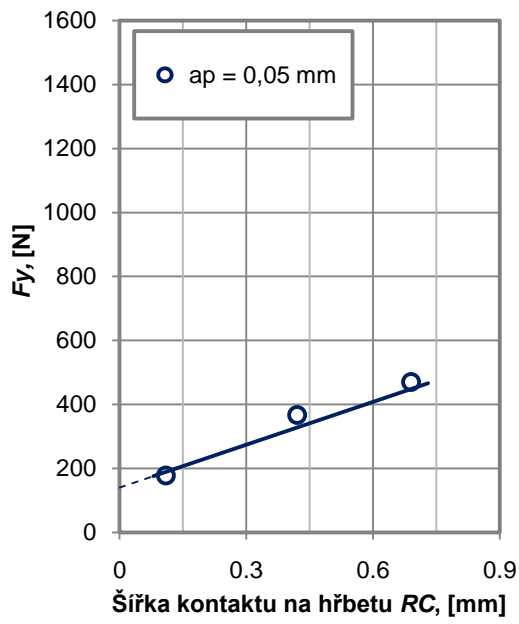
Al99,5



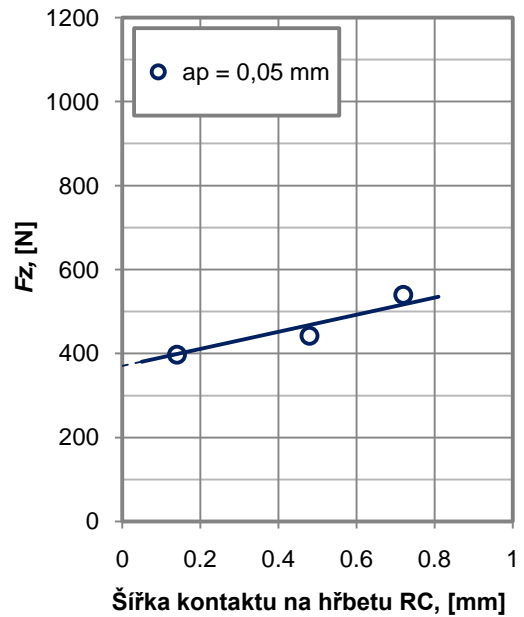
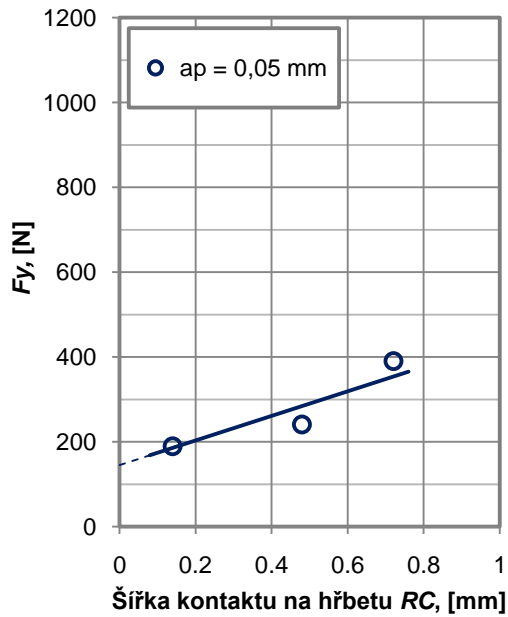
AlCu6BiPb



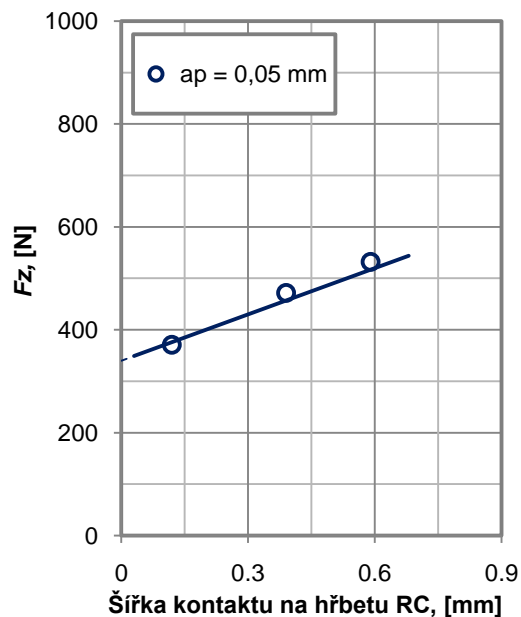
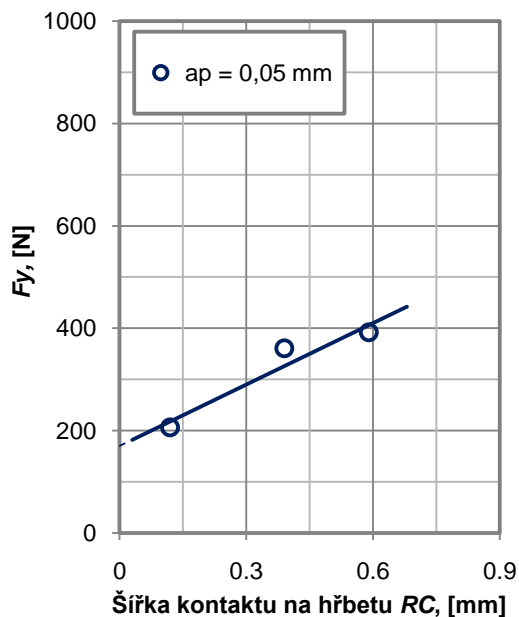
AlMgSi



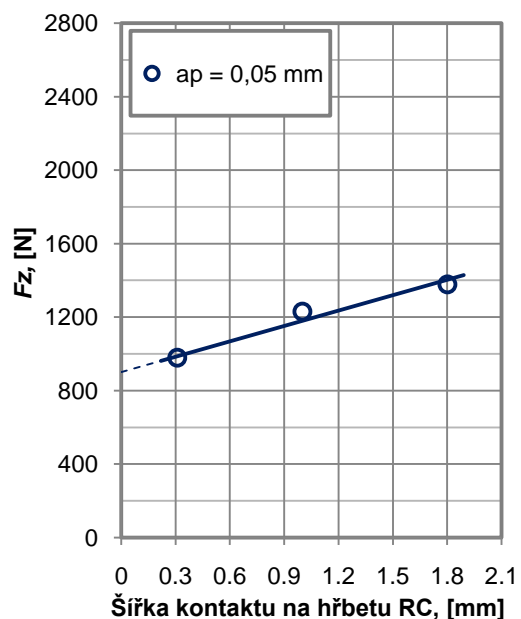
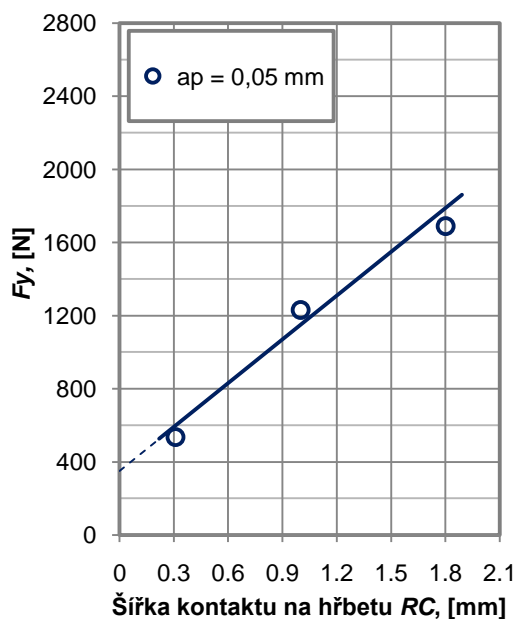
AICU4PbMgMn



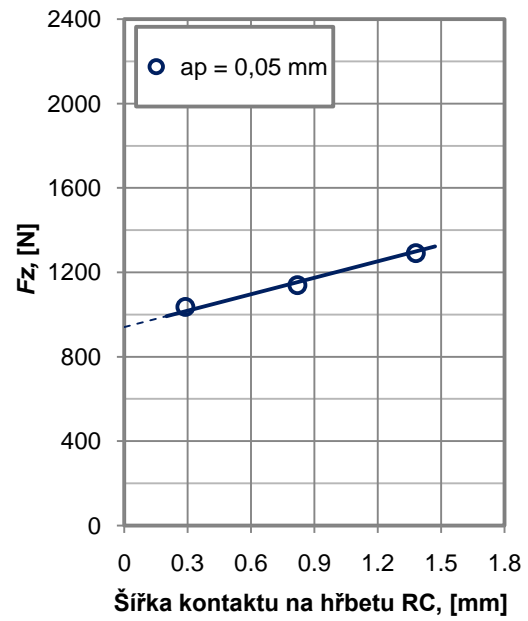
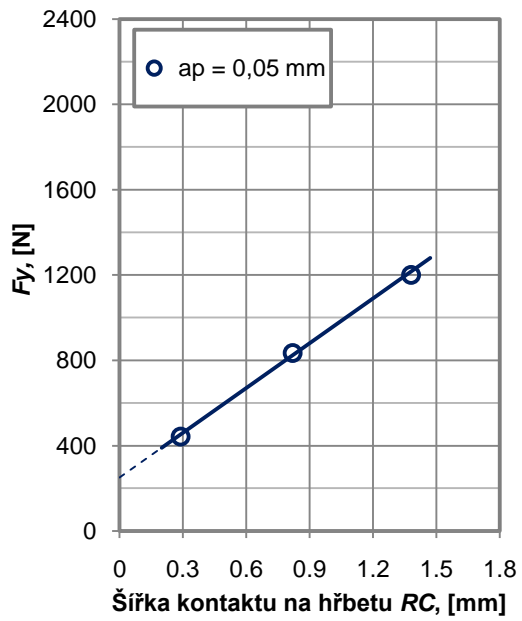
AlCu4MgSi



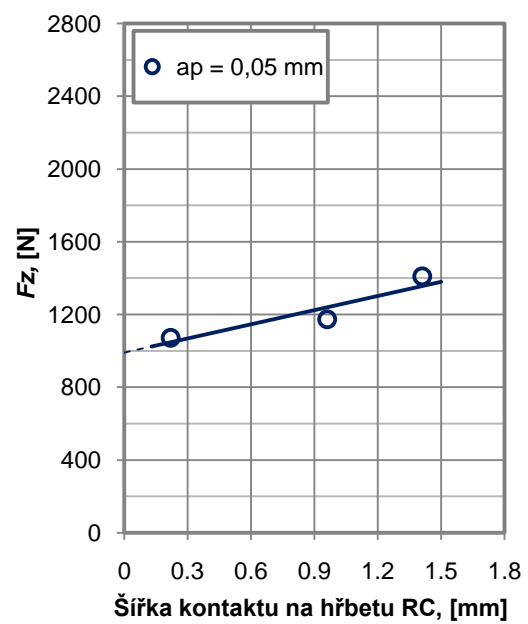
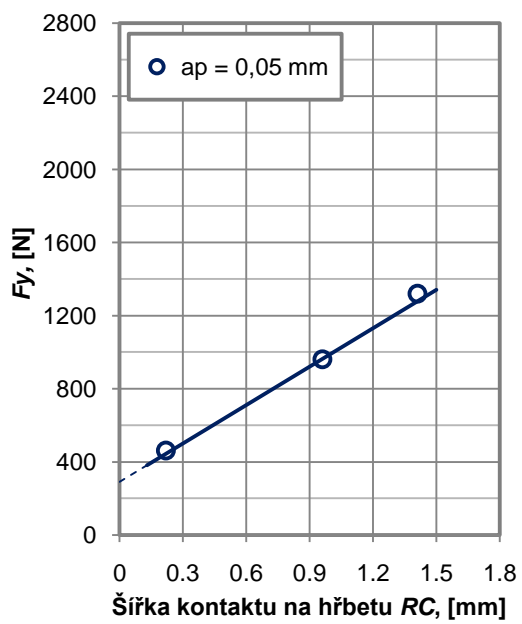
12050.1



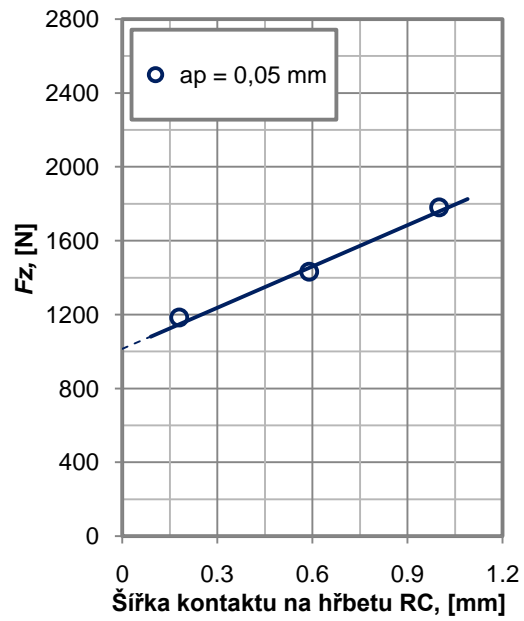
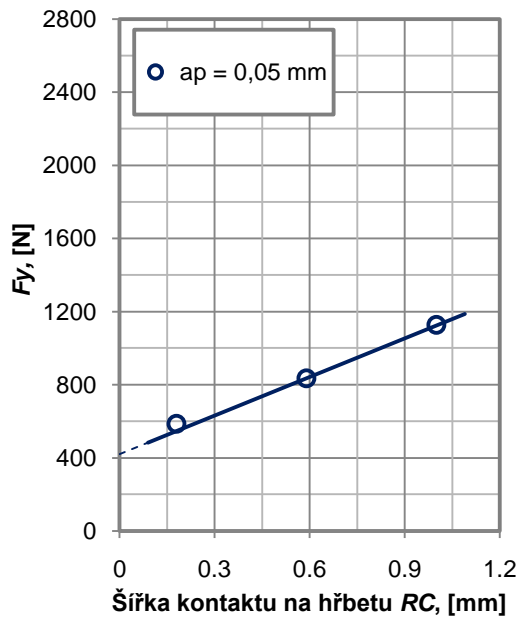
11373



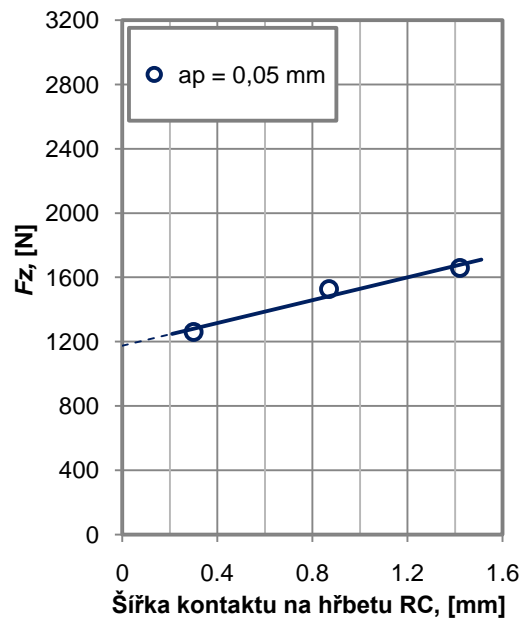
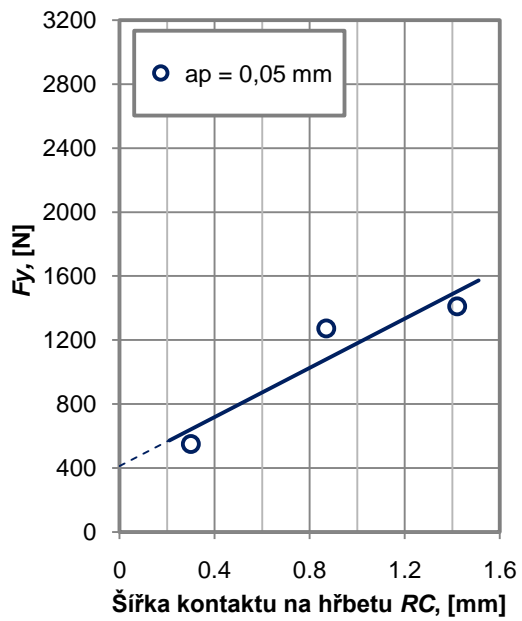
14220.3



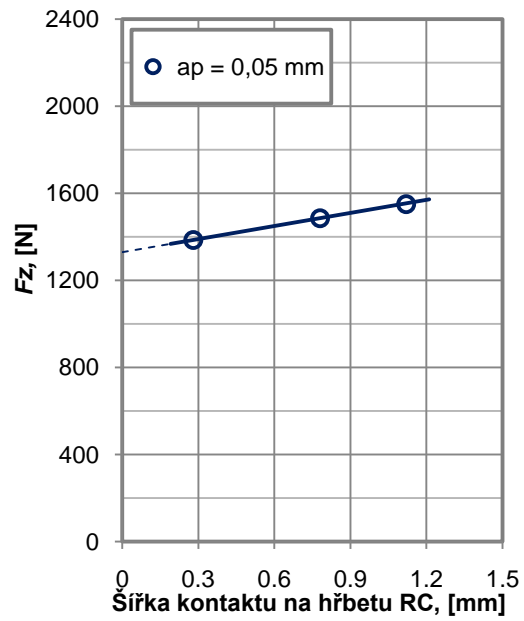
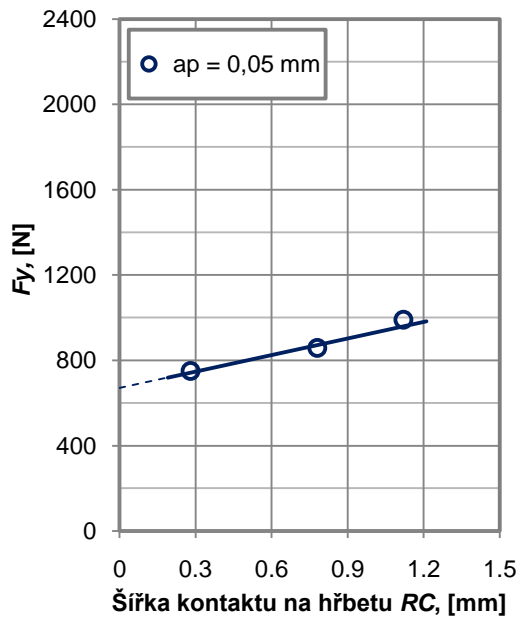
15260



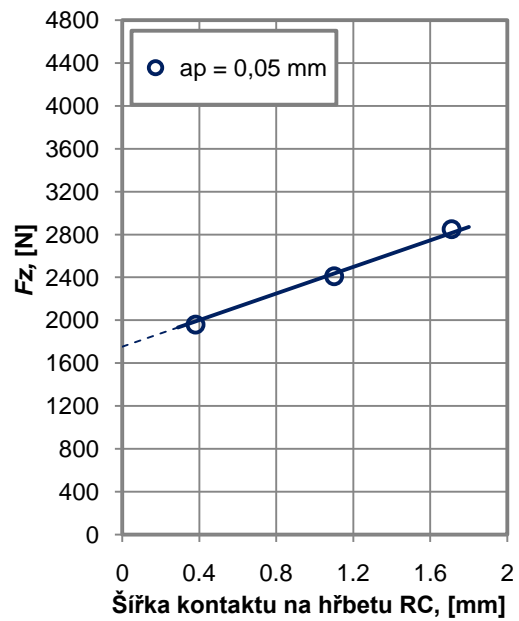
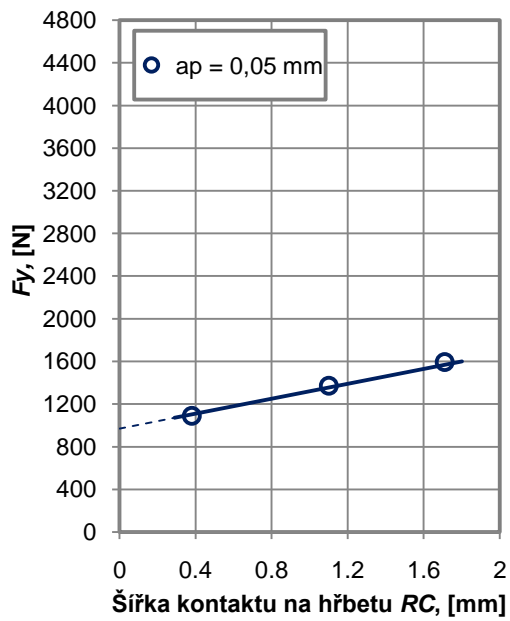
16220



17022



17240

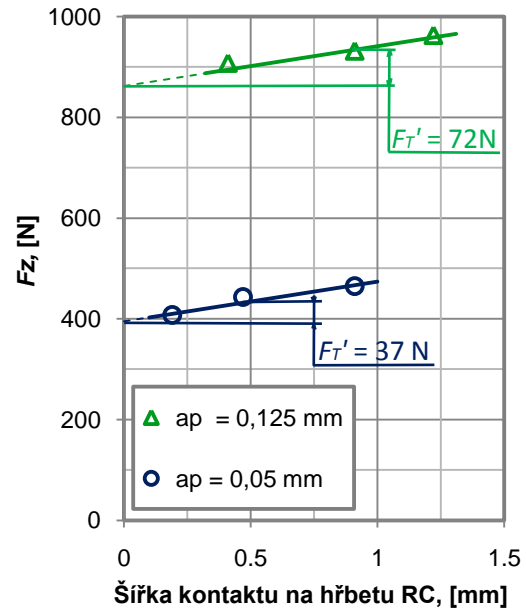
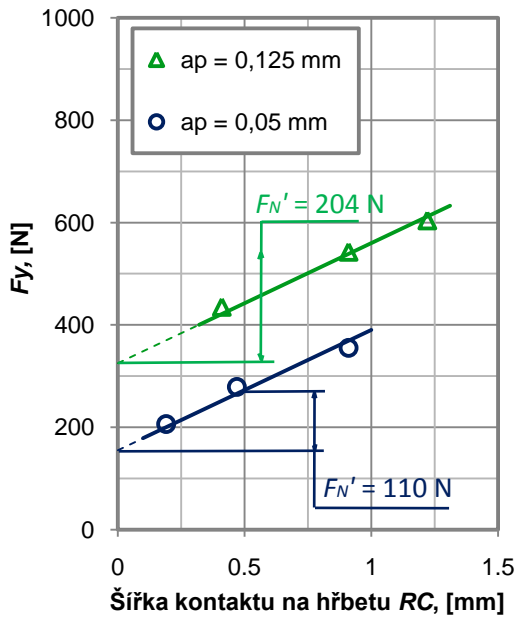


Příloha 5

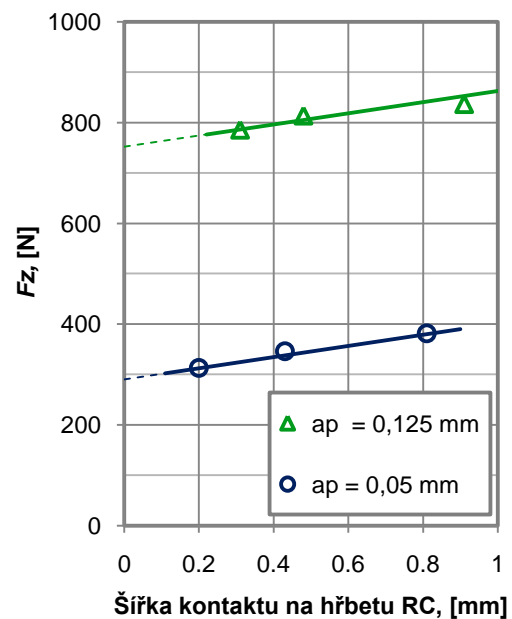
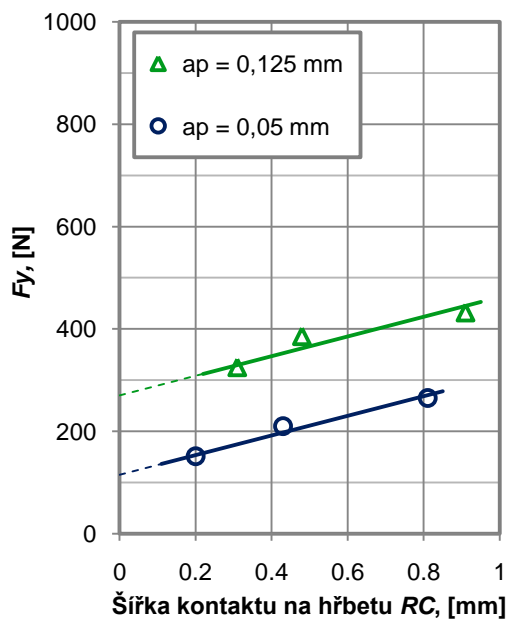
Stanovení sil na hřbetu metodou porovnání sil pro různé šířky kontaktu na hřbetu při obrábění dvanácti různých materiálů a při různých šířkách záběru $a_p = 0,05$ a $0,125$ mm.

Vertikální složka F_y a horizontální složka F_z výsledné řezné síly R jako funkce šířky kontaktu na hřbetu RC při obrábění různých materiálů.

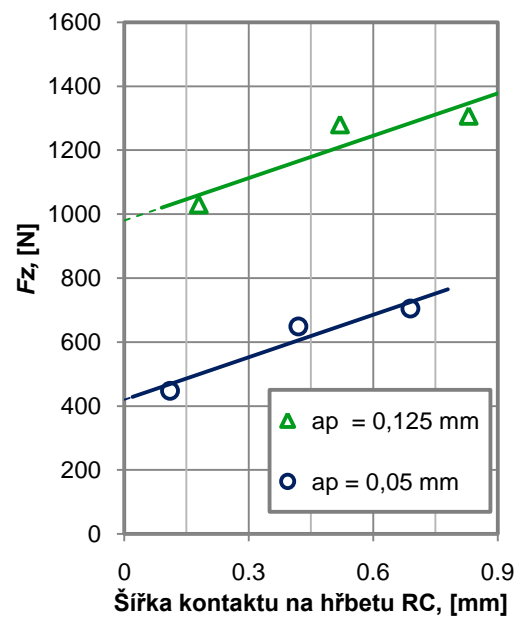
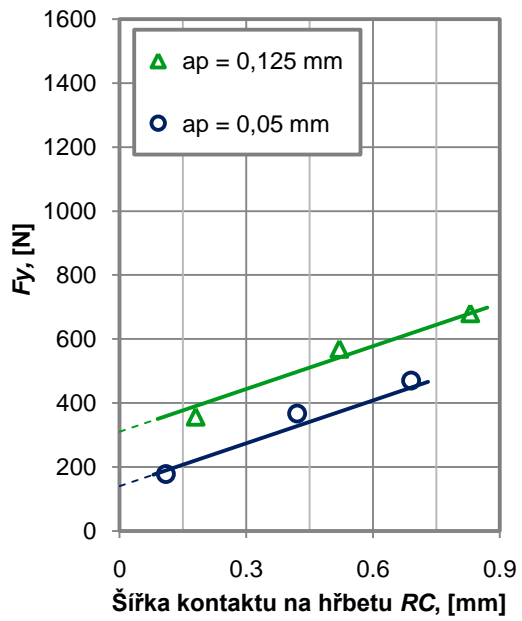
Al99,5



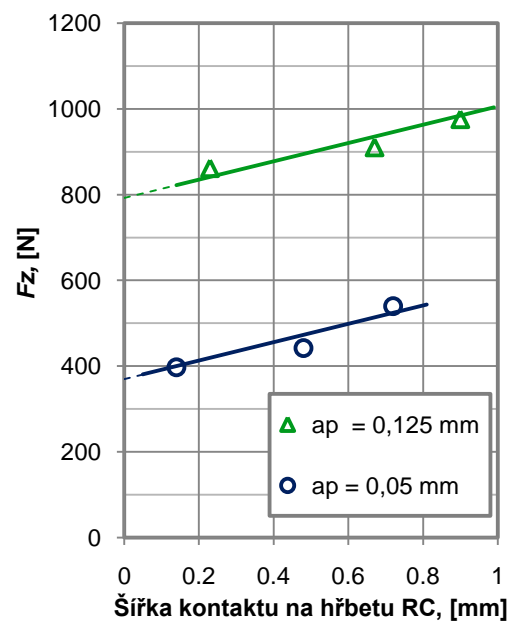
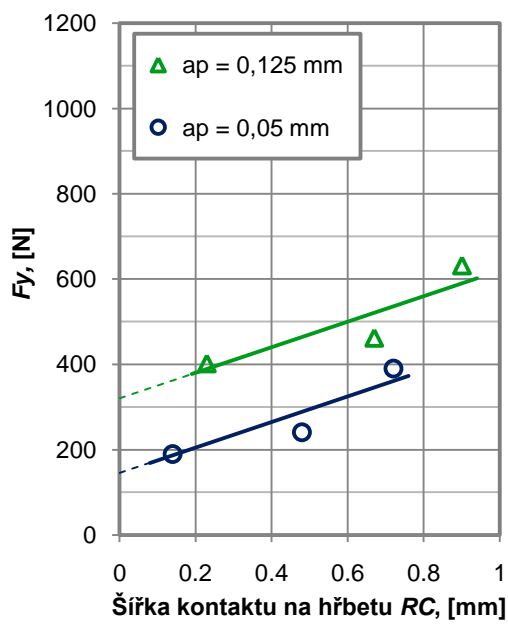
AlCu6BiPb



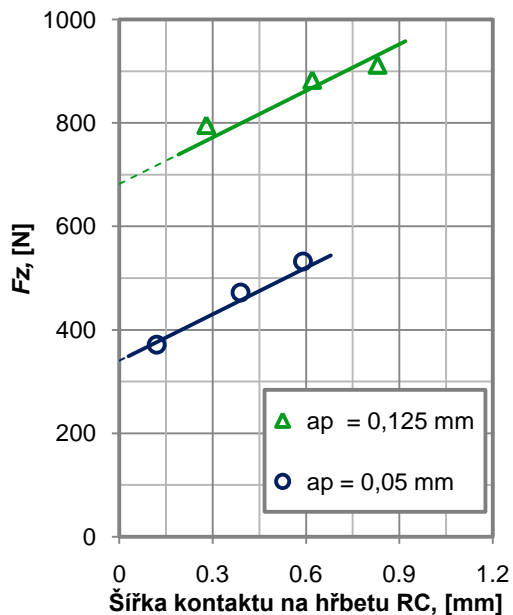
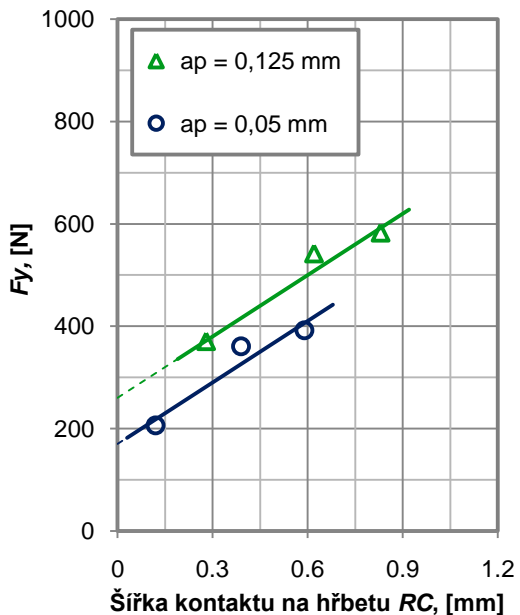
AlMgSi



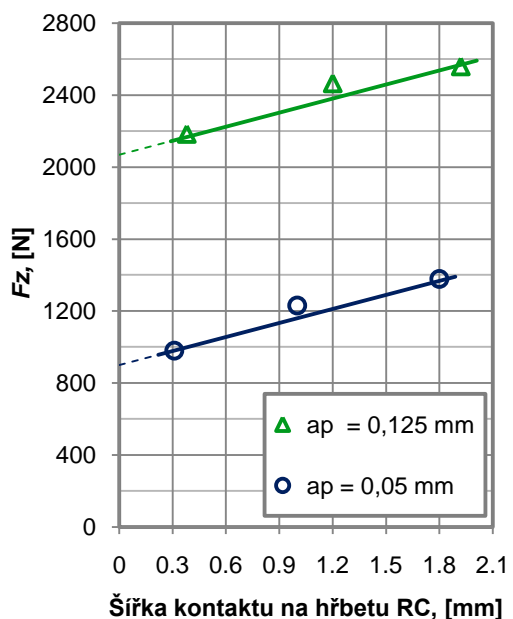
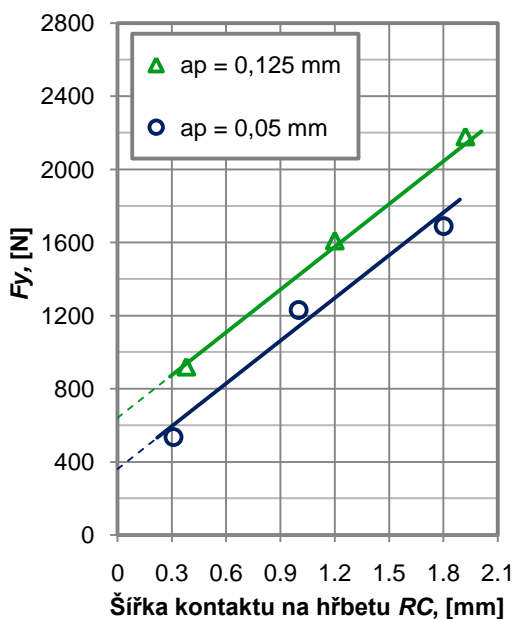
AlCu4PbMgMn



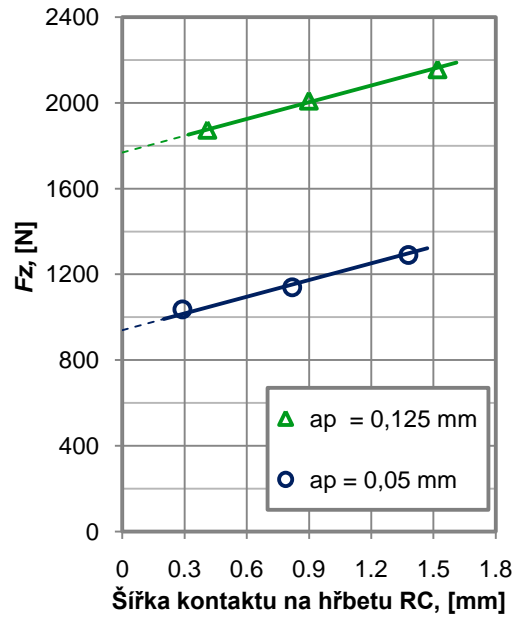
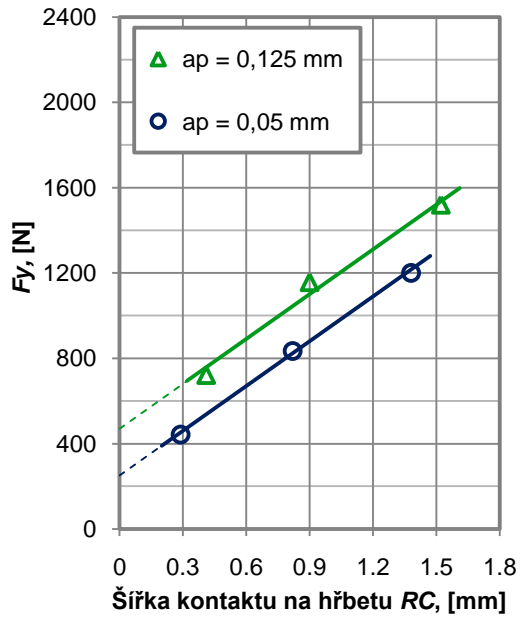
AlCu4MgSi



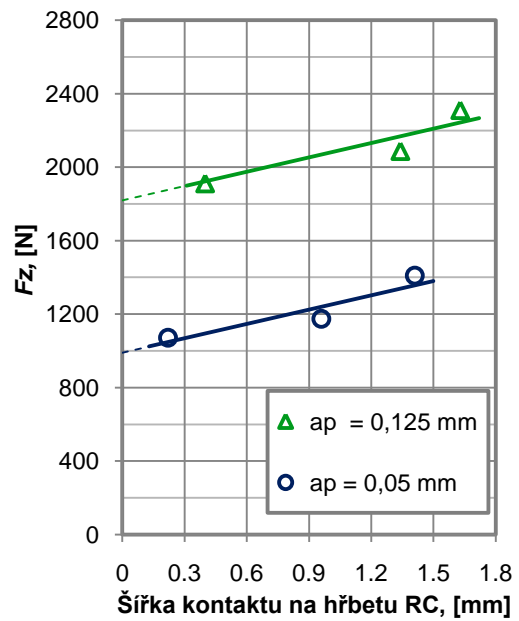
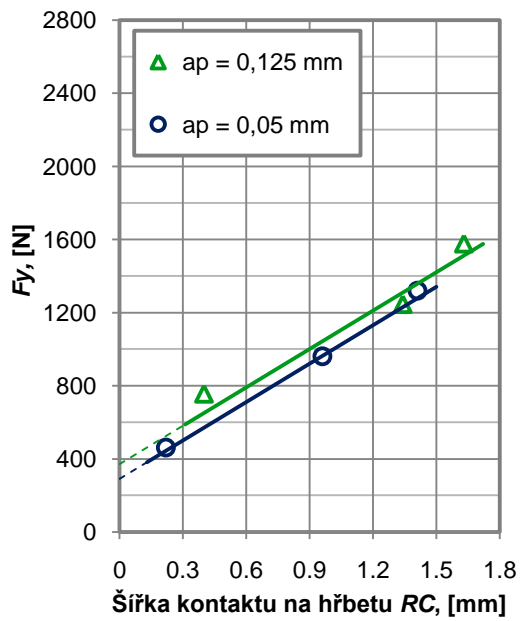
12050.1



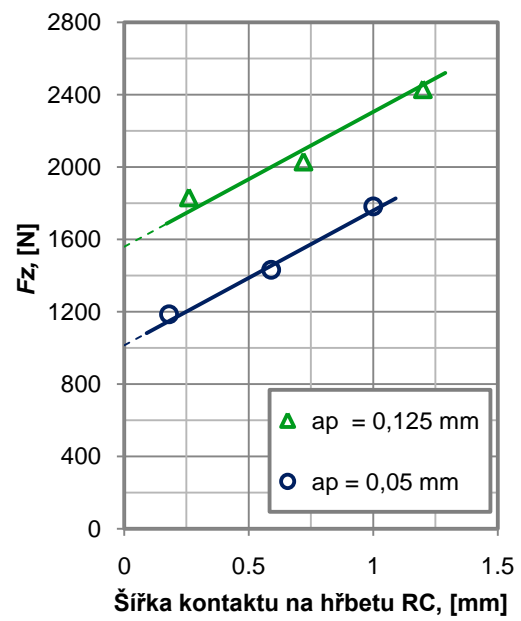
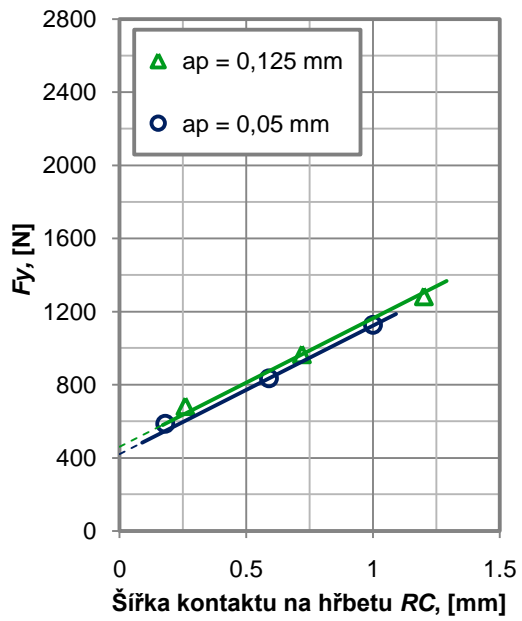
11373



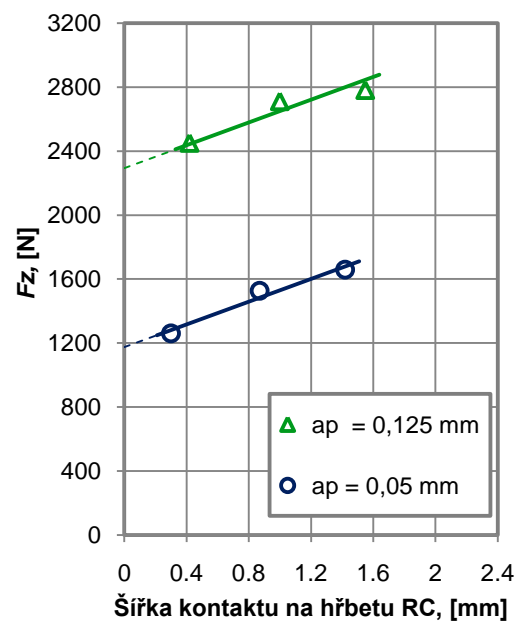
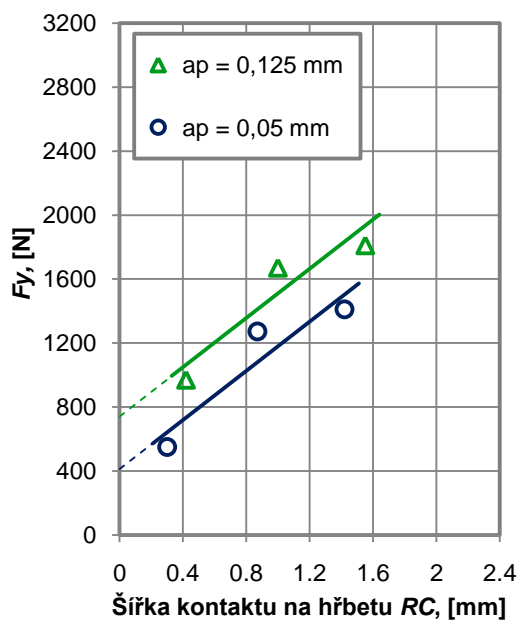
14220.3



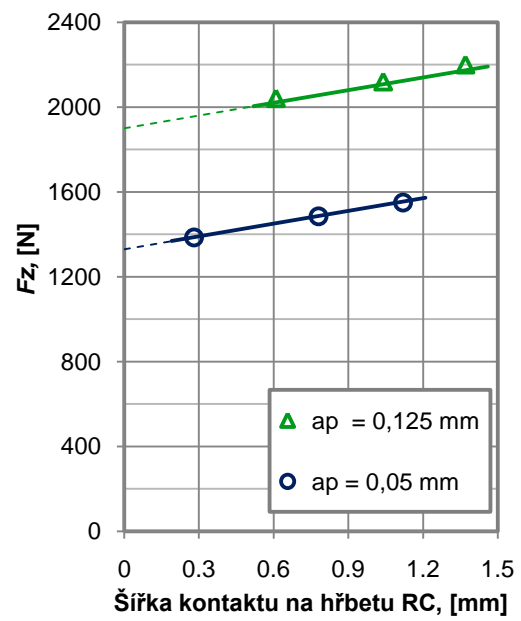
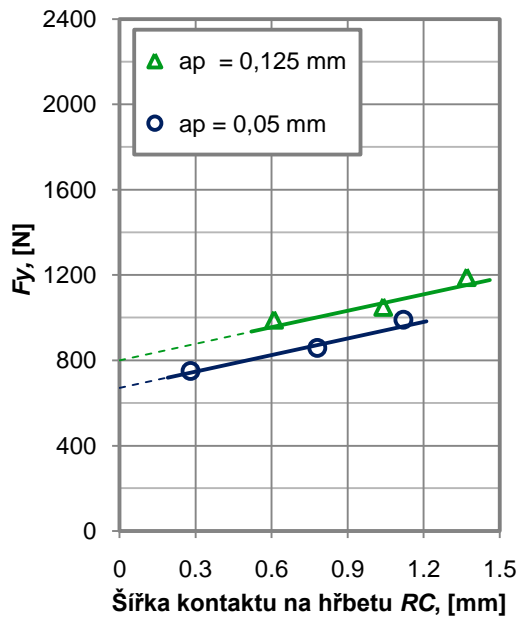
15260



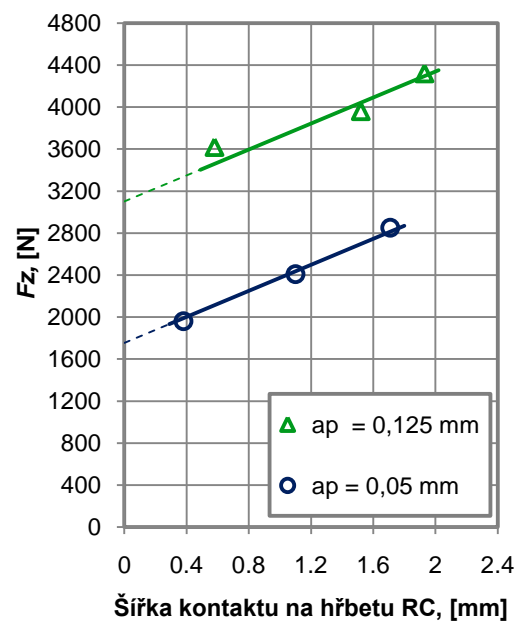
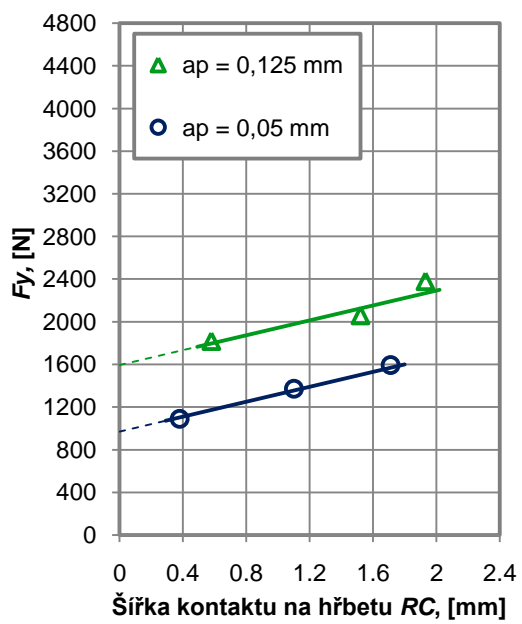
16220



17022



17240

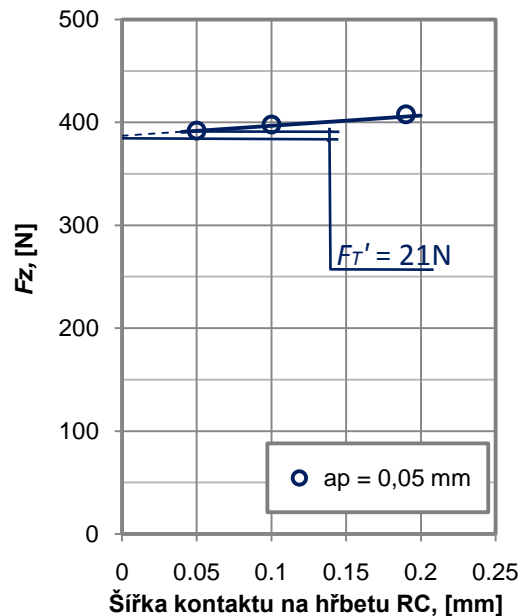
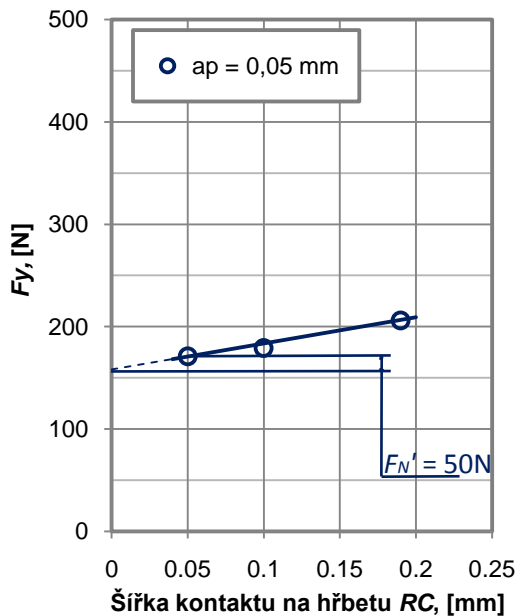


Příloha 6

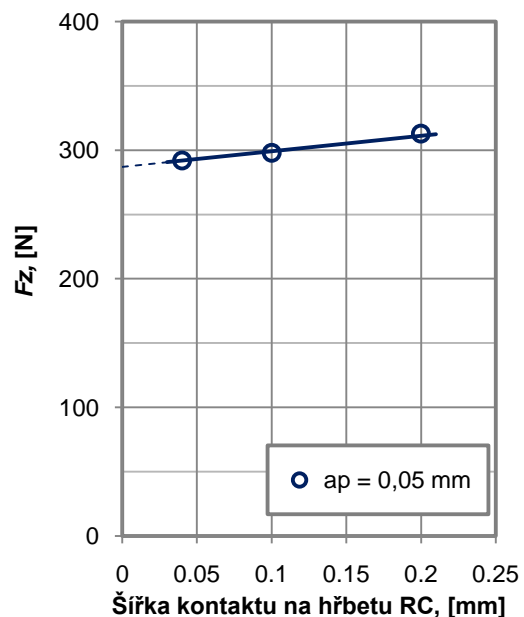
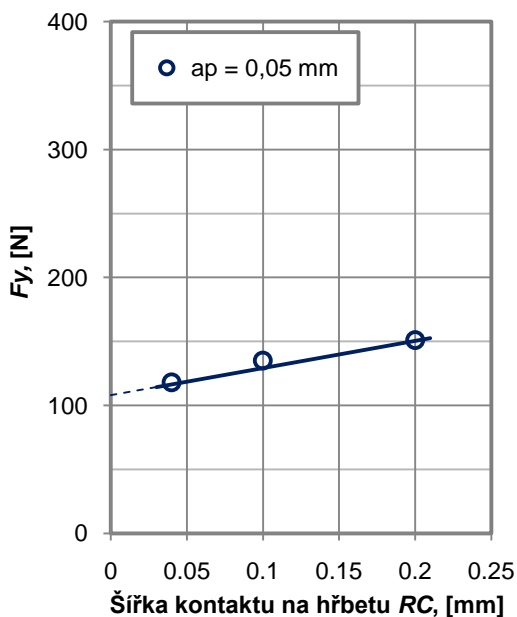
Stanovení sil na hřbetu řezného nástroje metodou pro materiály méně plasticky deformovatelné při obrábění dvanácti druhů materiálů lehce plasticky deformovatelné.

Vertikální složka F_y a horizontální složka F_z výsledné řezné síly R jako funkce šířky kontaktu na hřbetu RC při různých nástrojových ortogonálních úhlech hřbetu α_0 a při obrábění různých materiálů lehce plasticky deformovatelné.

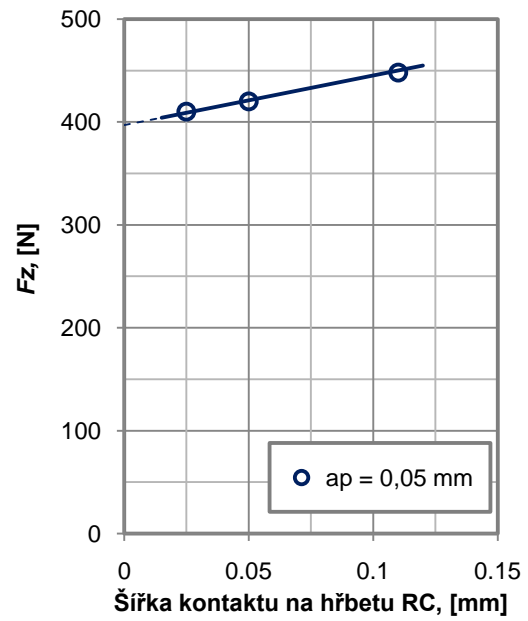
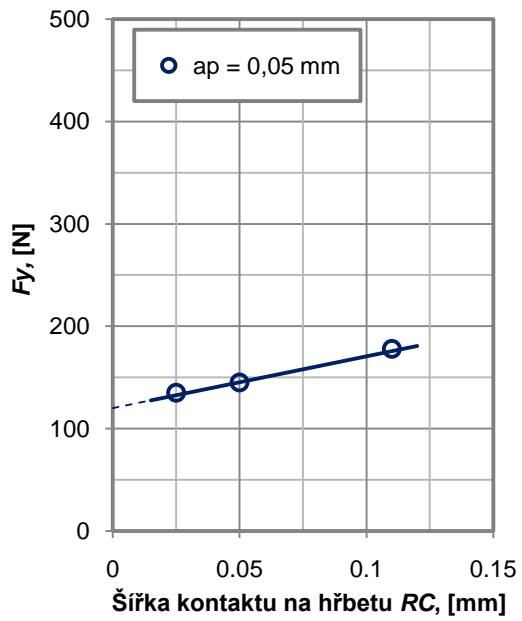
Al99,5



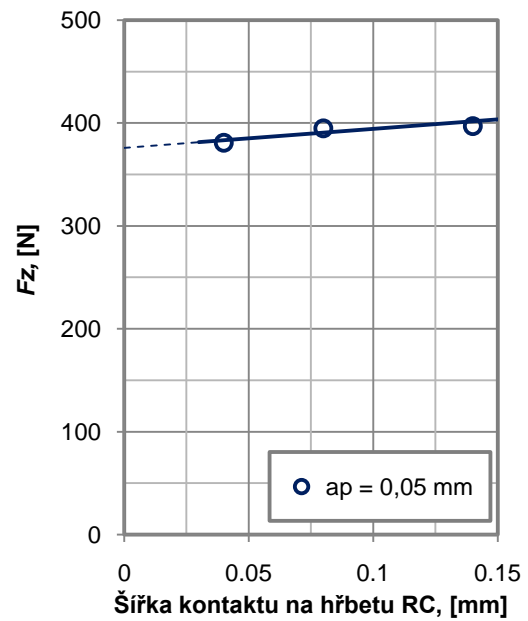
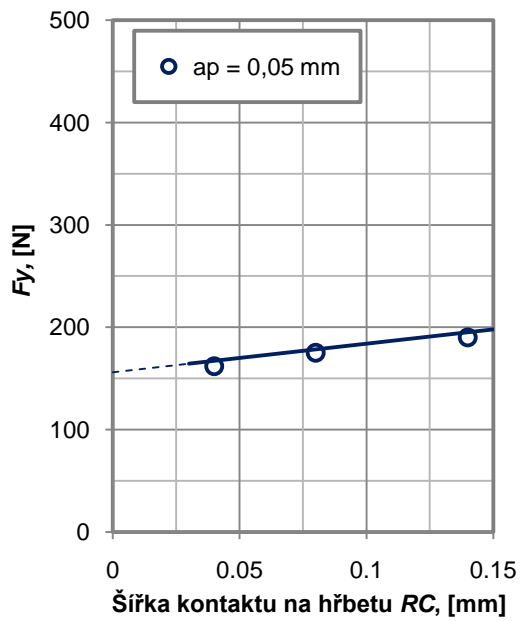
AlCu6BiPb



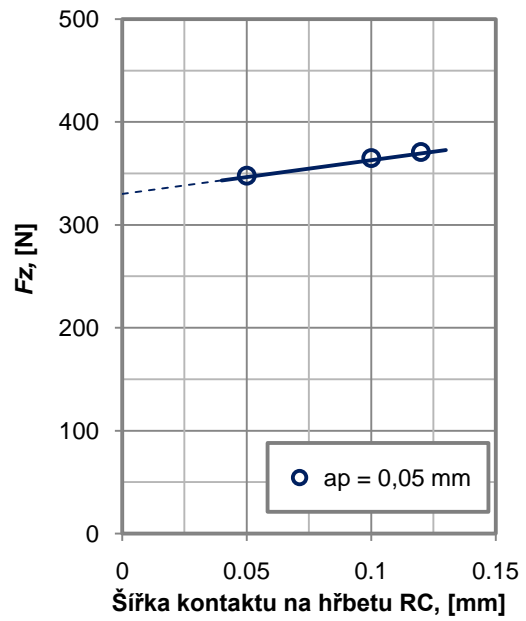
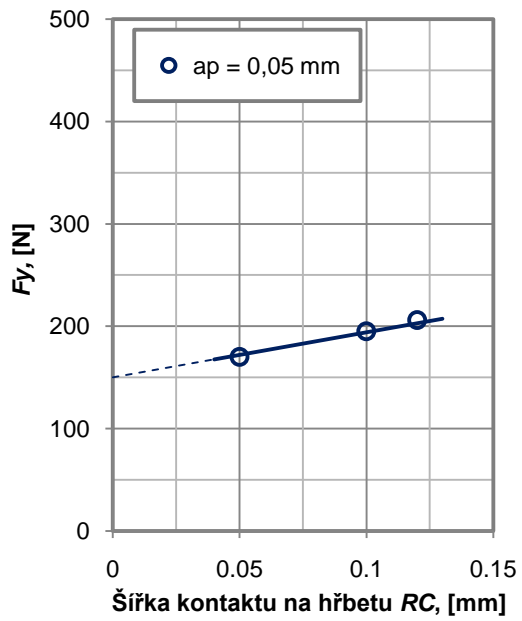
AlMgSi



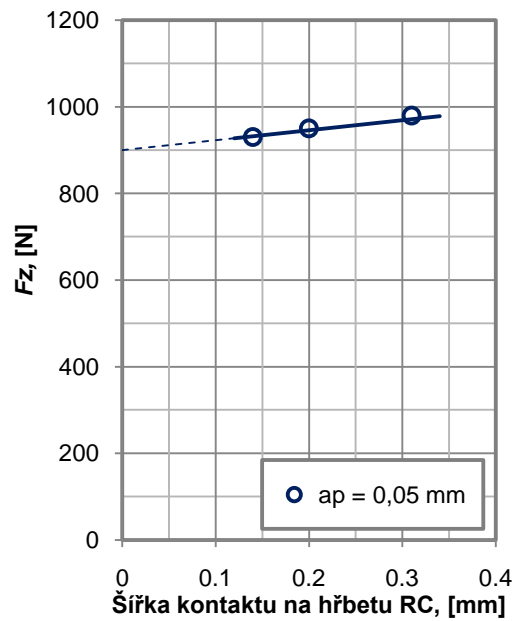
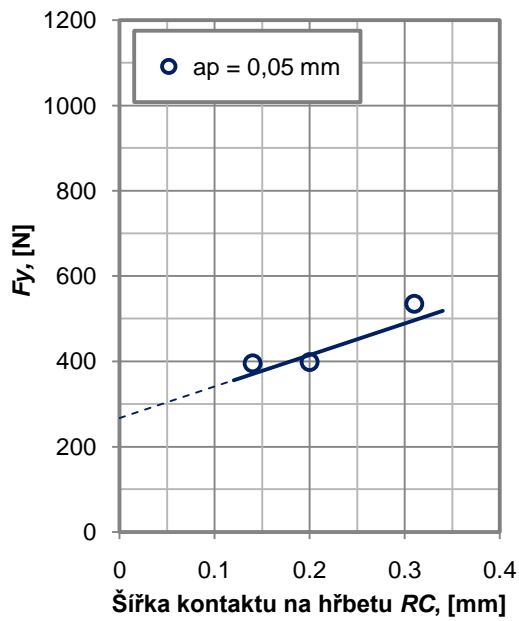
AICU4PbMgMn



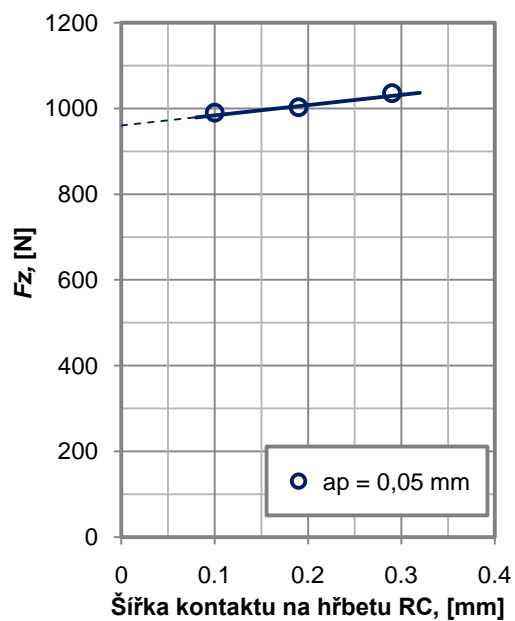
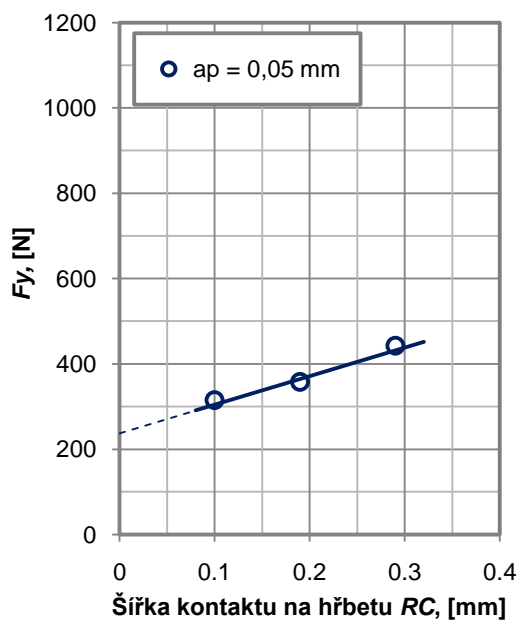
AlCu4MgSi



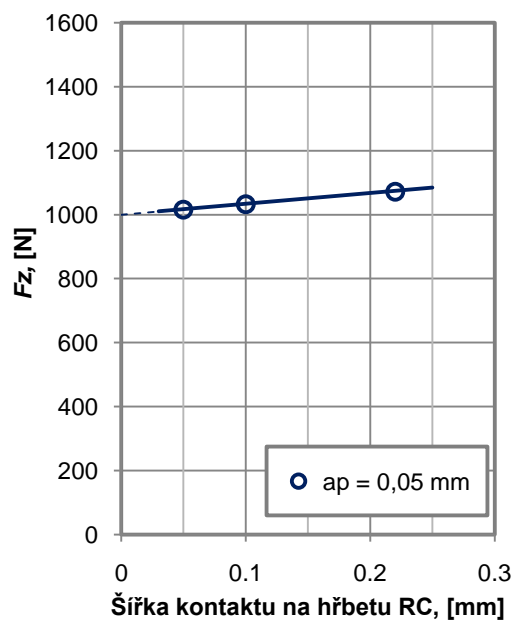
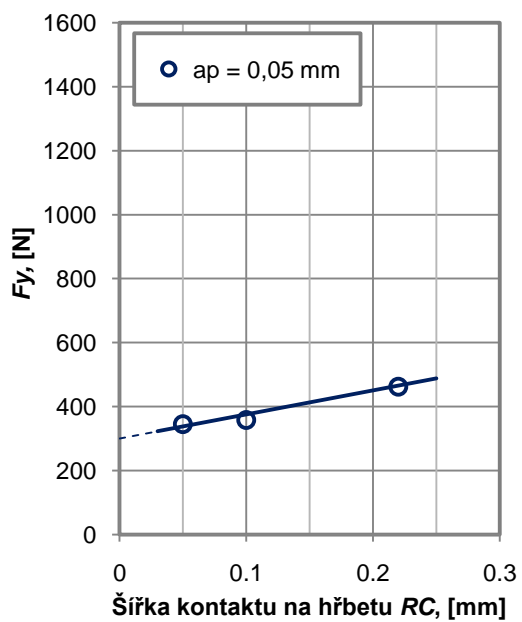
12050.1



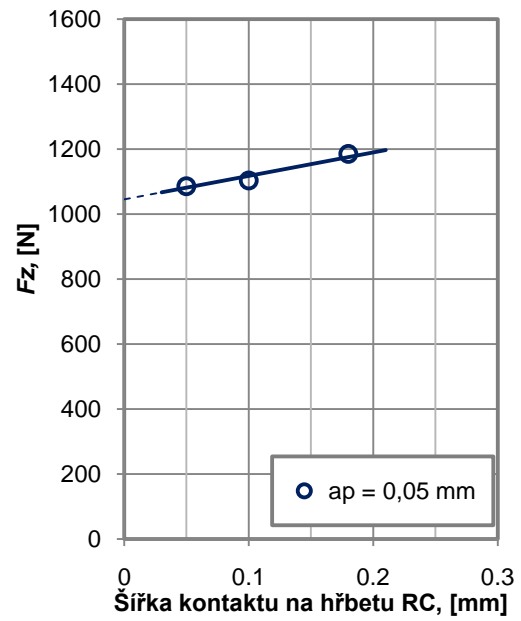
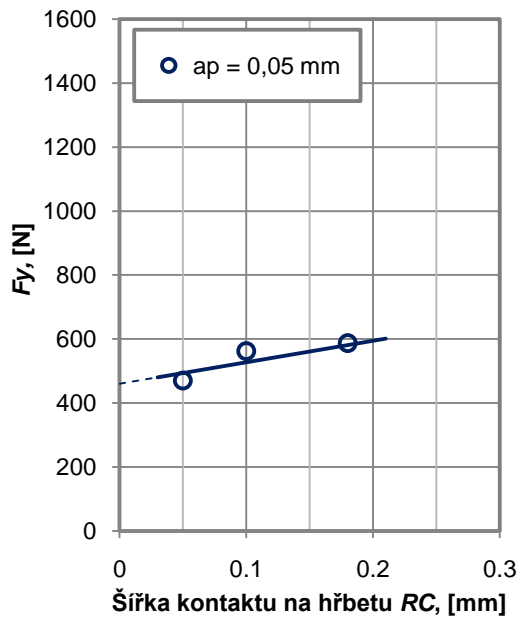
11373



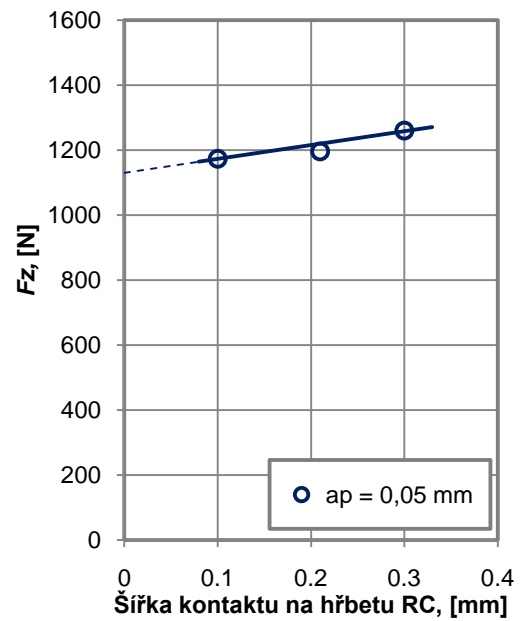
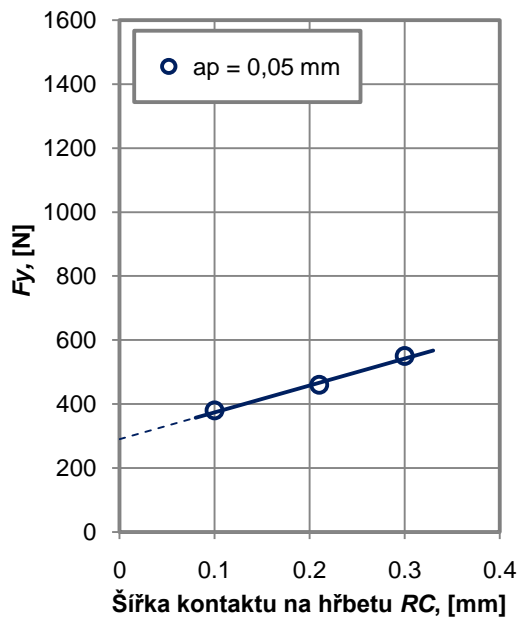
14220.3



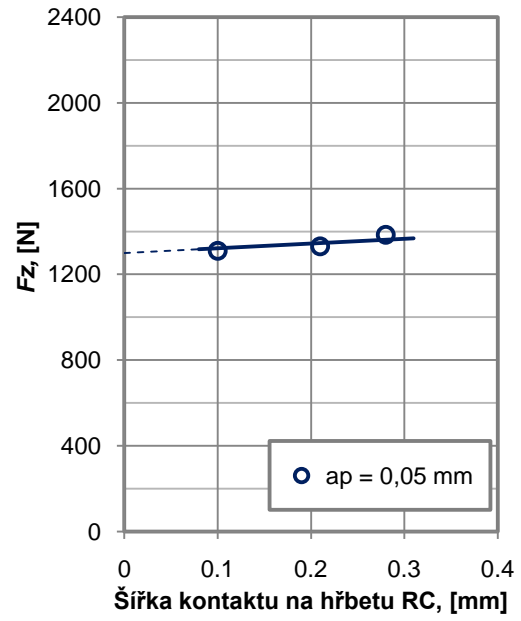
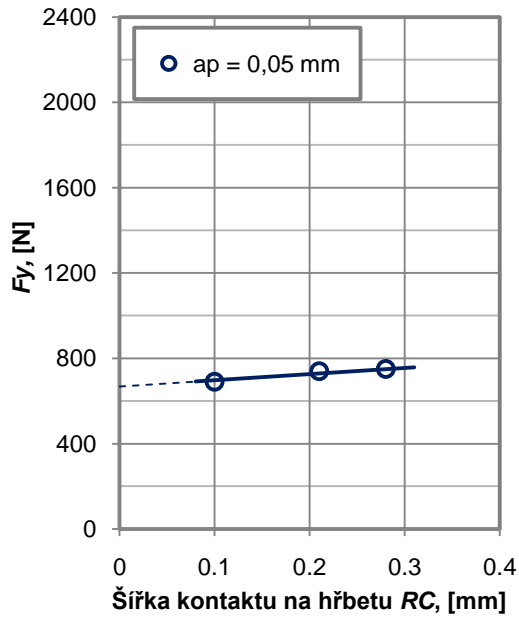
15260



16220



17022



17240

