VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

MODERNÍ ŘEZNÉ NÁSTROJE PRO ZAPICHOVÁNÍ A UPICHOVÁNÍ

MODERN CUTTING TOOLS FOR GROOVING AND CUTTING-OFF

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE — Bc. HANA AXMANOVÁ
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — prof. Ing. MIROSLAV PÍŠKA, CSc.
SUPERVISOR

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie
Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Hana Axmanová

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie a průmyslový management (2303T005)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Moderní řezné nástroje pro zapichování a upichování

v anglickém jazyce:

Modern cutting tools for grooving and cutting-off

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce se zabývá novými řeznými nástroji pro zapichování a upichování.

Cíle diplomové práce:

1. Úvod
2. Moderní trendy v konstrukci řezných nástrojů pro zapichování a upichování
3. Soudobé řezné materiály na zapichování a upichování
4. Aplikace řezných nástrojů vybraného výrobce, experimentální ověření
5. Diskuze získaných výsledků
6. Závěr, doporučení pro praxi

Seznam odborné literatury:

1. SIZOVÁ, A.; PÍŠKA, M.; FOREJT, M. On the Analysis of Modern Grooving and Parting Operations. Second Forum of Young Researches, pp.236-243, (2010), Publishing House of ISTU conference paper. 2nd Forum of Young Researchers, 21.04.2010-23.04.2010, Izhevsk, ISBN 978-5-7526-0442-3.
2. SIZOVÁ, A.; FOREJT, M.; PÍŠKA, M.: Cutting performance of nanocomposite PVD coatings for a grooving technology. 1st international student's conference, Young Technologists day 2010, pp.41-46, (2010), Technical University of Košice, 1st International student's conference, Young Technologists day 2010, 17.06.2010-19.06.2010 Prešov, ISBN 978-80-553-0439-7.
3. HUMÁR, A. Trendy vývoje materiálů pro řezné nástroje. In Sborník odborné konference Frézování III. FSI VUT v Brně, Ústav strojírenské technologie ve spolupráci s PRAMET TOOLS, s.r.o. Šumperk a ZPS - Frézovací nástroje, a.s., Zlín. Brno, 2003, ISBN 80-214-2436-2, s. 5-14.
4. SPÁČIL, J. Řezné materiály pro frézování a jejich vývoj. In Sborník odborné konference Frézování III. FSI VUT v Brně, Ústav strojírenské technologie ve spolupráci s PRAMET TOOLS, s.r.o. Šumperk a ZPS - Frézovací nástroje, a.s., Zlín. Brno, 2003, s. 15-20. ISBN 80-214-2436-2. HUMÁR, A., PÍŠKA, M. Moderní řezné nástroje a nástrojové materiály. MM Průmyslové spektrum. Speciální vydání včetně CD. 110 s. Praha, 2004, ISSN 1212-2572.
5. KOUŘIL, K.. MARŠÍČEK, R. Nástroje pro produktivní obrábění. In Sborník odborné konference Frézování III. FSI VUT v Brně, Ústav strojírenské technologie ve spolupráci s PRAMET TOOLS, s.r.o. Šumperk a ZPS - Frézovací nástroje, a.s., Zlín. Brno, 2003, ISBN 80-214-2436-2, s. 21-26.

Vedoucí diplomové práce: prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/2013.

V Brně, dne 30.10.2012

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc. Ředitel ústavu	prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c. Děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato diplomová práce je rozdělena do dvou částí. Teoretická část se zabývá moderními trendy v konstrukci řezných nástrojů pro zapichování a upichování, volbou materiálu vyměnitelných břitových destiček a druhy opotřebení nástroje a jejich klasifikací. Druhá část diplomové práce je zaměřena na výpočet objemu opotřebení řezného nástroje pro zapichování. V experimentální části bylo měřeno silové zatížení nového a opotřebovaného nástroje a naměřené hodnoty byly vyhodnoceny pomocí softwaru. Byly sestrojeny grafy silových zatížení a objemového opotřebení nástroje.

Klíčová slova

Řezné nástroje, upichování, zapichování, objemové opotřebení nástrojů, silová analýza.

ABSTRACT

The presented diploma thesis is divided into two parts. The theoretical part deals with modern catting tools for grooving and cutting-off, choice of material of catting inserts, and with types of tool wear and their classification. The second part of the thesis deals with calculation of volumetric wear of catting tool for grooving. There was measured the power load of the new and worn tool in the experimental part and the observed data were evaluated by software. The graphs of power load and volumetric wear of tool were created.

Key words

Cutting tools, parting, grooving, volumetric wear of tools, force analysis.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

AXMANOVÁ, Hana. *Moderní řezné nástroje pro zapichování a upichování.* Brno 2013. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 61 s., 2 přílohy. Vedoucí práce prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Moderní řezné nástroje pro zapichování a upichování vypracovala samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

20. 5. 2013

Datum

Bc. Hana Axmanová

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto panu prof. Ing. Miroslavu Píškovi CSc. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce.

OBSAH

ABSTRAKT 4
PROHLÁŠENÍ 5
PODĚKOVÁNÍ 6
OBSAH 7
ÚVOD 9
1 UPICHOVÁNÍ A ŘEZÁNÍ ZÁPICHŮ 10
1.1 Upichování 10
1.2 Řezání zápichů 10
1.3 Technologická charakteristika upichování a zapichování 11
1.3.1 Kinematické veličiny 11
1.3.2 Průřez třísky a jeho rozměry 12
1.3.3 Řezné síly 13
1.3.4 Výkon a práce při řezání 14
2. MODERNÍ TRENDY V KONSTRUKCI ŘEZNÝCH NÁSTROJŮ PRO ZAPICHOVÁNÍ A UPICHOVÁNÍ 13
2.1 Geometrie břitu 15
2.2 Konstrukce nožů pro zapichování a upichování 16
2.3 Způsob a provedení ostří 17
2.4 Utvařeč třísky 18
3. SOUDOBÉ ŘEZNÉ MATERIÁLY NA ZAPICHOVÁNÍ A UPICHOVÁNÍ 19
3.1 Rozdělení řezných materiálů 19
3.2 Opotřebení řezných nástrojů 23
3.2.1 Klasifikace typu opotřebení u zapichování a upichování 24
4. APLIKACE ŘEZNÝCH NÁSTROJŮ A EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ 28
4.1 Teoretický výpočet objemu opotřebení nástroje 28
4.1.1 Objemové opotřebení nástroje u ostrého břitu 29
4.1.2 Objemové opotřebení nástroje u břitu s fazetkou 31
4.1.3 Objemové opotřebení nástroje u rektifikovaného ostří 34
4.2 Experimentální část 39
4.2.1 Zkušební vzorek 39
4.2.2 Charakteristika nástroje 39
4.2.3 Obráběcí stroj 40
4.2.4 Mikroskop 42

4.2.5 Měřící zařízení 43
4.2.6 Řezné podmínky 43
4.2.7 Popis experimentu 44
4.2.8 Dosažené výsledky 44
4.2.9 Grafy silového zatížení nástroje při zapichování 46
4.2.10 Vyhodnocení výsledků 51
5. DISKUZE 55
5.1 Návrhy pokračování řešení 55
ZÁVĚR 56
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ 57
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK 60
SEZNAM PŘÍLOH 61

ÚVOD

Technologie obrábění je jednou z důležitých metod strojírenské technologie. Tato výrobní metoda je postavena na silovém působení nástroje ve tvaru klínu na obráběný materiál, kdy dochází k oddělování částic materiálu ve tvaru třísky. Obrábění se dá rozdělit na několik technologií, jako je soustružení, frézování, vrtání, obrážení, hoblování, broušení, lapování, atd.

Jednou z důležitých operací při soustružení je také upichování a řezání zápichů. Při upichování a zapichování se nástroj posouvá radiálně do středu obrobku, kde hlavní pohyb vykonává obrobek a vedlejší pohyb vykonává nástroj. Výsledný řezný pohyb má tvar Archimedovy spirály. Zapichování se využívá především k oddělování důležitých konstrukčních ploch na polotovaru, k výrobě drážek pro pojistné kroužky, podsoustružení, čelní zapichování, atd.

Každý výrobce řezných nástrojů a povlaků sleduje opotřebení a trvanlivost nástrojů a snaží se co nejvíce přiblížit dokonalému řeznému nástroji, který bude mít vysokou tvrdost i za vysoké teploty, vysokou houževnatost, pevnost v ohybu a tlaku, chemickou stabilitu, otěruvzdornost a vysokou odolnost proti deformaci a lomu. Analýzou silového zatížení řezného nástroje se získají důležité hodnoty, které vypovídají o samotném průběhu řezného procesu.

Tato diplomová práce se zabývá teoretickým rozborem objemového opotřebení řezných nástrojů a popisuje mechanismy a typy opotřebení vyměnitelných břitových destiček ze slinutého karbidu pro zapichování a upichování. V experimentální části se věnuje závislosti mezi opotřebením nástroje a silovým zatížení nástroje a výsledky jsou následně vyhodnoceny.

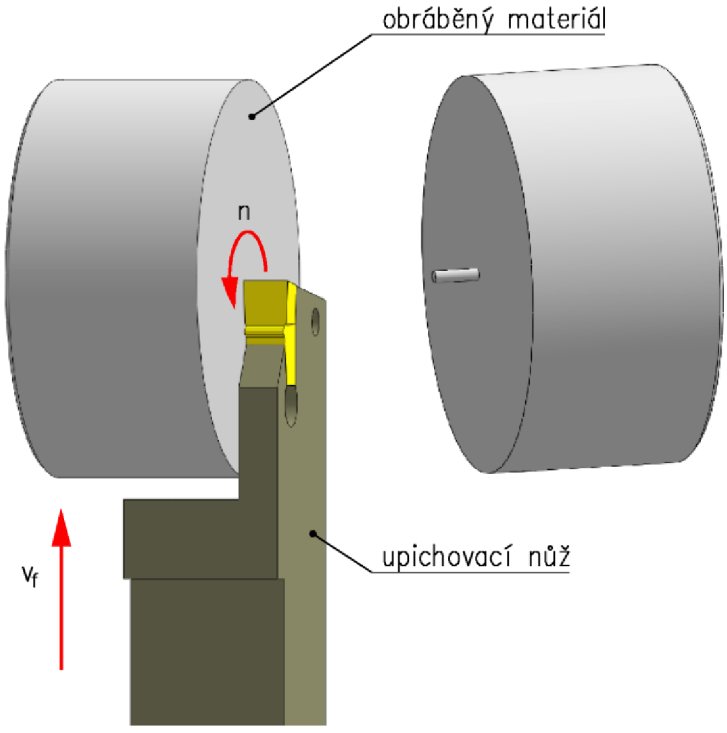
1 UPICHOVÁNÍ A ŘEZÁNÍ ZÁPICHŮ

Při upichování a zapichování se nástroj posouvá radiálně do středu obrobku, kde hlavní pohyb vykonává obrobek a vedlejší pohyb vykonává nástroj. Výsledný řezný pohyb má tvar Archimedovy spirály. V případě upichování a zapichování se jedná o ortogonální obrábění.

1.1 Upichování

Upichování je obráběcí metoda používaná k oddělení obrobku od polotovaru nebo k rozdělování materiálu na několik kusů. Provede se rovný řez do hloubky odpovídající poloměru polotovaru, až dojde k oddělení jednotlivých částí. Řezná rychlost se při upichování postupně snižuje a ve středu polotovaru má nulovou hodnotu [1]. Schéma upichování je vyobrazeno na obrázku 1.1.

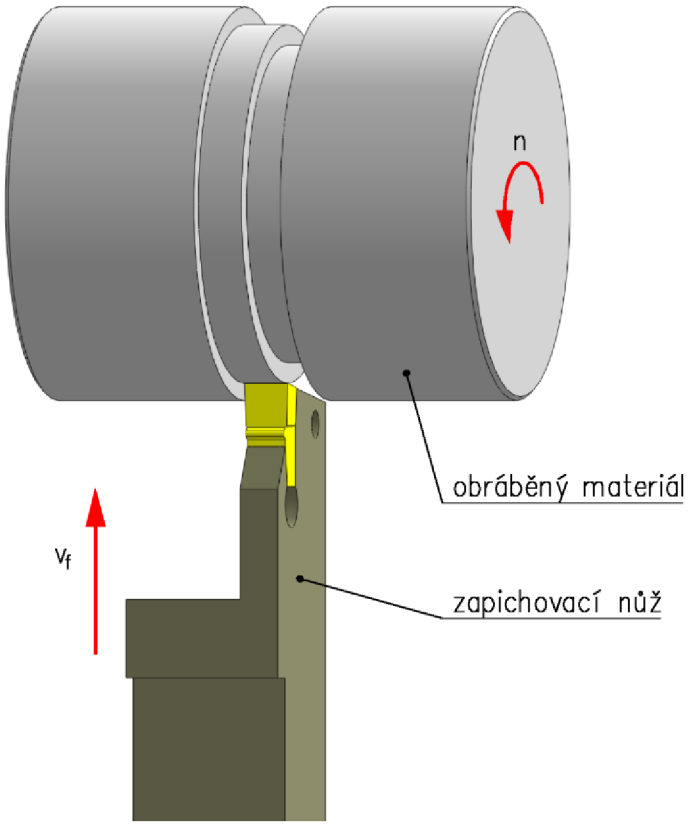
K upichování se používají velmi tenké nástroje, aby ztráta materiálu byla co nejmenší. To klade vysoké nároky na odvod třísky, protože omezený prostor při posuvu nástroje do středu limituje schopnost lámání třísky [1].



Obr. 1.1 Schéma upichování.

1.2 Řezání zápichů

Zapichování se používá k soustružení drážek různého tvaru na vnějším obvodu obrobku (vnější zapichování) nebo v dírách (vnitřní zapichování). Princip výroby zápichů je stejný jako u upichování, ale řez není tak hluboký a nevede až do středu obrobku, ale pouze do požadované hloubky. Výroba zápichů je v mnoha ohledech jednodušší než upichování, protože řez je mělčí, na druhou stranu jsou často kladeny větší nároky na přesnost, tvar a kvalitu obrobeného povrchu [1]. Schéma zapichování je znázorněno na obrázku 1.2.



Obr. 1.2 Schéma řezání zápichu.

1.3 Technologická charakteristika upichování a zapichování

Řezný proces je charakterizován celou řadou technologických veličin. K základním technologickým charakteristikám patří kinematické veličiny, průřez třísky a silové veličiny při obrábění. Dále se sleduje výkon řezání, teplo a teplota řezání a kmitání obráběcího systému [2].

1.3.1 Kinematické veličiny

Hlavní pohyb při upichování a zapichování je rotační pohyb obrobku, přičemž rychlost hlavního pohybu je současně řeznou rychlostí v_c, která je definovaná rovnicí 1.1 [2].

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \tag{1.1}$$

kde: v_c $[m.min^{-1}]$ - řezná rychlost,
π [-] - Ludolfovo číslo,
D [mm] - průměr obrobku,
n $[min^{-1}]$ - otáčky obrobku.

Vedlejší (posuvový) pohyb vykonává soustružnický nůž, který se pohybuje radiálně do středu obrobku kolmo na jeho osu [2]. Rychlost posuvového pohybu v_f je definovaná rovnicí (1.2).

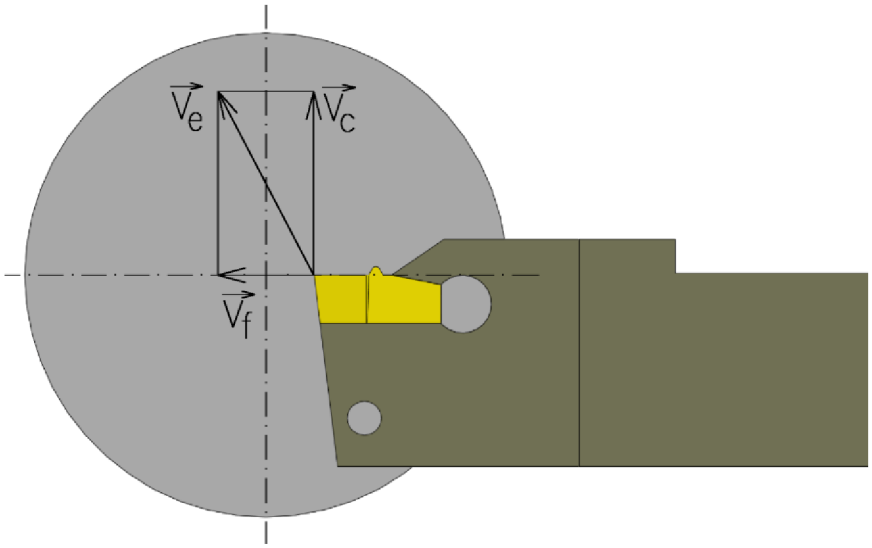
$$v_f = \frac{f \cdot n}{1000} \tag{1.2}$$

kde: v_f [m.min^{-1}] - posuvová rychlost,

f [mm] - posuv na otáčku.

Výsledný řezný pohyb je vektorovým součtem řezného a posuvového pohybu. Při obrábění upichováním a zapichováním má tvar Archimedovy spirály a je vyjádřen celkovou řeznou rychlostí v_e [2]. Směry vektorů rychlostí jsou znázorněny na obrázku 1.3.

$$v_e = \sqrt{v_c^2 + v_f^2} \tag{1.3}$$



Obr. 1.3 Směry vektorů řezné, posuvové a celkové rychlosti při zapichování a upichování.

1.3.2 Průřez třísky a jeho rozměry

Průřez třísky je určen jako vrstva obráběného materiálu, která má být odebrána působením řezného nástroje. Plocha průřezu třísky je označována jako A_D a je určena posuvem f a šířkou záběru ostří a_p podle vzorce 1.4 [2].

$$A_D = a_p \cdot f \cdot \sin\varphi \tag{1.4}$$

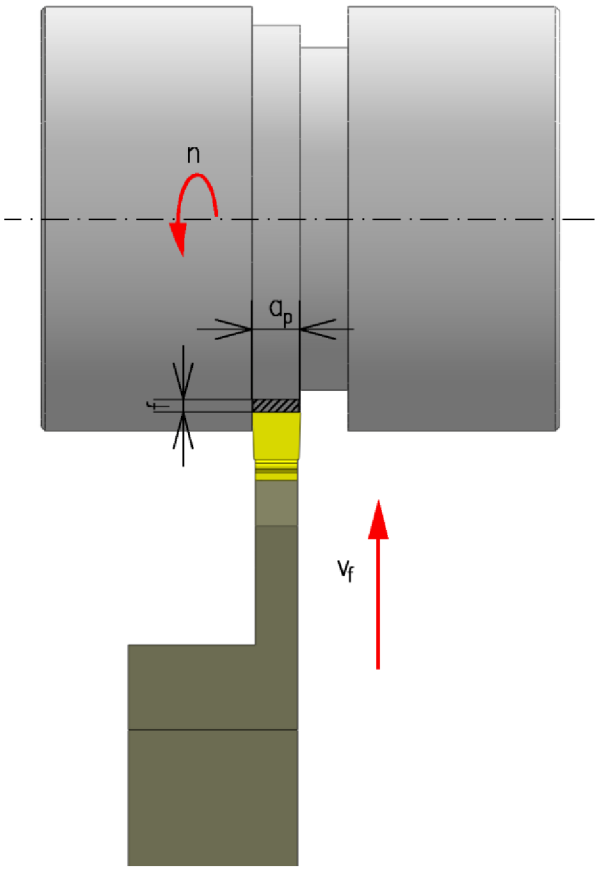
kde: A_D [mm^2] - plocha průřezu třísky,

a_p [mm] - šířka záběru hlavního ostří,

φ [°] - úhel nastavení ostří na směr hlavního pohybu.

V případě operace upichování a zapichování při úhlu nastavení hlavního ostří $\kappa_r = 0°$ bude $\varphi = 90°$ a pro výpočet se použije vztah (1.5).

$$A_D = a_p \cdot f \tag{1.5}$$



Obr. 1.4 Hlavní rozměry třísky při zapichování a upichování.

1.3.3 Řezné síly

Řezný proces se realizuje jako výsledný proces působení silové soustavy mezi obrobkem a nástrojem. Výpočet celkové řezné síly obvykle provádíme z empirických vztahů pomocí jednotlivých složek F_c, F_f a F_p nebo pomocí měrného řezného odporu a průřezu třísky [3].

a) Výpočet celkové řezné síly pomocí jednotlivých složek:

$$F = \sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2} \tag{1.6}$$

řezná síla $$F_c = C_{Fc} \cdot a_p^{x_{Fc}} \cdot f^{y_{Fc}} \tag{1.7}$$

posuvová síla $$F_f = C_{Ff} \cdot a_p^{x_{Ff}} \cdot f^{y_{Ff}} \tag{1.8}$$

pasivní síla $$F_p = C_{Fp} \cdot a_p^{x_{Fp}} \cdot f^{y_{Fp}} \tag{1.9}$$

kde: F [N] - celková řezná síla,

C_{Fc}, C_{Ff}, C_{Fp} - materiálové konstanty,

x_{Fc}, x_{Ff}, x_{Fp} - exponenty vlivu šířky záběru a_p,

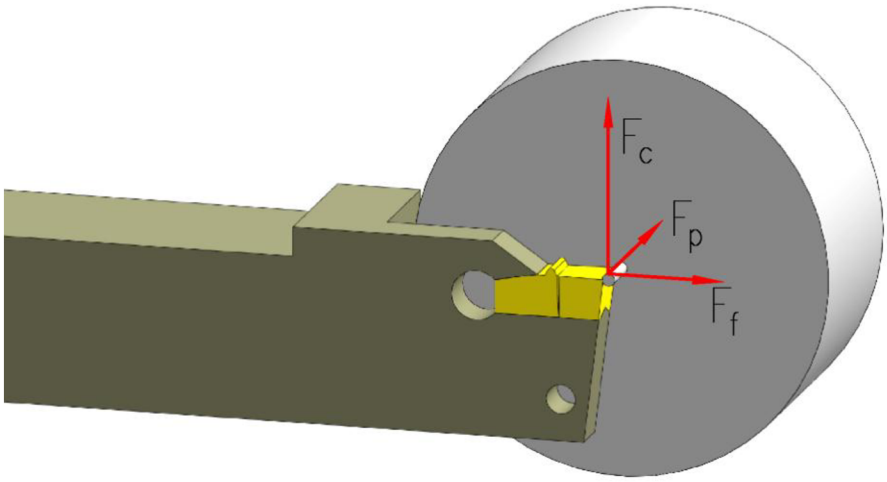
y_{Fc}, y_{Ff} a y_{Fp} - exponenty vlivu posuvu f.

b) Výpočet řezné síly pomocí měrného řezného odporu a průřezu třísky:

Měrný řezný odpor je závislý na mnoha technologických faktorech řezného procesu, jako je pevnost a tvrdost obráběného materiálu, geometrie břitu nástroje, tloušťka odřezávané vrstvy, atd. Měrný řezný odpor lze definovat jako sílu ve směru hlavního řezného pohybu vztaženou na průřez třísky o velikosti 1 mm^2 jak je uvedeno v rovnici (1.10) [3].

$$k_c = \frac{F_c}{A_D} \tag{1.10}$$

kde: k_c [MPa] - měrný řezný odpor (síla).



Obr. 1.5 Rozložení složek celkové řezné síly při upichování a upichování.

1.3.4 Výkon a práce při řezání

Řezný výkon je určen součinem řezné síly F_c a řezné rychlosti v_c podle vzorce 1.11.

$$P_c = \frac{F_c \cdot v_c}{6 \cdot 10^7} \tag{1.11}$$

kde: P_c [kW] - řezný výkon

Práce řezného procesu zahrnuje práci potřebnou k překonání tření třísky po čele nástroje, tření hřbetu nástroje po obrobené ploše, práci plastických a elastických deformací v oblasti tvoření třísky a práci potřebnou k vytvoření nových povrchů. Práce řezného procesu E_e je určena součtem práce řezání E_c a práce posuvu E_f [3].

$$E_e = E_c + E_f \tag{1.12}$$

práce řezání $$E_c = F_c \cdot v_c \cdot t \tag{1.13}$$

práce posuvu $$E_f = F_f \cdot v_f \cdot t \tag{1.14}$$

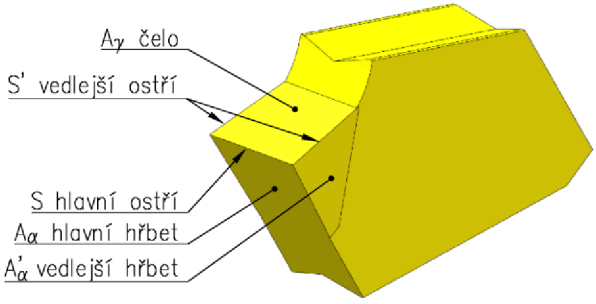
kde: t [s] - čas řezného procesu.

2. MODERNÍ TRENDY V KONSTRUKCI ŘEZNÝCH NÁSTROJŮ PRO ZAPICHOVÁNÍ A UPICHOVÁNÍ

Proces upichování a zapichování se dá přirovnat k čelnímu soustružení, kde je nástroj posouván radiálně do středu, ale rozdíl je ve tvaru nože, který je velmi tenký a vytváří úzký zápich [1].

2.1 Geometrie břitu

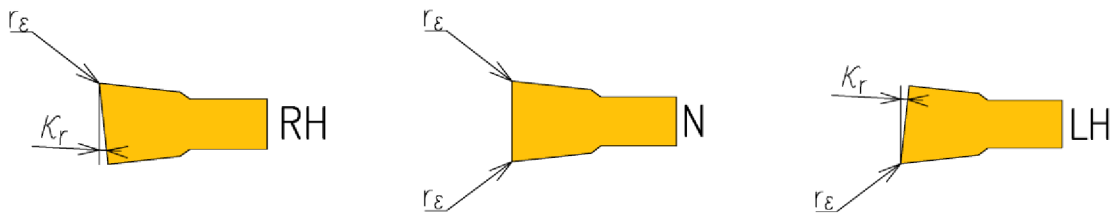
Při správné volbě geometrie řezného nástroje lze výrazně ovlivnit jeho trvanlivost, pevnost břitu, stabilitu procesu řezání, silové i tepelné zatížení nástroje a spotřebu vynaložené energie. Geometrie nástroje je definovaná plochami a úhly, které mají svou funkci [4]. Hlavní plochy a ostří řezného nástroje pro zapichování a upichování jsou znázorněny na obrázku 2.1:



Obr. 2.1 Základní plochy a ostří u VBD pro zapichování a upichování.

Aγ	čelo	plocha řezné části nástroje, po které odchází tříska,
Aα	hlavní hřbet	plocha přikloněná k obráběné ploše obrobku,
A'α	vedlejší hřbet	plocha přikloněná k obrobené ploše obrobku,
S	hlavní ostří	řezná hrana, určující šířku třísky,
S‘	vedlejší ostří	řezná hrana určená k dokončovací operaci na řezné ploše.

U břitových destiček pro zapichování a upichování existují tři typy nastavení hlavního ostří – neutrální N, pravořezné RH a levořezné LH. Neutrální destičky mají úhel nastavení hlavního ostří 0° a pravořezné nebo levořezné destičky mají úhel nastavení několik málo stupňů. Při operaci upichování se velmi často používají pravořezné nebo levořezné vyměnitelné břitové destičky, aby nedocházelo k vytvoření výstupku na obrobku, který vzniká při použití neutrální VBD [1].



Obr. 2.2 Typy nastavení hlavního ostří a) pravořezná b) neutrální, c) levořezná VBD [1].

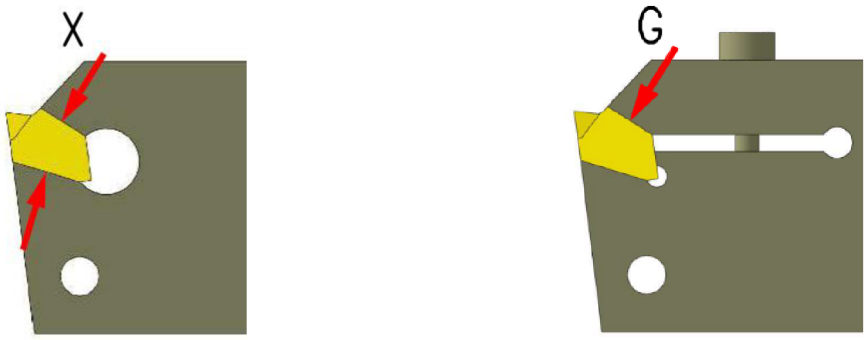
2.2 Konstrukce nožů pro zapichování a upichování

Z konstrukčního hlediska můžeme nože pro zapichování a upichování rozdělit na celistvé, nože s pájenými břitovými destičkami a nože s vyměnitelnými břitovými destičkami.

- celistvé: Řezná část nože i jeho těleso jsou z řezného materiálu
- S pájenými břitovými destičkami: na těleso z konstrukční oceli se tvrdou pájkou pájí břitová destička z řezného materiálu
- S vyměnitelnými břitovými destičkami: Vyměnitelné břitové destičky (VBD) z řezného materiálu jsou mechanicky upínány do tělesa nože z konstrukční oceli. Podle způsobu obrábění se nože dělí na vnitřní a vnější.
- Vnitřní nože: pro obrábění vnitřních ploch (otvorů)
- Vnější nože: pro obrábění vnějších ploch

Při operacích upichování a zapichování je materiál obrobku po obou stranách řezného nástroje, a proto musí být břit úzký, aby nedocházelo k velkým ztrátám obráběného materiálu. To klade značné nároky na výkon, stabilitu upichovacího nástroje a tvorbu třísek. Nůž by měl být proto vyložen co nejméně, aby se negativní vlivy eliminovaly [4].

Břitové destičky jsou uloženy v držáku tak, aby řezné odpory směřovaly do stěn pro ně vytvořených a nezatěžovaly upínací mechanizmus. V současné době existují dva způsoby uchycení břitových destiček pro zapichování a upichování v držáku. První způsob je pomocí planžety s pružinovým upínáním, které se značí X a druhý způsob je pomocí šroubu, s označením G [5]. Oba způsoby upnutí jsou vyobrazeny na obr. 2.3.



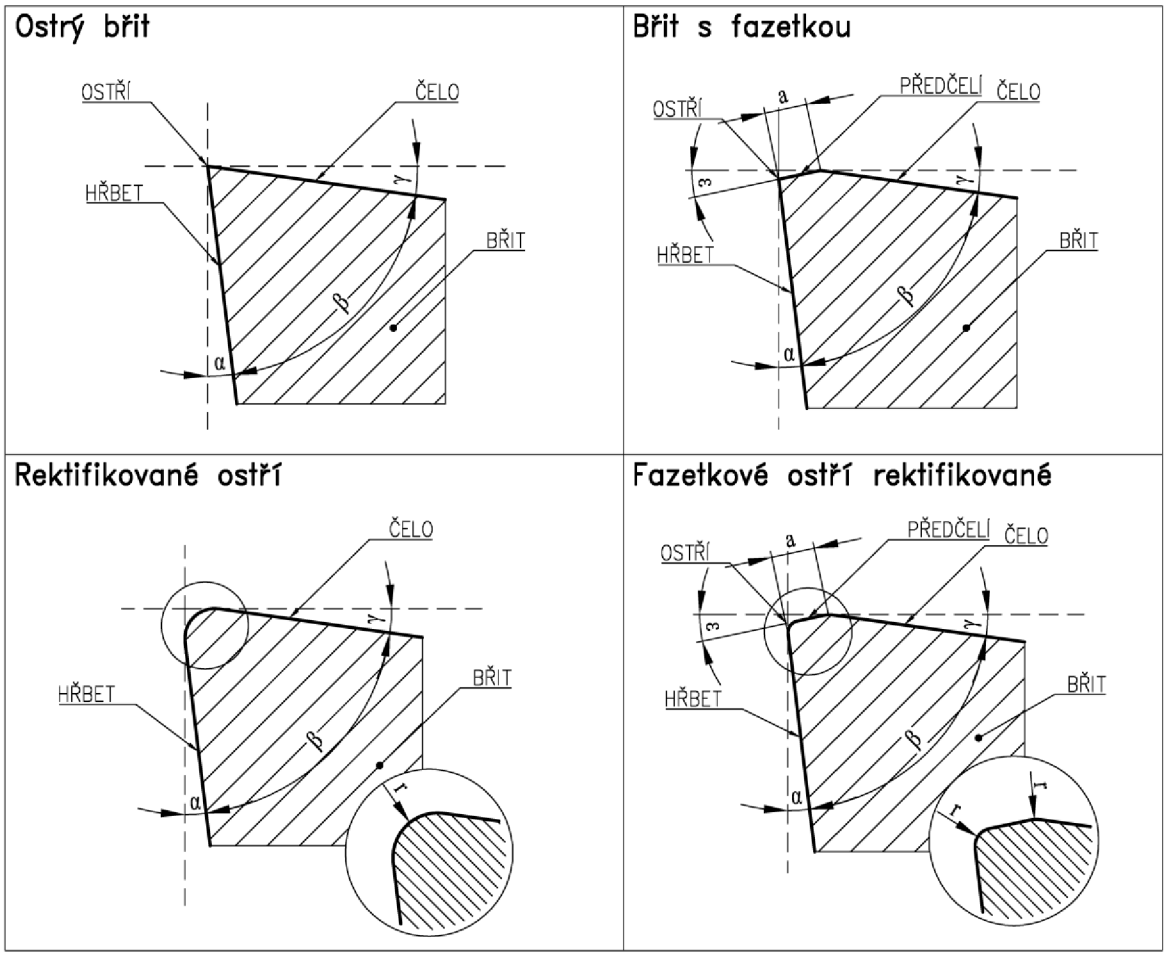
a) b)

Obr. 2.3 Typy upnutí VBD v držáku a) ISO X, b) ISO G.

Poloha vyměnitelné břitové destičky v držáku nástroje je zajištěna tvarem břitové destičky, kdy se u menších destiček používá upnutí V-žlábkem, a destičky s většími rozměry jsou upnuty pomocí kolejničky, která zajistí jejich stabilitu [1].

2.3 Způsob a provedení ostří

Úprava ostří řezného nástroje výrazně ovlivňuje jeho funkční vlastnosti a odpovídá specifickým požadavkům kladeným na břit. Způsoby úpravy ostří jsou znázorněny na obrázku 2.4 [5].



Obr. 2.4 Způsoby úprav ostří řezného nástroje [5]

U ostrého břitu se dosahuje minimální deformace odřezávané vrstvy, snižuje se velikost řezných sil a omezuje se vznik nárůstku. Pevnost ostří je v porovnání s ostatními úpravami řezné hrany menší. Ostrý břit se využívá především při obrábění slitin Al [5].

Břit s fazetkou zvětšuje pevnost ostří a odolnost proti mechanickému opotřebení, protože zvětšuje v bezprostřední blízkosti úhel břitu. Odolnost proti křehkému porušení nebo lomu celého břitu roste [5].

Rektifikací ostří se snižují mikronerovnosti řezné hrany. Jedná se o zaoblení pod velmi malým poloměrem. Díky této úpravě ostří se dosahuje zvýšené odolnosti proti mechanickému porušení řezné hrany. Rektifikace ostří se využívá pro obrábění takřka všech druhů materiálů [5].

Rektifikovaný břit s fazetkou se vyznačuje vysokou odolností břitu proti mechanickému porušení v nejvyšší míře. Tyto vlastnosti má břit díky rektifikaci zesíleného ostří fazetkou [5].

2.4 Utvařeč třísky

Při upichování je kritickým faktorem odvod třísek, kdy omezený prostor při posuvu nástroje do středu obrobku limituje schopnost lámání třísky. Na čele destiček jsou obvykle vytvořené předlisované utvařeče třísky, jejichž geometrie musí být zaměřena hlavně na vytvoření třísky, kterou lze hladce odvést. V opačném případě se třísky hromadí v okolí nástroje, což vede k poškození povrchu obrobku a k zasekávání třísek s následným zlomením nástroje [1].

Každá firma, která vyrábí vyměnitelné břitové destičky má vlastní geometrii a tvar utvařečů třísky. Například firma Pramet Tools vyrábí VBD se třemi typy utvařečů, které jsou na obrázku 2.5.

a) b) c)

Obr. 2.5 Typy utvařečů třísky firmy Pramet Tools a) utvařeč F, b) utvařeč M, c) utvařeč MP [6].

3. SOUDOBÉ ŘEZNÉ MATERIÁLY NA ZAPICHOVÁNÍ A UPICHOVÁNÍ

Průběh a výsledky řezného procesu závisí především na vlastnostech řezné části nástroje, která je vyrobena z příslušného nástrojového materiálu. Dnešní řezné nástroje jsou vyráběny z různých materiálů a to od nástrojových ocelí přes slinuté karbidy, cermety, řeznou keramiku až po supertvrdé materiály. Nejvíce využívané řezné nástroje, pro upichování a zapichování, jsou vyměnitelné břitové destičky ze slinutého karbidu (povlakované i nepovlakované), polykrystalického kubického nitridu bóru a polykrystalického diamantu [7].

3.1 Rozdělení řezných materiálů

Rychlořezné oceli

Rychlořezné oceli (RO) se vyznačují vysokou houževnatostí, ale ve srovnání s ostatními řeznými materiály je jejich tvrdost poměrně nízká. Proto se z rychlořezné oceli vyrábí nástroje pro obrábění nízkými řeznými rychlostmi a také tvarově složité nástroje, které nemohou být vyrobeny z ostatních řezných materiálů. V budoucnu se budou prosazovat rychlořezné oceli vyrobené práškovou metalurgií. Tato metoda umožňuje vytvářet velmi homogenní strukturu a vývoj nestandardních chemických variant [4].

Slinuté karbidy

Slinuté karbidy (SK) jsou produktem práškové metalurgie a vyrábí se z různých karbidů (karbid wolframu WC, titanu TiC, tantalu TaC, niobu NbC, atd.) a kovového pojiva (nejčastěji kobalt Co). Podstatou výroby slinutých karbidů je lisování prášku tvrdých karbidických částic s práškem pojícího kovu a následné slinování při teplotě, která se blíží teplotě tavení pojiva. Takto vyrobené břitové destičky mají vysokou tvrdost a vynikají poměrně vysokou pevností [7]. Slinuté karbidy mohou být použity pro obrábění vysokými posuvovými rychlostmi a pro těžké přerušované řezy. V důsledku své nízké termochemické stability nemohou být SK použity pro vysoké řezné rychlosti [4].

V dnešní době reprezentují slinuté karbidy 80-90% veškerých břitových destiček používaných pro obráběcí nástroje. Jejich úspěch, jakožto nástrojového materiálu, je dán jejich unikátní kombinací odolnosti proti opotřebení a houževnatosti, ale také jejich schopností nechat se formovat do složitých tvarů [9].

Podle normy ISO 513 : 2002 se řezné materiály dělí do šesti hlavních aplikačních skupin a každá se dále dělí na aplikační skupiny. Hlavní aplikační skupiny se dělí podle materiálů, které se jimi obrábí a značí se barvou a velkým písmenem (P, M, K, N, S a H). Každá aplikační skupina se potom označuje písmenem hlavní skupiny a klasifikačním číslem, které vyjadřuje obsah pojícího kovu [7].

Skupina **K** (červená) je určena pro obrábění materiálů, které vytvářejí krátkou, drobivou třísku (šedé litiny, neželezné slitiny a nekovové materiály). Jedinou tvrdou strukturní složkou této skupiny slinutých karbidů je karbid wolframu, který má za pokojové teploty podobnou tvrdost jako většina ostatních karbidů, s rostoucí teplotou ale její hodnota klesá rychleji než u jiných karbidů. Proto jsou slinuté karbidy této skupiny nevhodné pro obrábění materiálů tvořících dlouhou třísku. Řezné síly jsou relativně nízké a převládá abrazivní a adhezní opotřebení [7].

Skupina **P** (modrá) je určena pro obrábění materiálů, které tvoří dlouhou třísku (uhlíkové oceli, slitinové oceli a feritické korozivzdorné oceli). Karbid titanu zaručuje vysokou odolnost proti difúzi za vysokých teplot, která je jednou z hlavních příčin vytváření výmolu na čele nástroje. Slinuté karbidy skupiny P jsou vhodné k obrábění materiálů tvořících dlouhou třísku také díky tomu, že karbid titanu se vyznačuje vyšší tvrdostí za vyšších teplot než karbid wolframu. Nevýhodnou vlastnosti karbidu titanu je vyšší křehkost a nižší odolnost proti abrazi ve srovnání s karbidem wolframu. Řezné síly jsou obvykle velké a převládá opotřebení na čele [7].

Skupina **M** (žlutá) má univerzální použití a je určena k obrábění materiálů, které tvoří dlouhou a střední třísku (lité oceli, austenitické korozivzdorné oceli a tvárné litiny). Díky relativně vysoké houževnatosti se slinuté karbidy této skupiny často používají pro těžké hrubovací a přerušované řezy. Řezné síly dosahují středních až vysokých hodnot a dochází k vydrolování ostří [7].

Skupina **N** (zelená) je určena k obrábění materiálů z neželezných kovů a neželezných slitina na bázi hliníku, hořčíku a mědi, k obrábění plastů, kompozitů a dřeva.

Skupina **S** (hnědá) se používá na obrábění tepelně odolných slitin na bázi železa, niklu a kobaltu, titanu a titanových těžce obrobitelných slitin [7].

Skupina **H** (šedá) je určena k obrábění zušlechtěných a kalených ocelí a k obrábění tvrzených a kalených litin [7].

Tab. 3.1 Rozdělení SK podle obráběného materiálu [8].

P	uhlíkové (nelegované) oceli třídy 10, 11, 12 legované oceli tříd 13, 14, 15, 16 nástrojové oceli uhlíkové (191..., 192..., 193...) nástrojové legované oceli (193… až 198...) uhlíková ocelolitina skupiny 26 (4226...) nízko a středně legované ocelolitiny skupiny 27 (4227...) feritické a martenzitické korozivzdorné oceli (třídy 17..., lité 4229...)
M	austenitické a feriticko austenitické oceli korozivzdorné, žáruvzdorné a žárupevné oceli nemagnetické a otěruvzdorné
K	šedá litina nelegovaná i legovaná (4224...) tvárná litina (4223...) temperovaná litina (4225...)
N	neželezné kovy, slitiny Al a Cu
S	speciální žárupevné slitiny na bázi Ni, Co, Fe a Ti
H	zušlechtěné oceli s pevností nad 1500 MPa kalené oceli HRC 48 ÷ 60 tvrzené kokilové litiny HS h 55 ÷ 85

Poměrně novým prvkem v oblasti práškové metalurgie jsou strukturně gradientní materiály. Struktura takového materiálu se v objemu výsledného výrobku mění podle toho, jaké konečné vlastnosti jsou pro danou část destičky rozhodující [10]. Gradientní struktura slinutého karbidu obsahuje tři základní oblasti. Vnější povrchová vrstva má zvýšený podíl pojiva a minimální podíl kubických karbidů. Pod ní leží druhá vrstva se sníženým obsahem pojiva a bohacená o kubické karbidy. Třetí oblast, označovaná jako jádro, je tvořena základním substrátem, který má předem definovaný obsah jednotlivých fází [7].

Mezi nejdůležitější vývojové stupně slinutých karbidů se řadí povlakované vyměnitelné břitové destičky, kdy se na destičku nanese tenká vrstva materiálu s vysokou tvrdostí a vynikající odolností proti opotřebení. Díky těmto povlakům je řezný nástroj na povrchu tvrdý a zároveň si zachová houževnaté jádro. Cílem povlaků je především snížit součinitel tření, zamezení vzniku nárůstků, ulpívání třísek na čele a tím prodloužit životnost nástroje [7]. Metody povlakování se dělí do dvou základních skupin.

- Metoda PVD
  Metoda fyzikálního napařování (PVD - Physical Vapur Deposition) je výhodná především v tom, že tepelně neovlivňuje materiál nástroje, protože probíhá za nízkých pracovních teplot (pod 500 °C) a lze s ní povlakovat ostré hrany [7].
- Metoda CVD
  Metoda chemického napařování (CVD – Chemical Vapour Deposition) probíhá za vysokých teplot (1000 – 1200 °C) a její výhoda spočívá ve vysoké hustotě povlaku a vysoké adhezi povlaku k podkladovému materiálu [7].

V současné době se stále častěji využívají různé modifikace CVD metody, ke kterým patří např. CVD za středních teplot (MTCVD), plazmatická CVD (PCVD) nebo mikrovlnná plazmatická CVD (MWPCVD) [7].

Cermety

Cermety jsou řezné materiály, u kterých je karbid wolframu nahrazen převážně karbidem titanu, nitridem titanu nebo karbonitridem titanu s niklovým nebo niklo-kobaltovým pojivem. Charakteristikou vlastností cermetů je jejich nízká měrná hmotnost. Vynikají vysokou odolností proti difúznímu oxidačnímu opotřebení, mají vysokou chemickou stabilitu a za tepla si udržují vysokou tvrdost. Jejich hlavní nevýhodou je nízká houževnatost, která je sice neustále zvyšována, ale stále nedosahuje hodnot obvyklých u slinutého karbidu. Cermety jsou vhodnými materiály pro dokončovací obrábění vysokými řeznými rychlostmi a nízkými průřezy třísky [3].

Řezná keramika

K základním vlastnostem keramických materiálů patří především nízká měrná hmotnost, malý rozměr zrna, vysoká tvrdost a nízká houževnatost. Keramické matriály, které se využívají pro výrobu vyměnitelných břitových destiček řezných nástrojů, se dělí do dvou základních skupin.

Oxidová keramika je na bázi oxidu hlinitého Al_2O_3. Řezná oxidová keramika se užívá pro obrábění vysokou řeznou rychlostí a nízkou posuvovou rychlostí, protože má vysokou tvrdost za tepla a vysokou termochemickou stabilitu, ale nízkou houževnatost [7]. Keramika v této skupině se dále podle svého složení dělí na:

- čistá keramika Al_2O_3
- polosměsná $Al_2O_3+ZrO_2$, $Al_2O_3+ZrO_2+CoO$

- směsná Al_2O_3+TiC, Al_2O_3+ZrO_2+TiC, Al_2O_3+TiC+TiN.

Nitridová keramika je na bázi nitridu křemíku Si_3N_4. (Si_3N_4, Si_3N_4+Y_2O_3, Si_3N_4+TiN, sialony). Tato keramika se vyznačuje vyšší houževnatostí a vydrží vyšší posuvovou rychlost než keramika na bázi Al_2O_3, ale její užití je omezeno na obrábění šedé litiny, protože při obrábění ocelí a tvárné litiny vykazuje rychlé opotřebení [7].

Prakticky všechny druhy keramiky pro řezné nástroje lze v současné době vyrábět s vyztužujícími vlákny (whiskery SiC, Si_3N_4) nebo s otěruvzdornými CVD nebo PVD povlaky [7].

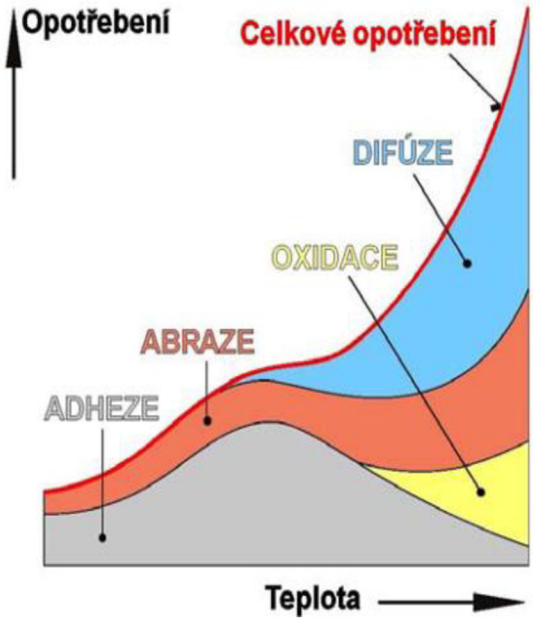
Supertvrdé řezné materiály

Moderní nástroje pro obrábění se také vyrábí ze supertvrdých řezných materiálů. Do této skupiny se řadí technické polykrystalické materiály na bázi kubického nitridu bóru (PKNB) a na bázi diamantu (PKD). Tyto materiály se vyznačují především vysokou tvrdostí a otěruvzdorností. Polykrystalický diamant se používá pro obrábění vláknově vyztužených kompozitů a zejména hliníkových slitin. Protože diamant je uhlík v kubické modifikaci, nesmí se pro svoji vysokou afinitu k železu používat pro obrábění ocelí ani litin. Kubický nitrid bóru se vyznačuje vyšší stabilitou při vysoké teplotě než diamant a obecně se používá pro obrábění tvrdých kalených materiálů [4].

3.2 Opotřebení řezných nástrojů

V důsledku řezného procesu dochází ke kontaktu nástroje s obrobkem a odcházející třískou, což musí nutně vést k opotřebení nástroje. Proces opotřebení nástroje je velmi složitý děj, který závisí zejména na fyzikálních a mechanických vlastnostech obráběného a nástrojového materiálu, druhu obráběcí operace, geometrii nástroje, pracovních podmínkách, řezném prostředí, atd. K základním mechanizmům opotřebení patří zejména abraze, adheze, difúze, oxidace, plastická deformace a křehký lom [4].

- abraze Vlivem tvrdých mikročástic, které jsou součástí obráběného materiálu a řezného nástroje dochází k brusnému otěru a k opotřebení nástroje [4].
- adheze V důsledku vysokých teplot a tlaků, chemické příbuznosti materiálů a kovově čistých styčných ploch dochází na stýkajících se vrcholcích nerovností čela nástroje a třísky ke vzniku a následnému porušování mikrosvarových spojů [4].
- difúze Vlivem migrace atomů z obráběného do nástrojového materiálu a naopak dochází k tvorbě nežádoucích chemických sloučenin ve struktuře nástroje [4].
- oxidace V důsledku přítomnosti kyslíku v okolním prostředí dochází ke vzniku chemických sloučenin na povrchu nástroje, které mají vliv na jeho opotřebení [4].
- plastická deformace V důsledku vysokého tepelného a mechanického zatížení v čase vzniká plastická deformace, která se může ve svém nejnepříznivějším důsledku projevit ve formě tzv. lavinového opotřebení [4].
- křehký lom Vlivem vysokého mechanického zatížení, nehomogenity a vměstkům v obráběném materiálu může dojít až ke křehkému lomu, které téměř vždy znamená okamžité ukončení činnosti řezného nástroje [4].



Obr. 3.1 Vliv teploty na jednotlivé typy opotřebení [4].

Obr. 3.2 Vliv řezných podmínek na opotřebení [4].

3.2.1 Klasifikace typu opotřebení u zapichování a upichování

Pro dosažení co nejvyšší hospodárnosti z hlediska životnosti nástroje, kvality obrobku a optimalizace řezných parametrů je důležité pečlivě sledovat stav břitu. Při malých řezných rychlostech jsou hlavními problémy tvorba nárůstku a vylamování břitu. Při vysokých rychlostech jsou nejvýznamnějšími problémy plastická deformace, opotřebení hřbetu nástroje a opotřebení ve tvaru žlábku [11].

Opotřebení na hřbetu nástroje

Opotřebení hřbetu je jedním z hlavních kritérií charakterizujících trvanlivost řezného nástroje. Patří mezi abrazivní formy opotřebení a projevuje se na hřbetní ploše břitu. Příliš velké opotřebení hřbetu má za následek zhoršení jakosti obrobeného povrchu, nepřesnost rozměrů a narůstání tření, které vzniká změnou geometrie břitu [2].

Obr. 3.3 Opotřebení hřbetu u VBD pro zapichování [11].

Opatření: snížit řeznou rychlost,

zvýšit posuv (v případě, že posuv je menší než 0,1 mm),

použít jinou třídu slinutého karbidu s vyšší odolností proti opotřebení,

zvýšit množství přiváděné procesní kapaliny [8, 11].

Opotřebení ve tvaru žlábku

Opotřebení ve tvaru žlábku na čele vzniká vlivem působení difúzního opotřebení a abraze. Žlábek vzniká částečně úběrem řezného materiálu nástroje vyvolaného brousicím pochodem, který vzniká působením tvrdých částic obsažených v materiálu, ale zejména difúzí v místě břitu s nejvyšší teplotou (kontaktní místo mezi třískou a materiálem břitu). Výmol na čele je typ opotřebeni, které se nejvýrazněji projevuje u řezných nástrojů s rovným čelem, jeho výskyt není však omezen pouze na tento typ destiček. Při obrábění měkkých materiálů vzniká výmol širší a mělčí, u tvrdých materiálů naopak výmol úzký a hluboký [2].

Obr. 3.4 Opotřebení ve tvaru žlábku u VBD pro zapichování [11].

Opatření: snížit řeznou rychlost,
snížit rychlost posuvu,
použít jinou třídu slinutého karbidu s vyšší odolností proti opotřebení,
použít povlakovaný typ řezného nástroje,
použít jiný (pozitivnější) typ řezné geometrie,
zvýšit množství přiváděné procesní kapaliny[8, 11].

Vydrolení ostří

Vydrolení ostří je formou opotřebení, při níž se břit vydroluje místo stejnoměrného opotřebení. Toto opotřebení je způsobeno špičkami zatížení a vede k tomu, že se drobné částice materiálu řezného nástrojového začnou oddělovat z povrchu břitu. Nejčastější příčinou tohoto typu opotřebení je obrábění přerušovaným řezem. Dalšími faktory způsobující tento typ opotřebení mohou být nevhodná volba řezného materiálu, nevhodná volba ostří nebo příliš vysoké hodnoty řezných parametrů [2].

Obr. 3.5 Vydrolené ostří u VBD pro zapichování [11].

Opatření: použít jinou třídu slinutého karbidu (měkčí typ),
použít jiný typ řezné geometrie, která je vhodná pro vyšší rychlosti,
zmenšit vyložení nástroje,
zkontrolovat nastavení břitu do osy hrotů,
snížit řeznou rychlost,
snížit rychlost posuvu [8, 11].

Plastická deformace břitu

Plastická deformace břitu vzniká působením kombinace vysokých teplot a řezných tlaků na břit. U řezného materiálu nástroje, který těmto zatížením odolává a plasticky se nedeformuje, je tvrdost za tepla rozhodujícím faktorem. Typická plastická deformace břitu ještě více zvyšuje teploty a má za následek změnu geometrie břitu, změny v odchodu třísek a může velmi rychle dosáhnout kritického stádia [2].

Obr. 3.6 Plastická deformace břitu u VBD pro zapichování [11].

Opatření: snížit řeznou rychlost,

snížit posuv,

použít jinou třídu slinutého karbidu s vyšší odolností proti opotřebení,

použít nástroj s větším poloměrem zaoblení špičky,

použít nástroj s větším úhlem špičky,

zvýšit množství přiváděné procesní kapaliny [8, 11].

Opotřebení ve tvaru vrubu

Opotřebení ve tvaru vrubu na hřbetě břitu patří k typickým adhezním opotřebením. Může však stejně dobře souviset s jevem oxidačního opotřebení. Vruby vznikají v místě kontaktu břitu s bokem třísky. Toto opotřebení se omezuje přesně na to místo, kudy proniká vzduch do oblasti obrábění [2].

Opotřebení ve tvaru vrubu na vedlejším hřbetu břitu má mechanické příčiny. Jejich původcem jsou tvrdé částice materiálu obrobku. Mimořádně velké opotřebení ve tvaru vrubu ovlivňuje utváření třísky a může vést k lomu destičky. Tento typ opotřebení se vyskytuje zejména u nerezavějících austenitických ocelí [2].

Obr. 3.7 Vrubové opotřebení u VBD pro zapichování [11].

Opatření: použít povlakovaný typ slinutého karbidu,

Zvolit nástroj s menším úhlem nastavení,

Nerovnoměrně rozdělit třísku

Snížit řeznou rychlost

Použít různé hloubky řezu (šikmé zahlubování) [8, 11].

Tvorba nárůstku na břitu

Tvorba nárůstku je v převážné většině případů fenoménem, vztahující se k teplotám a řezným rychlostem. Může však být způsobena i odlupováním vrstev v místě břitu nebo jinými formami opotřebení. Toto opotřebení způsobuje nežádoucí změnu geometrie břitu, ale je tu i riziko odlomení částic materiálu. Afinita břitu k materiálu hraje v tomto případě rozhodující roli. Nízké teploty a vysoké tlaky vyvolávají mezi materiálem třísky a čelem nástroje efekt svařování [4].

Velká část moderních způsobů obrábění probíhá nad oblastí tvorby nárůstků a mnohé moderní řezné materiály nemají při správném použití k této formě opotřebení sklony. Negativním důsledkem tvorby nárůstku je především zhoršená jakost obrobeného povrchu. Nadměrná tvorba nárůstků může vést až k lomu břitové destičky [11].

Obr. 3.8 Nárůstek na břitu u VBD pro zapichování [11].

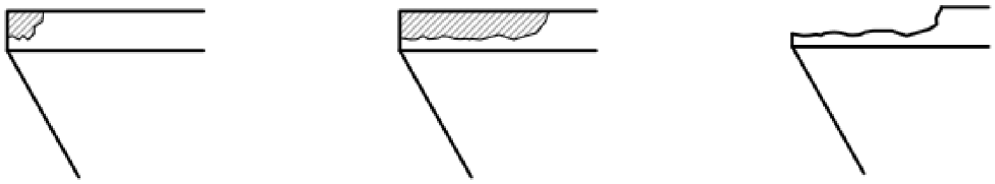
Opatření: zvýšit řeznou rychlost,
zvýšit posuv,
aplikovat povlakované typy slinutých karbidů,
použít geometrii s ostřejším břitem,
použít řeznou kapalinu s vyšším protinárůstkovým účinkem [8, 11].

4. APLIKACE ŘEZNÝCH NÁSTROJŮ A EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ

Byl proveden jeden experiment, kde se sledovala hloubka opotřebení nástroje na hřbetě a z naměřených hodnot se vypočítal objem opotřebení nástroje **V** a opotřebení na hřbetě **VB**. Během experimentu bylo měřeno silové zatížené nového a opotřebovaného nástroje. Z naměřených hodnot byla vypočítána celková řezná síla a výsledky experimentu byly vyneseny do grafu.

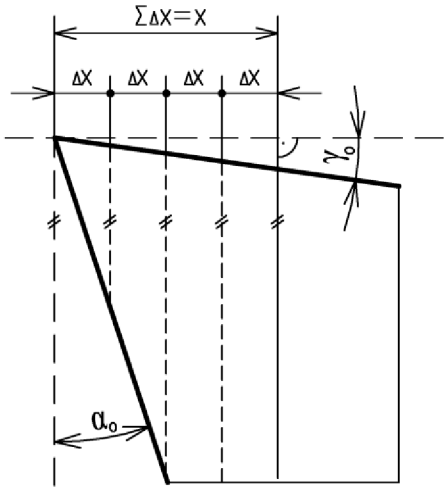
4.1 Teoretický výpočet objemu opotřebení nástroje

Opotřebení nástroje se měří v jednom směru, nejčastěji jako opotřebení na hřbetě VB nebo výmol na čele KT, nicméně se jedná o třírozměrný jev. Příklad rozporuplné kvantifikace opotřebení nástroje je schematicky vyobrazen na obrázku 4.1, kde je vidět nestejné opotřebení na hřbetě nástroje 4.1 a) a 4.1 b) a také na obrázku 4.1 c), kde je materiál nástroje úplně pryč a přesto rozměr fazetky na hřbetě VB je stejný.[12].



Obr. 4.1 Různé stupně opotřebení břitové destičky se stejnou hodnotou VB [12].

Při obrábění se využívají VBD s různými způsoby provedení ostří, které byly popsány v kapitole 2.3. Jedná se o ostrý břit, břit s fazetkou, rektifikované ostří a rektifikované ostří s fazetkou. Pro první tři tvary ostří byly odvozeny vzorce pro výpočet objemového opotřebení nástroje a pro výpočet opotřebení na hřbetě VB v závislosti na hloubce opotřebení na hřbetě x. Hloubka opotřebení na hřbetě x byla zvolena od 0 do 0,1 mm (Δx = 0,001 mm) a způsob opotřebení je znázorněn na obrázku 4.2. Vypočítané hodnoty byly vyneseny do grafů a vzájemně porovnány. Veškeré kalkulace byly provedeny pomocí programu Microsoft Excel.



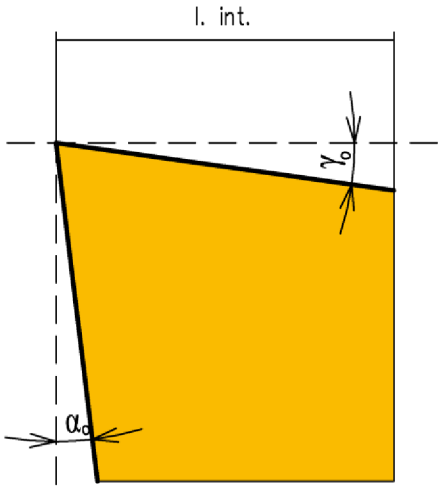
Obr. 4.2 Řezný klín se znázorněným postupem opotřebení.

4.1.1 Objemové opotřebení nástroje u ostrého břitu

Pro výpočet objemu opotřebení nástroje s ostrým břitem byly využity goniometriské funkce. Výpočet je proveden v rámci jednoho intervalu a krok opotřebení $\Delta x = 0{,}001$ mm.

I. interval: $x \in \langle 0; 0{,}1 \rangle$

$\alpha_o = 7°$
$\gamma_o = 8°$



Obr. 4.3 Řezný klín s ostrým břitem.

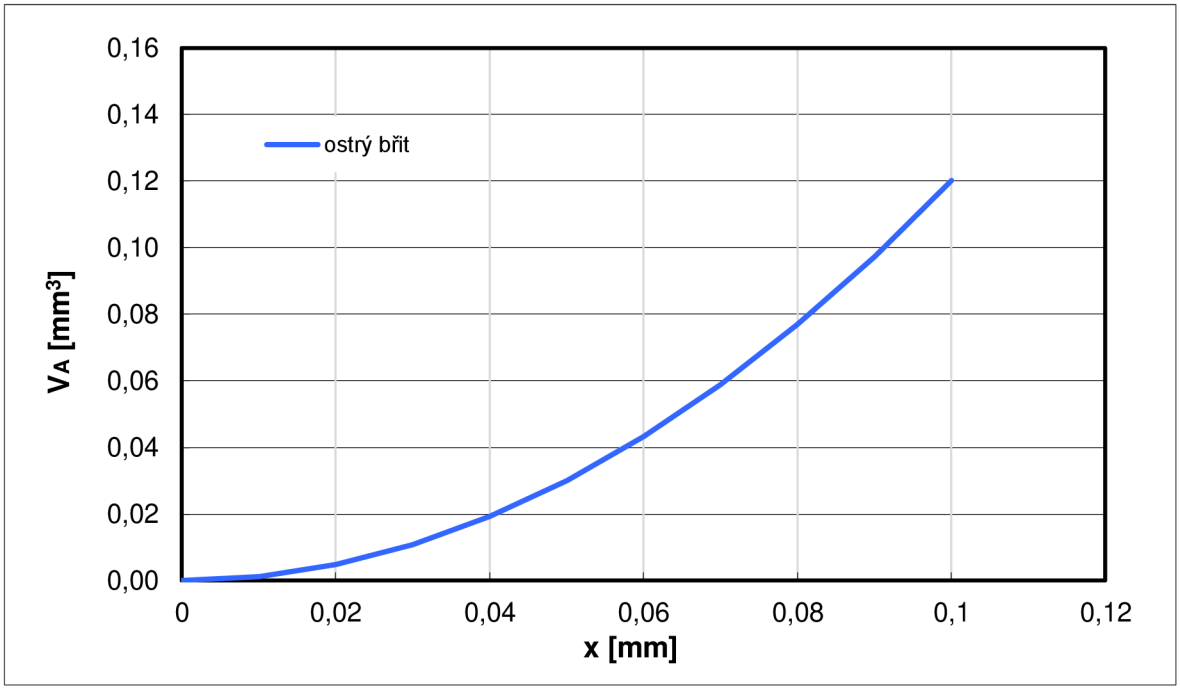
$$A_{(x)} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{x^2}{\tan \alpha_o} - x^2 \cdot \tan \gamma_o \right)$$

$$VB_A = \frac{x}{\tan \alpha_o} - x \cdot \tan \gamma_o$$

$$V_A = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{x^2}{\tan \alpha_o} - x^2 . \tan \gamma_o \right) . a_p$$

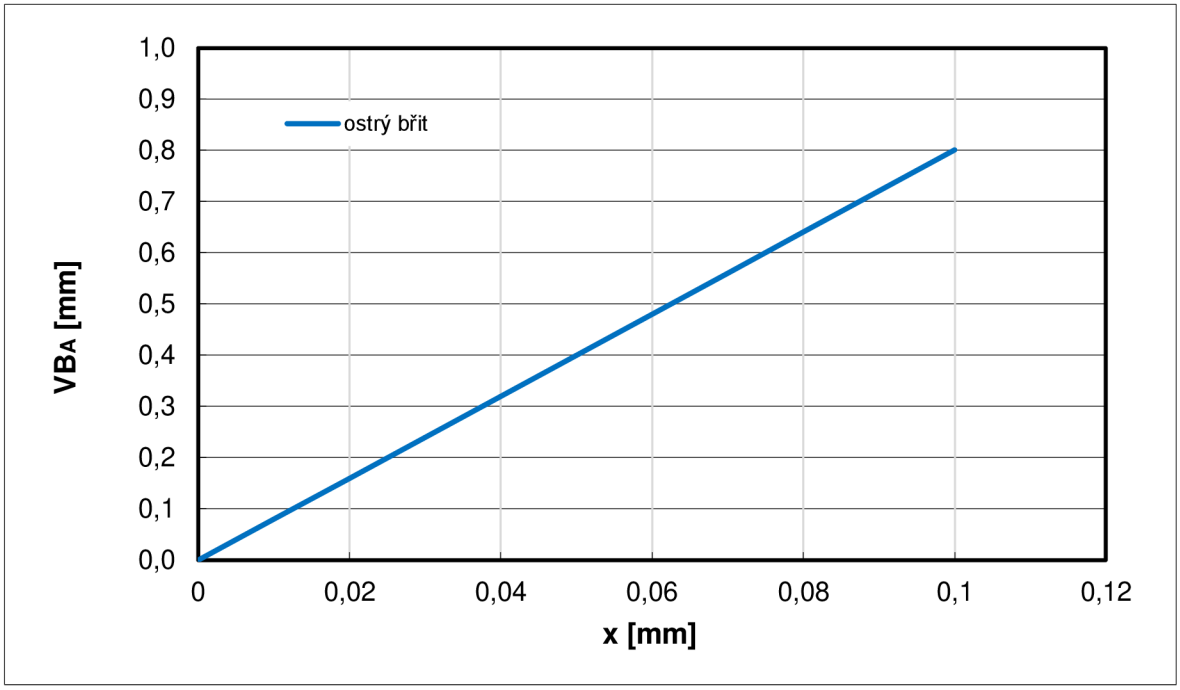
kde:

A	[mm^2]	-	plocha opotřebení nástroje u ostrého břitu,
x	[mm]	-	hloubka opotřebení $\Delta x = 0{,}001$,
α_o	[°]	-	úhel hřbetu,
γ_o	[°]	-	úhel čela,
VB_A	[mm]	-	opotřebení na hřbetě u ostrého břitu,
V_A	[mm^2]	-	objem opotřebení nástroje u ostrého břitu,
a_p	[mm]	-	šířka záběru hlavního ostří.



Obr. 4.4 Graf závislosti objemového opotřebení nástroje na x u nástroje s ostrým břitem.

Z grafu je patrné, že závislost objemového opotřebení V_A na x u ostrého břitu není lineární. Funkcí této závislosti je parabola $V_A = f(x) = 12x^2$.



Obr. 4.5 Graf závislosti opotřebení na hřbetě na x u nástroje s ostrým břitem.

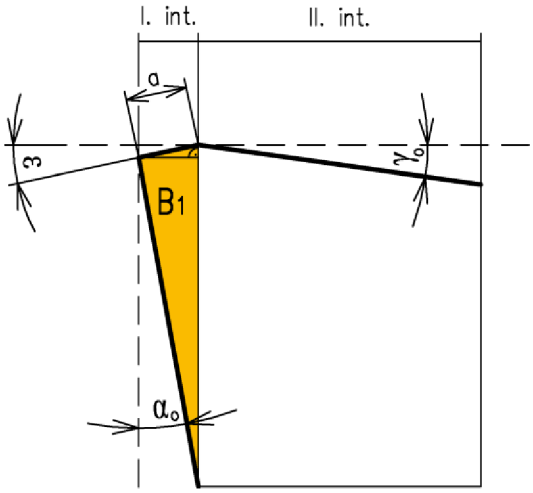
Závislost opotřebení na hřbetě VB u ostrého břitu na x je lineární. Funkcí této závislosti je přímka $VB_A = f(x) = 8x$.

4.1.2 Objemové opotřebení nástroje u břitu s fazetkou

Pro výpočet objemu opotřebení nástroje s fazetkovým ostřím byly využity goniometrické funkce a výpočet byl rozdělen do dvou intervalů, jak je vyobrazeno na obrázku 4.6. Plocha B_1 má tvar trojúhelníku.

I. interval: $x \in \langle 0 ; a \cdot \cos\varepsilon \rangle$

$\alpha_o = 7°$
$\gamma_o = 8°$
$\varepsilon = 5°$
$a = 0{,}07$ mm



Obr. 4.6 Řezný klín s fazetkou.

$$B_{1(x)} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{x^2}{\tan \alpha_o} + x^2 \cdot \tan \varepsilon \right)$$

$$VB_{BI} = \frac{x}{\tan \alpha_o} + x \cdot \tan \varepsilon$$

$$V_{BI} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{x^2}{\tan \alpha_o} + x^2 . \tan \varepsilon \right) . a_p$$

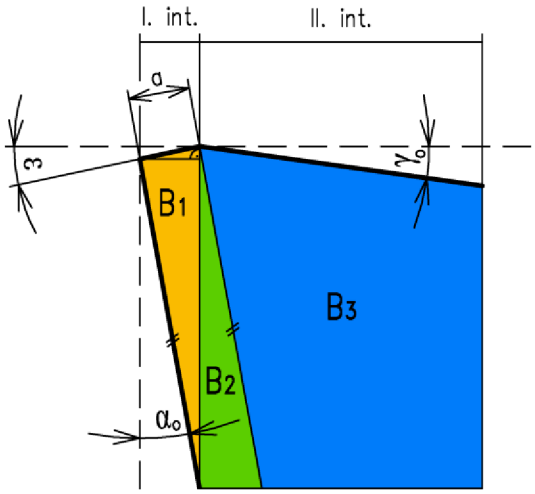
kde:

ε	[°]	-	úhel fazetky,
a	[mm]	-	délka fazetky,
VB_B	[mm]	-	opotřebení n hřbetě u břitu s fazetkou,
V_B	[mm^3]	-	objem opotřebení nástroje u břitu s fazetkou,
B	[mm]	-	plocha opotřebení nástroje u břitu s fazetkou.

Pro přesný výpočet byla ve druhém intervalu plocha řezného klínu rozdělena na dvě části, jak je zobrazeno na obrázku 4.7. Plocha B_1 je konstanta a ostatní plochy B_2 a B_3 jsou závislé na hloubce opotřebení x.

II. interval: $x \in (a \cdot \cos\varepsilon\,;\,0{,}1\rangle$

$\alpha_o = 7°$
$\gamma_o = 8°$
$\varepsilon = 5°$
$a = 0{,}07\ \text{mm}$



Obr. 4.7 Řezný klín s fazetkou.

$$B_1 = \frac{1}{2}\cdot\left(\frac{a^2\cdot\cos^2\varepsilon}{\tan\alpha_o} + a^2.\cos^2\varepsilon\cdot\tan\varepsilon\right)$$

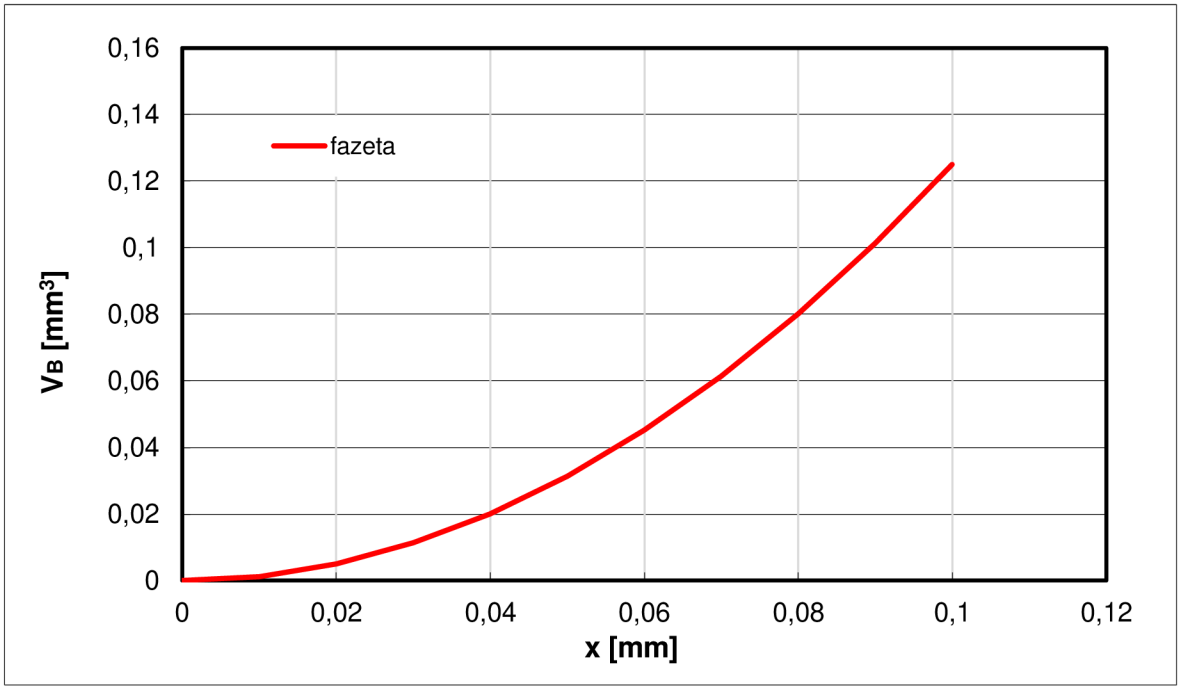
$$B_{2(x)} = \left(\frac{a\cdot\cos\varepsilon}{\tan\alpha_o} + a\cdot\sin\varepsilon\right)\cdot(x - a\cdot\cos\varepsilon)$$

$$B_{3(x)} = \frac{1}{2}\cdot\left[\frac{(x - a\cdot\cos\varepsilon)^2}{\tan\alpha_o} - (x - a\cdot\cos\varepsilon)^2\cdot\tan\gamma_o\right]$$

$$VB_{BII} = \frac{a\cdot\cos\varepsilon}{\tan\alpha_o} + a\cdot\sin\varepsilon + \frac{x - a\cdot\cos\varepsilon}{\tan\alpha_o} - (x - a\cdot\cos\varepsilon)\cdot\tan\gamma_o$$

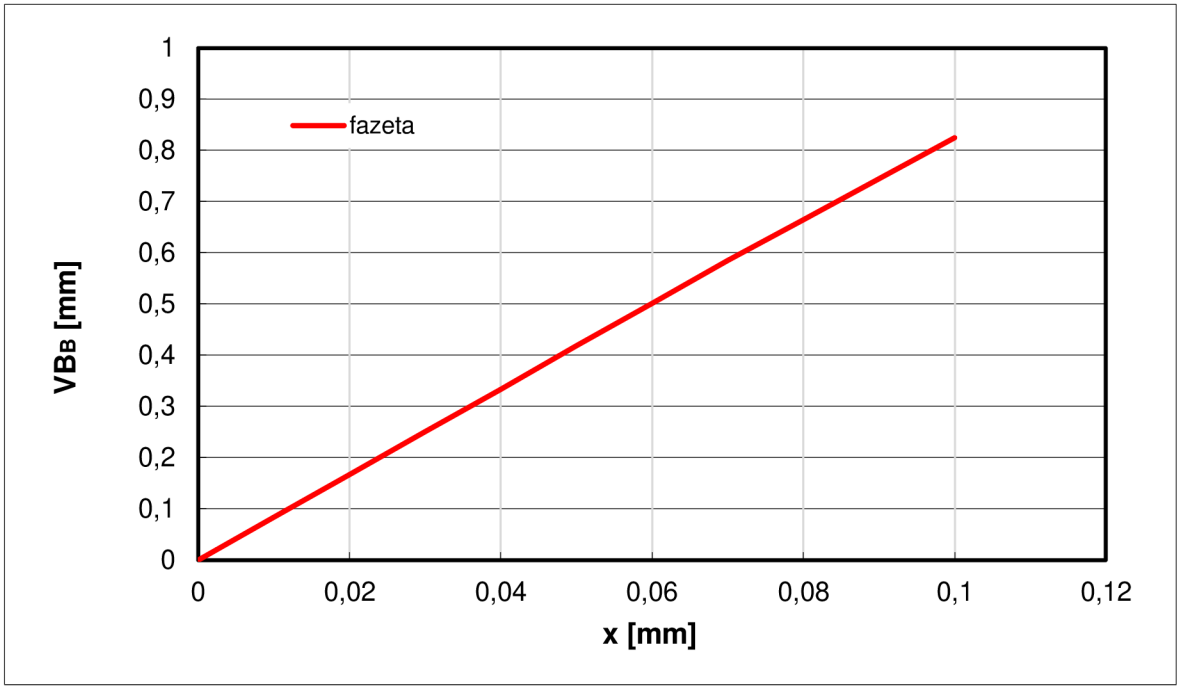
Po sečtení jednotlivých ploch a vynásobení šířkou hlavního ostří a_p se získá objem opotřebení destičky v prvním a druhém intervalu.

$$V_{BII} = \left(B_1 + B_{2(x)} + B_{3(x)}\right)\cdot a_p$$



Obr. 4.8 Graf závislost objemového opotřebení V_B na x u nástroje s fazetkovým ostřím.

Z grafu je patrné, že závislost objemového opotřebení nástroje u břitu s fazetkou na x není lineární. Funkcí této závislosti je parabola $V_B = f(x) = 12{,}44x^2 + 0{,}01x$.



Obr. 4.9 Graf závislosti opotřebení na hřbetě VB_B na x u nástroje s fazetkovým ostřím.

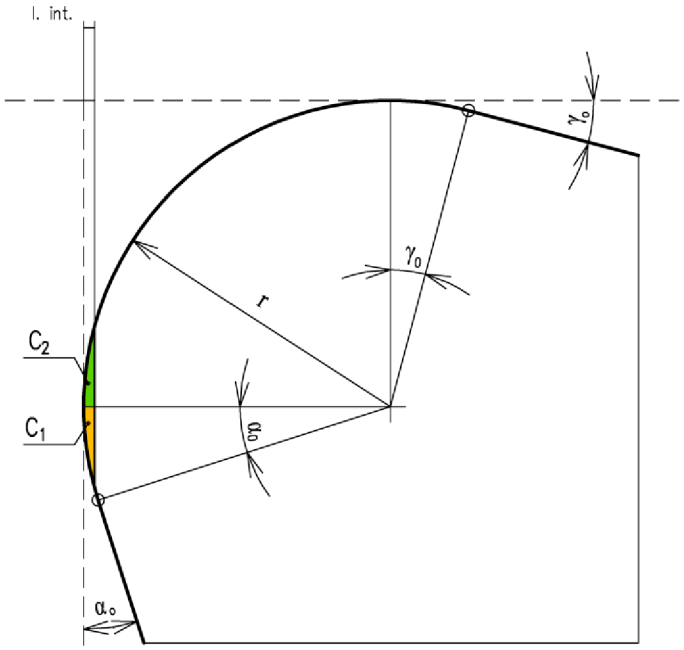
Závislost opotřebení na hřbetě VB_B na hloubce opotřebení na hřbetě x je lineární. Funkcí této závislosti je přímka $VB_B = f(x) = 8{,}27x$.

4.1.3 Objemové opotřebení nástroje u rektifikovaného ostří

Pro výpočet objemu opotřebení nástroje s rektifikovaným ostřím byl použit vzorec pro výpočet kruhové úseče a goniometrické funkce. Pro přesný výpočet objemu opotřebení nástroje byl řezný klín rozdělen do tří intervalů. V prvním intervalu byl řezný nástroj rozdělen na 2 části C_1 a C_2, jak je vyobrazeno na obrázku 4.10. Jedná se o dvě stejné půlúseče.

I. interval: $x \in \langle 0 \,;\, r \cdot (1 - \cos\alpha) \rangle$

$\alpha_o = 7°$
$\gamma_o = 8°$
$r = 0{,}05\ \text{mm}$



Obr. 4.10 Řezný klín s rektifikovaným ostřím.

$$C_{1(x)} = \frac{1}{2} \cdot \left[r^2 \cdot \arccos\left(\frac{r - x}{r}\right) - (r - x) \cdot \sqrt{2 \cdot x \cdot r - x^2} \right]$$

$$C_{2(x)} = C_{1(x)}$$

$$VB_{CI} = 2 \cdot \sqrt{r^2 - (r - x)^2}$$

$$V_{CI} = \left[r^2 \cdot \arccos\left(\frac{r - x}{r}\right) - (r - x) \cdot \sqrt{2 \cdot x \cdot r - x^2} \right] . a_p$$

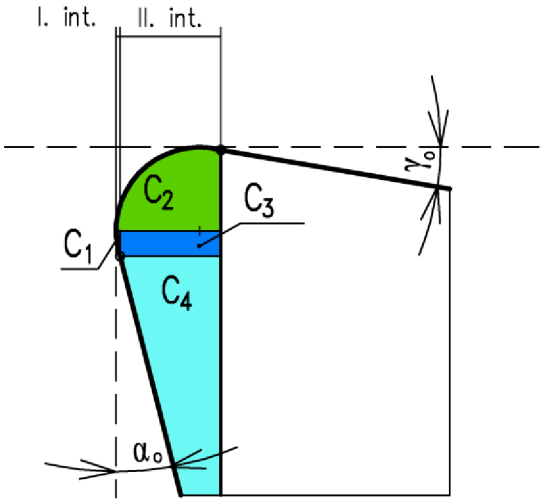
kde:

r	[mm]	-	poloměr zaoblení špičky,
VB_C	[mm]	-	opotřebení na hřbetě u rektifikovaného ostří,
V_C	[mm^3]	-	objem opotřebení nástroje u rektifikovaného ostří,
C	[mm]	-	plocha opotřebení nástroje u rektifikovaného ostří.

Pro přesný výpočet byla ve druhém intervalu plocha řezného klínu rozdělena na čtyři části, jak je zobrazeno na obrázku 4.11. Plocha C_1 je konstanta a ostatní plochy $C_{2(x)}$, $C_{3(x)}$ a $C_{4(x)}$ jsou závislé na hloubce opotřebení hřbetu x.

II. interval: $x \in (r \cdot (1 - \cos\alpha_o)\ ;\ r \cdot (1 + \sin\gamma_o)\rangle$

$\alpha_o = 7°$
$\gamma_o = 8°$
$r = 0{,}05\ \text{mm}$



Obr. 4.11 Řezný klín s rektifikovaným ostřím.

$$C_1 = \frac{1}{2} \cdot \left[r^2 \cdot \arccos\left(\frac{r \cdot \cos\alpha_o}{r}\right)\right]$$

$$-\frac{1}{2}\left[r \cdot \cos\alpha_o \cdot \sqrt{2 \cdot r^2 \cdot (1 - \cos\alpha_o) - r^2 \cdot (1 - \cos\alpha_o)^2}\right]$$

$$C_{2(x)} = \frac{1}{2} \cdot \left[r^2 \cdot \arccos\left(\frac{r - x}{r}\right) - (r - x) \cdot \sqrt{2 \cdot x \cdot r - x^2}\right]$$

$$C_{3(x)} = r \cdot \sin\alpha_o \cdot \left(x - r \cdot (1 - \cos\alpha_o)\right)$$

$$C_{4(x)} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\left(x - r \cdot (1 - \cos\alpha_o)\right)^2}{\tan\alpha_o}$$

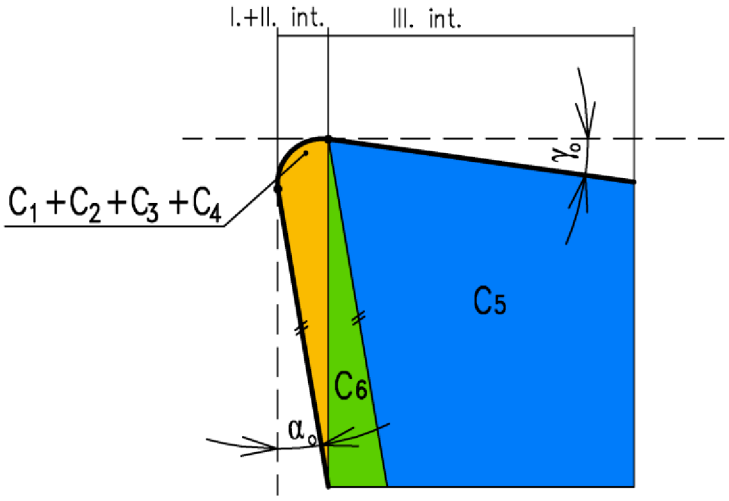
$$VB_{CII} = \sqrt{r^2 - (r - x)^2} + r \cdot \sin\alpha_o + \frac{x - r \cdot (1 - \cos\alpha_o)}{\tan\alpha_o}$$

Po sečtení jednotlivých ploch C_1, $C_{2(x)}$, $C_{3(x)}$ a $C_{4(x)}$ a vynásobení šířkou destičky a_p dostaneme objem opotřebení destičky v prvním a druhém intervalu.

$$V_{CII} = \left(C_1 + C_{2(x)} + C_{3(x)} + C_{4(x)}\right) \cdot a_p$$

Pro přesný výpočet byla ve druhém intervalu plocha řezného klínu rozdělena na šest částí, jak je zobrazeno na obrázku 4.12. Plochy C_1, C_2, C_3 a C_4 jsou konstanty a ostatní plochy $C_{5(x)}$ a $C_{6(x)}$ jsou závislé na hloubce opotřebení na hřbetě x.

III. interval: $x \in (r \cdot (1 + \sin\gamma_o)\ ;\ 0{,}1\rangle$



Obr. 4.12 Řezný klín s rektifikovaným ostřím.

$$C_2 = \frac{1}{2} \cdot \left[r^2 \cdot \arccos\left(\frac{-r \cdot \sin\gamma_o}{r}\right) - r \cdot \sin\gamma_o \cdot \sqrt{2 \cdot r^2 \cdot (1 + \sin\gamma_o) - r^2 \cdot (1 + \sin\gamma_o)^2} \right]$$

$$C_3 = r \cdot \sin\alpha_o \cdot [r \cdot (1 + \sin\gamma_o) - r \cdot (1 - \cos\alpha_o)]$$

$$C_4 = \frac{1}{2} \cdot \frac{[r \cdot (1 + \sin\gamma_o) - r \cdot (1 - \cos\alpha_o)]^2}{\tan\alpha_0}$$

$$C_{5(x)} = \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{\left(x - r \cdot (1 + \sin\gamma_o)\right)^2}{\tan\alpha_o} - \left(x - r \cdot (1 + \sin\gamma_o)\right)^2 \cdot \tan\gamma_o \right]$$

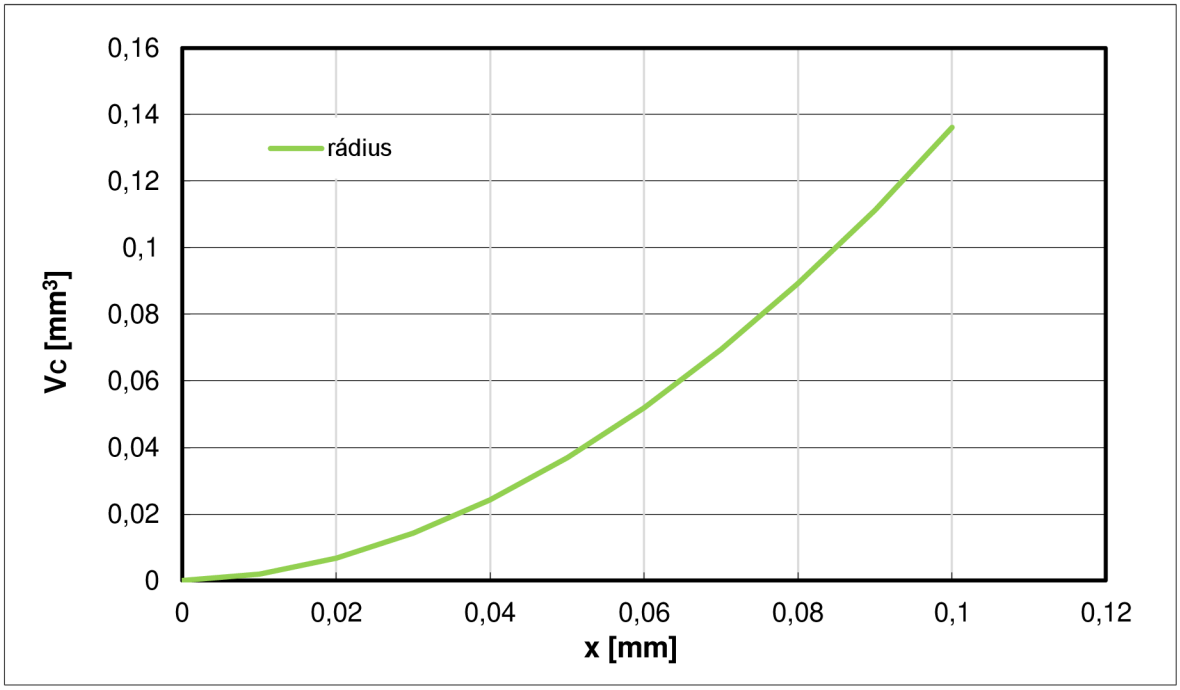
$$C_{6(x)} = \left[r \cdot \cos\gamma_o + r \cdot \sin\alpha_o + \frac{r \cdot \cos\alpha_o}{\tan\alpha_o} \right] \cdot \left(x - r \cdot (1 + \sin\gamma_o)\right)$$

$$VB_{CIII} = \left[r \cdot \cos\gamma_o + r \cdot \sin\alpha_o + \frac{r \cdot \cos\alpha_o}{\tan\alpha_o} \right]$$

$$+ \left[\frac{x - r \cdot (1 + \sin\gamma_o)}{\tan\alpha_o} - x - r \cdot (1 + \sin\gamma_o) \cdot \tan\gamma_o \right]$$

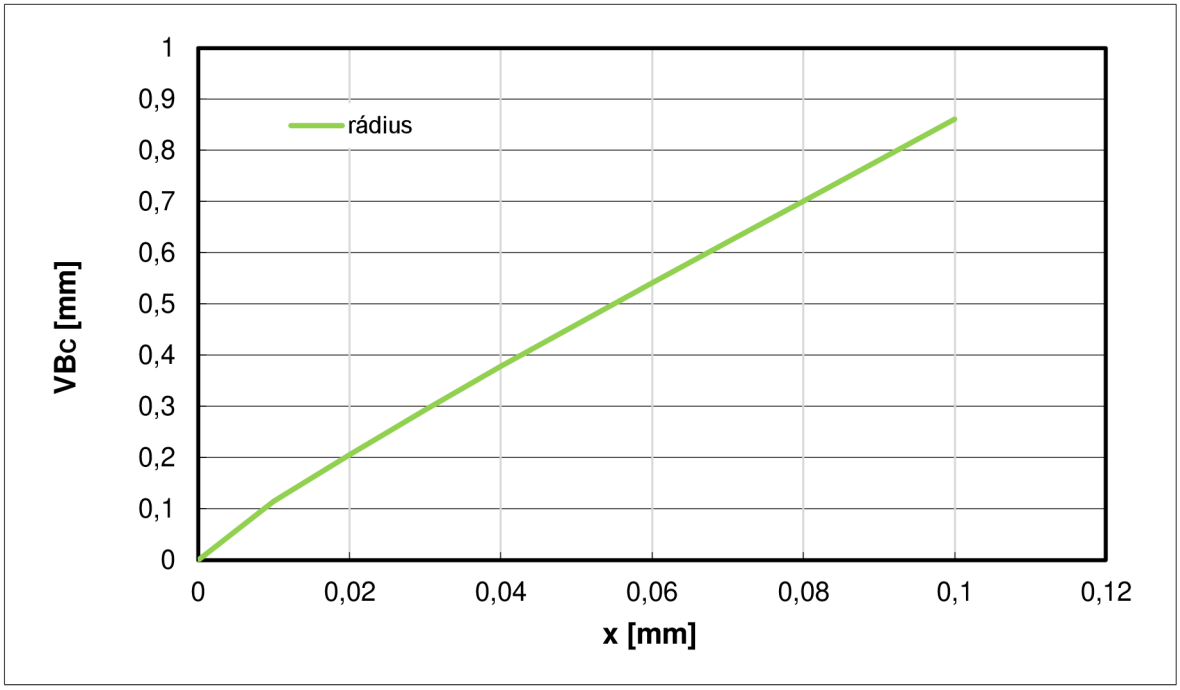
Po sečtení jednotlivých ploch a vynásobení šířkou destičky a_p dostaneme objem opotřebení destičky ve všech třech intervalech intervalu.

$$V_{CIII} = \left(C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_{5(x)} + C_{6(x)}\right) \cdot a_p$$



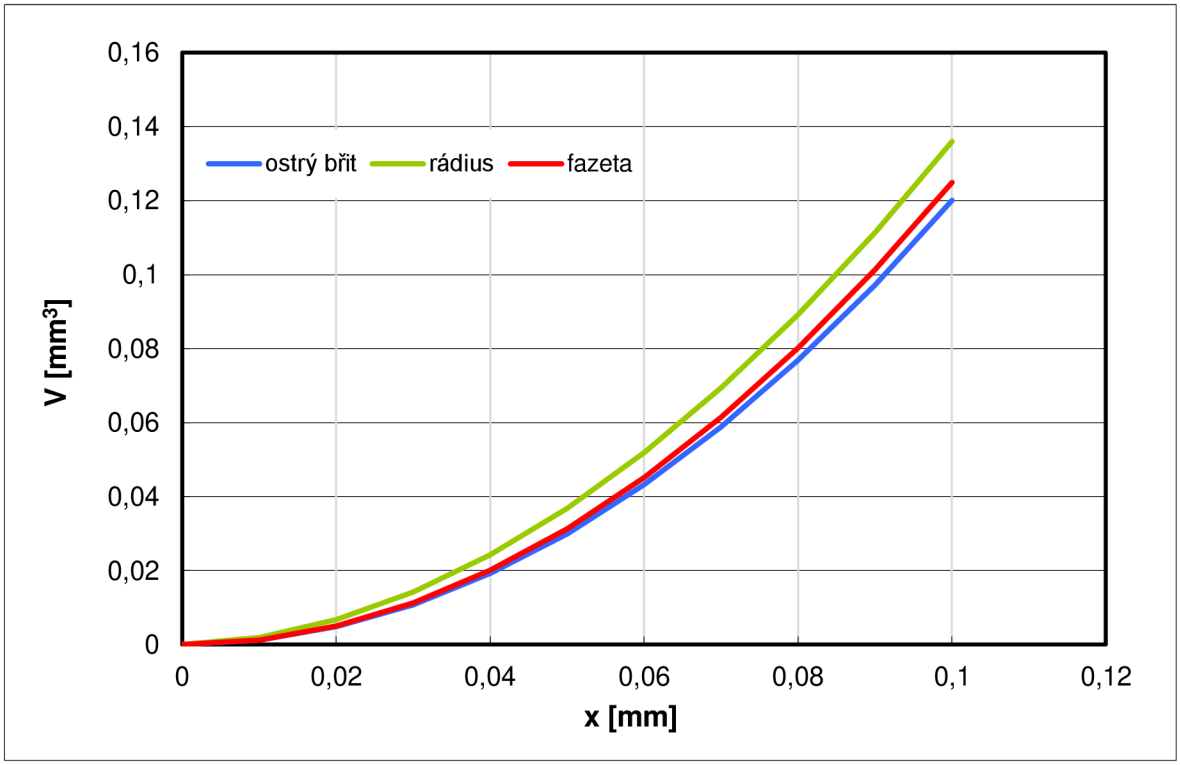
Obr. 4.13 Graf závislosti objemového opotřebení VC na x u nástroje s rektifikovaným ostřím.

Z grafu je patrné, že závislost objemového opotřebení na x u břitu s rektifikovaným ostřím není lineární. Funkcí této závislosti je parabola $V_C = f(x) = 12{,}45x^2 + 0{,}12x$.

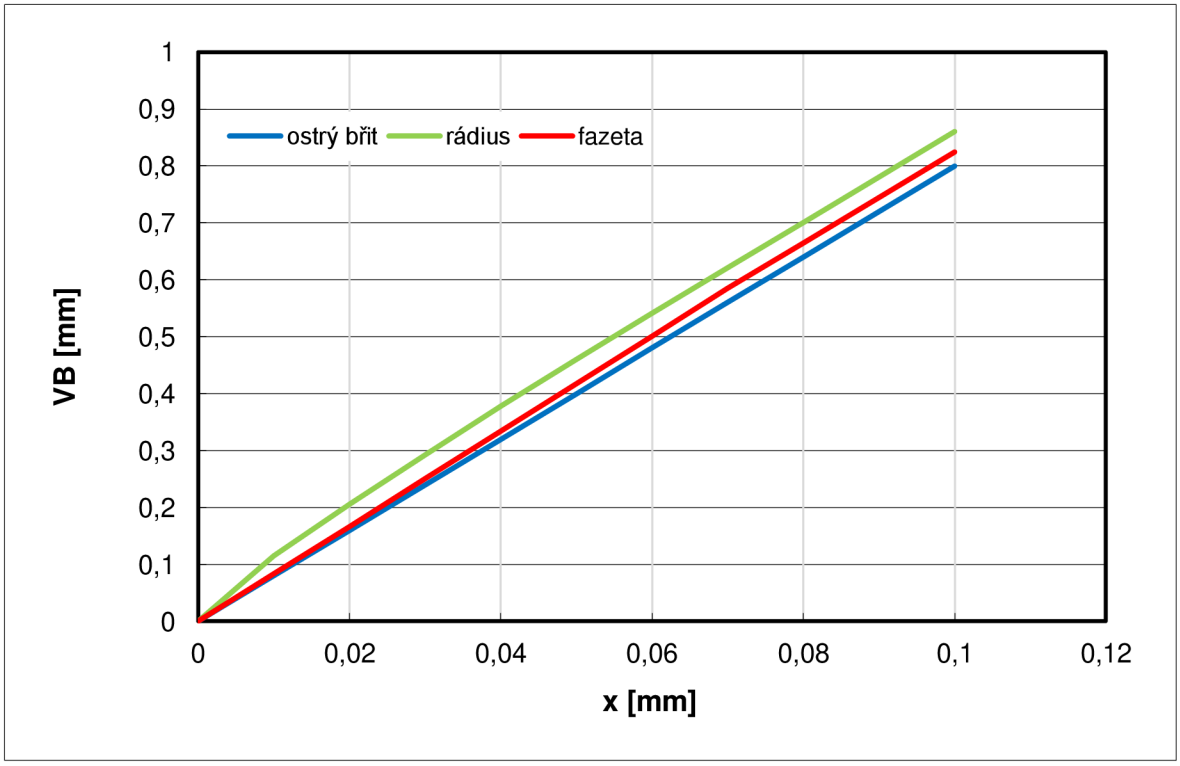


Obr. 4.14 Graf závislosti opotřebení na hřbetě na x u nástroje s rektifikovaným ostřím.

Závislost opotřebení na hřbetě na x u rektifikovaného ostří je od hodnoty $x = 0{,}01$ lineární. Funkcí této závislosti je přímka $VB_C = f(x) = 8{,}43x + 0{,}03$.



Obr. 4.15 Porovnání objemu opotřebení nástroje u jednotlivých tvarů ostří v závislosti na hloubce opotřebení na hřbetě x.



Obr. 4.16 Porovnání opotřebení na hřbetě nástroje u jednotlivých tvarů ostří v závislosti na hloubce opotřebení na hřbetě x.

4.2 Experimentální část

Cílem experimentu bylo změřit opotřebení nástroje pro zapichování, které bylo simulováno pomocí brusného kotouče. Při testování bylo sledováno silové zatížení řezného nástroje. Získané hodnoty byly použity pro výpočet objemového opotřebení nástroje a opotřebení na hřbetě a výsledné hodnoty byly vyneseny do grafu. Experiment byl proveden v dílnách FSI VUT v Brně na ústavu strojírenské technologie, odboru technologie obrábění.

4.2.1 Zkušební vzorek

Zkušební vzorek určený k experimentu byl z oceli dle ČSN 11 600 dle EN 1.0060. Jedná se o neušlechtilou konstrukční ocel obvyklé jakosti s vyšším obsahem uhlíku (max. 0,5%), která je vhodná na strojní součásti namáhané staticky i dynamicky, u kterých se nevyžaduje svařitelnost a na součásti vystavené velkému měrnému tlaku [13]. Byla vybrána kruhová tyč válcovaná za tepla: ø 50 mm, $l = 250$ mm.

Tab. 4.1 Mechanické vlastnosti oceli 11 600.0 [13].

mez pevnosti Rm [MPa]	mez kluzu Re [MPa]	tvrdost HB
590-705	295	Max 205

4.2.2 Charakteristika nástroje

K experimentu byl použit celistvý nástroj z rychlořezné oceli 19 860 (HSS 02). Tento nůž byl vybrán kvůli jeho jednoduché geometrii břitu, která byla vhodná pro výpočty objemu opotřebení nástroje a opotřebení na hřbetě.

Tab. 4.2 Geometrie řezného nástroje.

úhel hřbetu	α_o	[°]	9
úhel čela	γ_o	[°]	19
úhel nastavení hlavního ostří	κ_r	[°]	0
úhel nastavení vedlejšího ostří	κ_r'	[°]	92
boční úhel hřbetu	α_f	[°]	2
šířka hlavního ostří	a_p	[mm]	4

Obr. 4.17 Celistvý zapichovací nůž 20x12 35510 z rychlořezné oceli 19 860.

4.2.3 Obráběcí stroj

Hrotový soustruh

Testování silového zatížení řezného nástroje bylo prováděno na hrotovém soustruhu SU50A-SP vyrobeného firmou TOS Kuřim a.s., který je na obrázku 4.18. Rozšířené technické údaje jsou uvedeny v příloze 1.

Obr. 4.18 Hrotový soustruh SU50A-SP TOS Kuřim a.s.

Tab. 4.3 Hlavní technické údaje soustruhu SU50A-SP.

Oběžný průměr nad ložem	[mm]	500
oběžný průměr nad suportem	[mm]	250
vzdálenost hrotů	[mm]	1500
Šířka lože	[mm]	420
otáčky vřetene	[min^{-1}]	11,2-1400
výkon motoru	[kW]	11

Kopírovací bruska

Simulace opotřebení řezného nástroje byla prováděna na brusce BND 17 vyrobené firmou TOS Hostivař, která je znázorněn na obrázku 4.19. Pro broušení byl použit diamantový brusný kotouč a úhel nastavení byl 90°.

Obr 4.19 Bruska na nože kopírovací BND 17 TOS Hostivař.

Tab. 4.4 Hlavní technické údaje soustruhu SU50A-SP.

miskový brousící kotouč		
průměr	[mm]	175
nastavení kopírovacího zařízení pro úhel hřbetu	[°]	+20 až -6
nastavení kopírovacího ramene ve vodorovné rovině	[°]	140
otáčky vřetene	[min^{-1}]	2800
výkon motoru	[kW]	1,4

4.2.4 Mikroskop

K měření opotřebení byl použit rastrovací mikroskop BM1 1 VC 3321. Pomocí mikroskopu byly také změřeny velikosti úhlů čela a hřbetu, úhel vedlejšího nastavení ostří a boční úhel hřbetu.

Obr. 4.20 Rastrovací mikroskop BM1 1VC 3321.

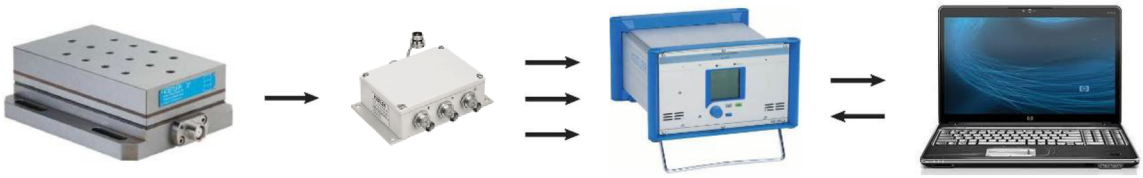
Fotografie třísek a řezného nástroje před a po opotřebení byly pořízeny na stereomikroskopu STEMI 2000-C od firmy ZEISS, který využívá zdroj studeného světla KL 1500 LCD. Na stereomikroskopu je připevněn fotoaparát značky SONY MPEG Movie EX DSC-S75.

a) b)

Obr. 4.21 a) Stereomikroskop STEMI 2000-C, b) zdroj studeného světla KL 1500 LCD [].

4.2.5 Měřící zařízení

Zatížení řezného nástroje bylo měřeno pomocí třísložkového piezoelektrického dynamometru KISTLER 9257B. Měřící soustava obsahovala dynamometr, distribuční box s BNC konektory, vícekanálový zesilovač typu 5070A11000, A/D převodník, notebook se softwarem DynoWare 2852 A-02-2 a propojovací, prodlužovací a řídící kabely. Při experimentu bylo silové zatížení měřeno podobu dvaceti sekund. Schéma zapojení měřící aparatury je znázorněno na obrázku 4.22.



a) b) c) d))

Obr. 4.22 Schéma zapojení měřící soustavy Kistler a) dynamometr, b) distribuční box c) zesilovač, d) notebook se softwarem [14].

4.2.6 Řezné podmínky

Před zahájením měření řezných sil byly stanoveny řezné podmínky, které jsou uvedeny v tabulce 4.6. Výpočet otáček byl proveden podle vztahu 4.1.

$$n = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot D} \tag{4.1}$$

$$n = \frac{30 \cdot 1000}{\pi \cdot 50} = 191\ \mathrm{min}^{-1}$$

kde: v_c [m.min^{-1}] - řezná rychlost,
π [-] - Ludolfovo číslo,
D [mm] - průměr obrobku,
n [min^{-1}] - otáčky obrobku.

Tab: 4.5 Nastavené řezné podmínky při měření řezných sil.

veličina	jednotka	hodnota
řezná rychlost v_c	[m.min^{-1}]	30
posuv na otáčku f	[mm]	0.1
šířka zápich a_p	[mm]	4
průměr polotovaru D	[mm]	50
otáčky n	[min^{-1}]	191

4.2.7 Popis experimentu

Nový soustružnický upichovací nůž byl upnut do měřicího zařízení Kistler. Na soustruhu byly nastaveny otáčky vřetene podle vypočítaných řezných podmínek v kapitole 4.2.6. Do univerzálního tříčelisťového sklíčidla byl upnut materiál o průměru 50 mm a druhý konec materiálu byl opřen otočným hrotem. Po spuštění stroje a najetí nože do výchozího bodu experimentu byl současně spuštěn příčný posuv stroje 0,1 mm a start programu DynoWare. Po dobu dvaceti sekund bylo na dynamometru měřeno silové zatížení nástroje, které vznikalo při obrábění zápichu. Po zastavení stroje byly vyhodnoceny jednotlivé složky celkové řezné síly.

Po ukončení prvního kroku obrábění bylo provedeno obroušení břitu, které simulovalo opotřebení při obrábění a bylo přikročeno k dalšímu kroku měření. Obroušení bylo provedeno na brusce BND 17 od firmy TOS Hostivař a byl použit diamantový brusný kotouč. Takto vytvořené opotřebení bylo změřeno na mikroskopu BMI 1 VC a hodnoty byly zaznamenány v tabulce.

Celkem bylo provedeno devět kroků obrušování řezného nástroje a měření řezných sil. Z naměřených hodnot se vypočítal objem opotřebení nástroje V a opotřebení na hřbetě VB. Objem opotřebení nástroje byl nejprve počítán s konstantní šířkou řezného nástroje a posléze s proměnnou (reálnou) šířkou nástroje. Všechny hodnoty byly vyneseny do grafů a vyhodnoceny.

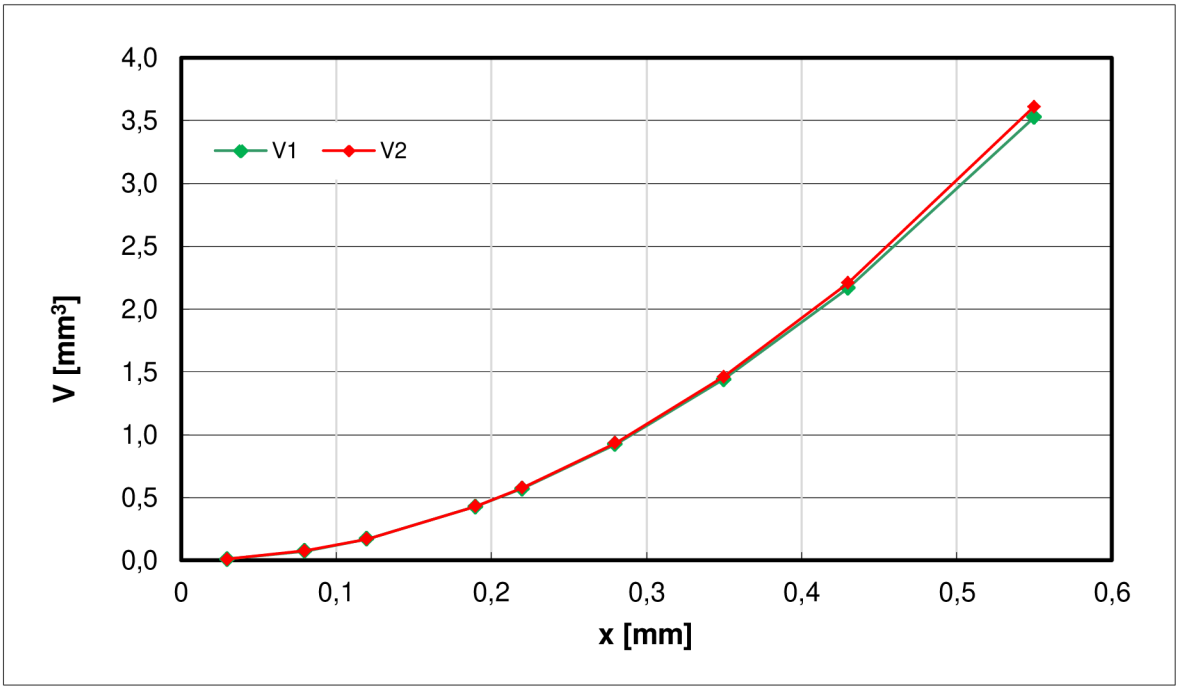
4.2.8 Dosažené výsledky

Celkem proběhlo deset měření silového zatížení řezného nástroje. První měření bylo provedeno s novým nožem pro zapichování. Po každém nasimulovaném opotřebení bylo vždy provedeno další měření silového zatížení a hodnoty byly zpracovány do grafů. V tabulce 4.6 jsou uvedeny hodnoty hloubky opotřebení na hřbetě x a vypočítané hodnoty opotřebení na hřbetě VB a objemové opotřebení nástroje V. Při výpočtu objemového opotřebení byla v úvahu také brána proměnlivá šířka hlavního ostří.

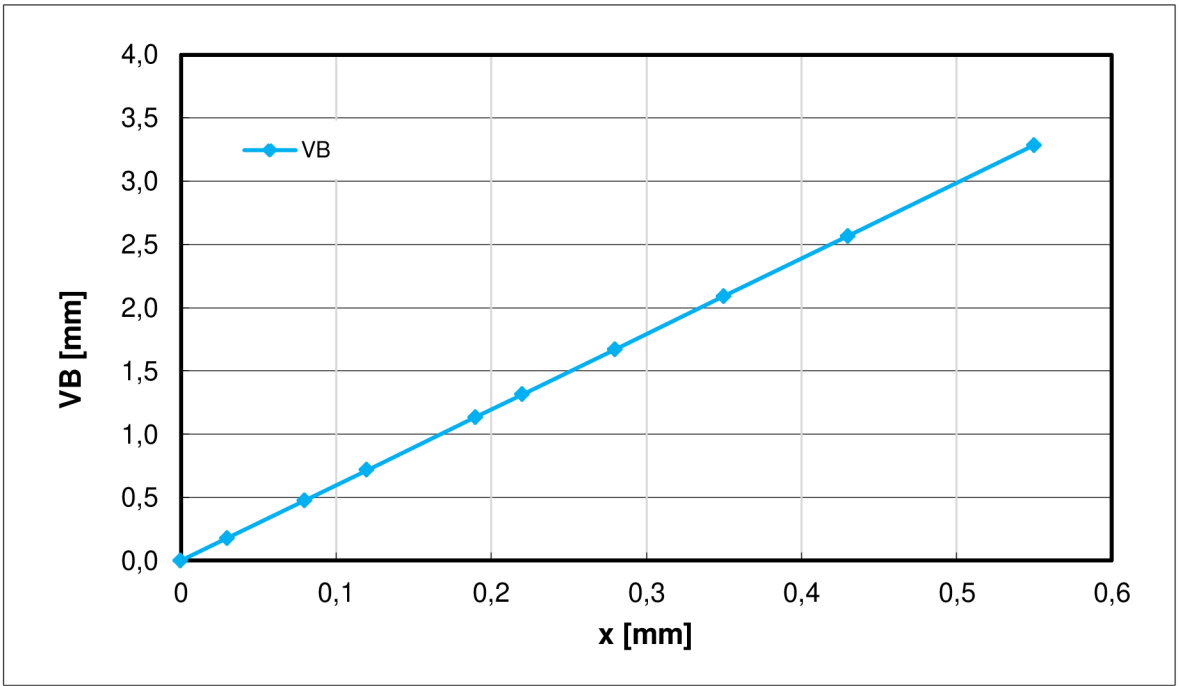
Tab 4.6 Hodnoty opotřebení nástroje na hřbetě a objemového opotřebení.

	x [mm]	VB [mm]	V_1 konst. šířka [mm^3]	V_2 proměnná šířka [mm^3]	rozdíl V_1 a V_2 [%]
1 nový nůž	0,00	0,00000	0,00000	0,00000	0,00
2	0,03	0,17908	0,01074	0,01073	0,10
3	0,08	0,47755	0,07641	0,07617	0,32
4	0,12	0,71633	0,17192	0,17106	0,50
5	0,19	1,13419	0,43099	0,42754	0,81
6	0,22	1,31327	0,57784	0,57245	0,94
7	0,28	1,67144	0,93601	0,92483	1,21
8	0,35	2,08930	1,46251	1,44063	1,52
9	0,43	2,56685	2,20749	2,16687	1,87
10	0,55	3,28318	3,61150	3,52648	2,41

Z vypočítaných hodnot objemového opotřebení je patrné, že rozdíl mezi reálným objemem V2 (proměnná šířka ostří) a objemem V1(konstantní šířka ostří a_p = 4mm) je velmi malý. Při běžném opotřebení na hřbetě VB = 0,7 mm je tento rozdíl 0,5 %. Tento rozdíl je patrný i z grafického znázornění v obrázku 4.23.

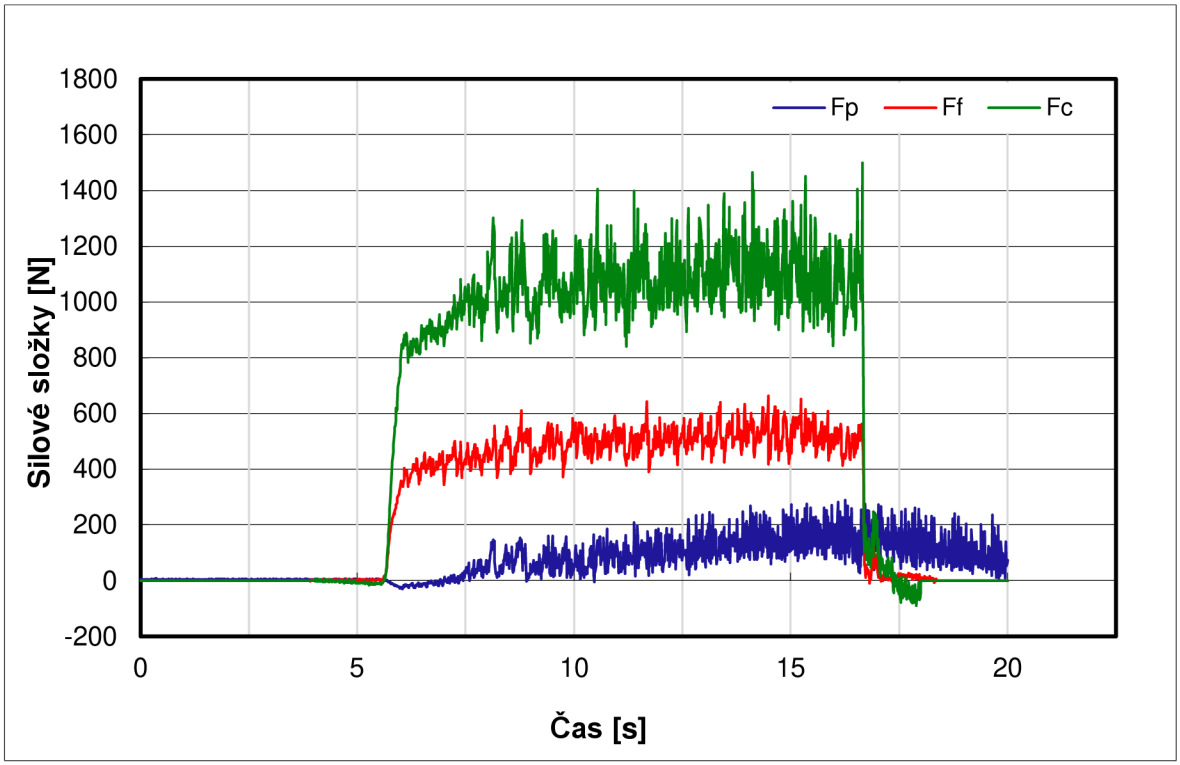


Obr. 4.23 Objemové opotřebení nástroje $\mathbf{V_1}$ a $\mathbf{V_2}$ v závislosti na hloubce opotřebení hřbetu x.

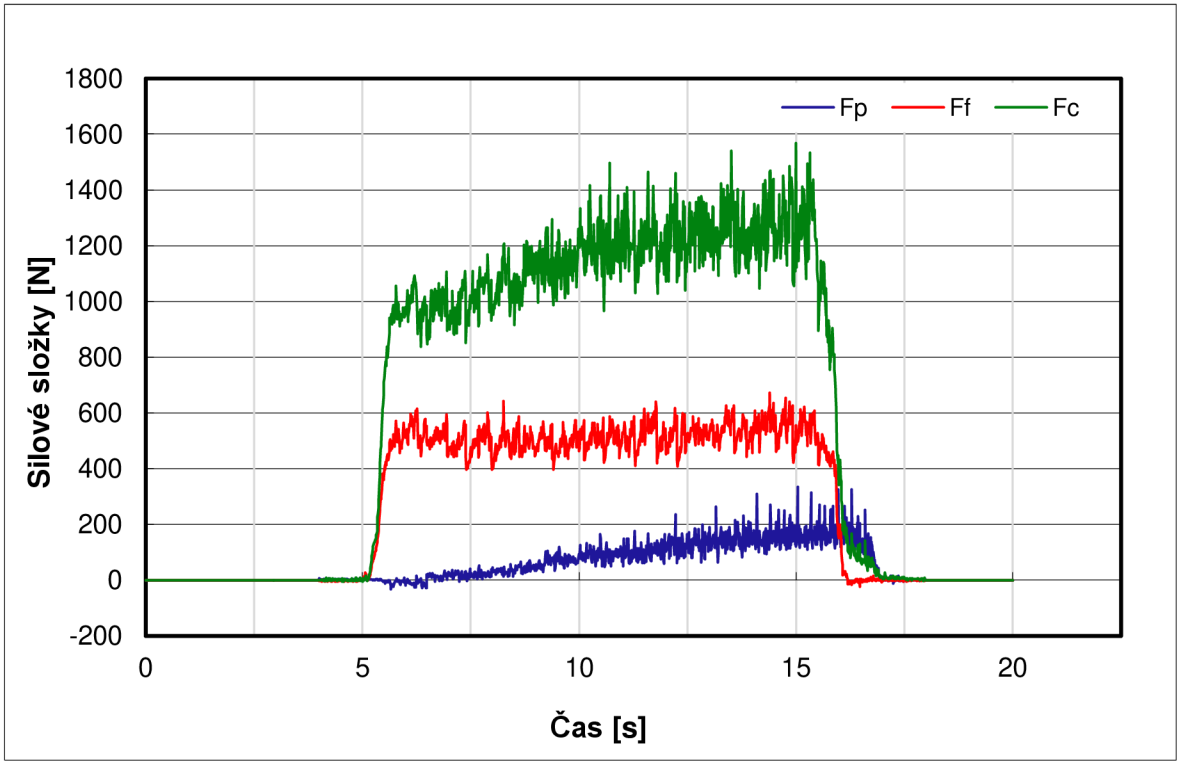


Obr. 4.24 Opotřebení hřbetu nože **VB** v závislosti na hloubce opotřebení hřbetu x.

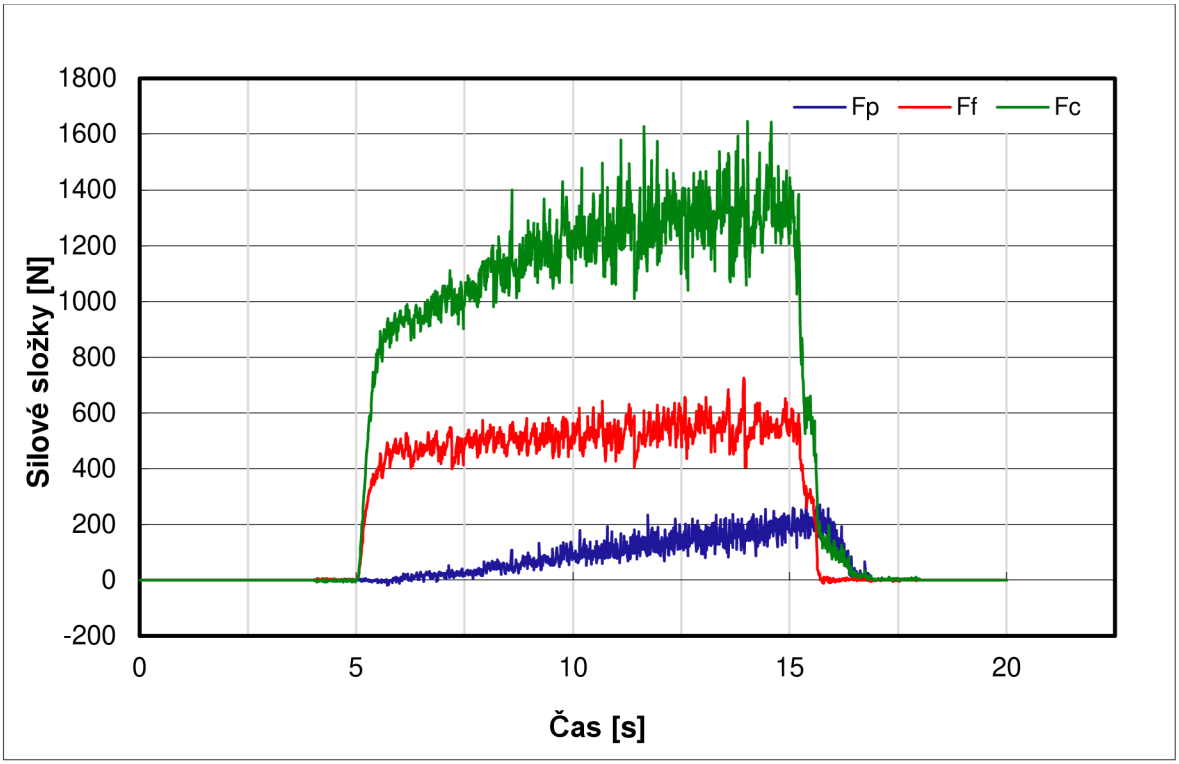
4.2.9 Grafy silového zatížení nástroje při zapichování



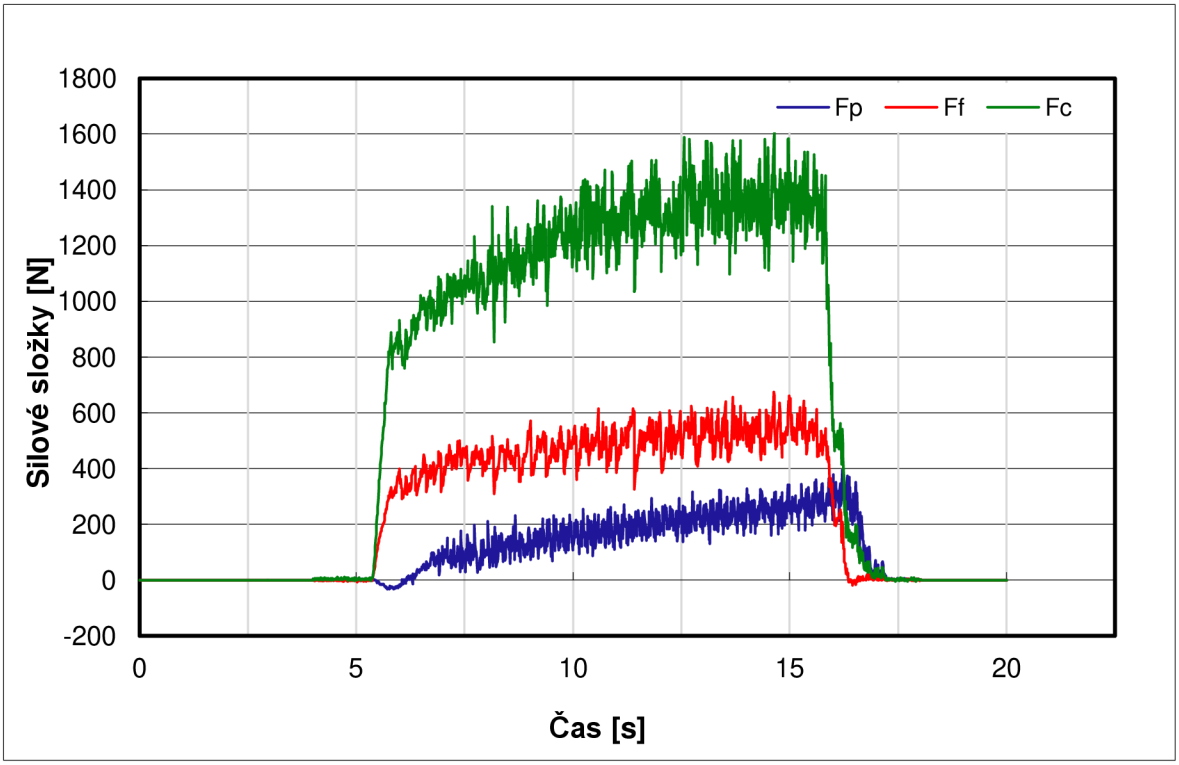
Obr. 4.25 Silový průběh jednotlivých složek celkové řezné síly u nového nože x = 0 mm.



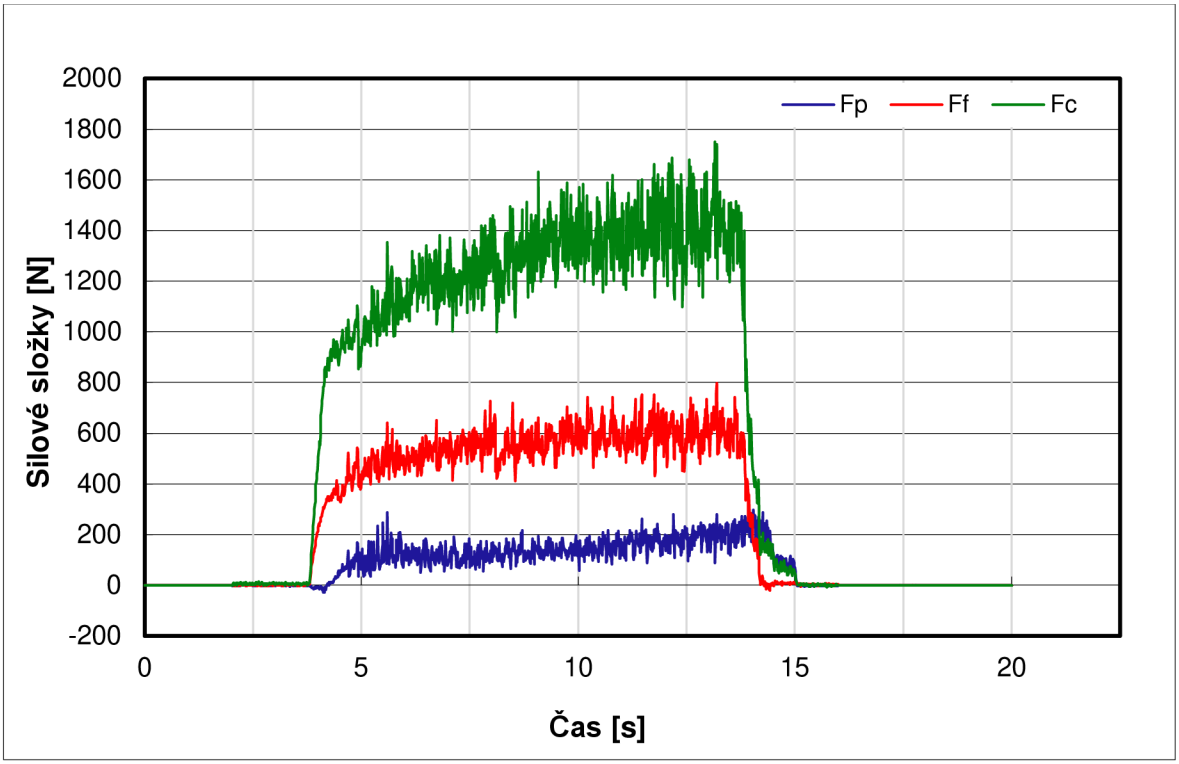
Obr. 4.26 Silový průběh jednotlivých složek celkové řezné síly při x = 0,03 mm.



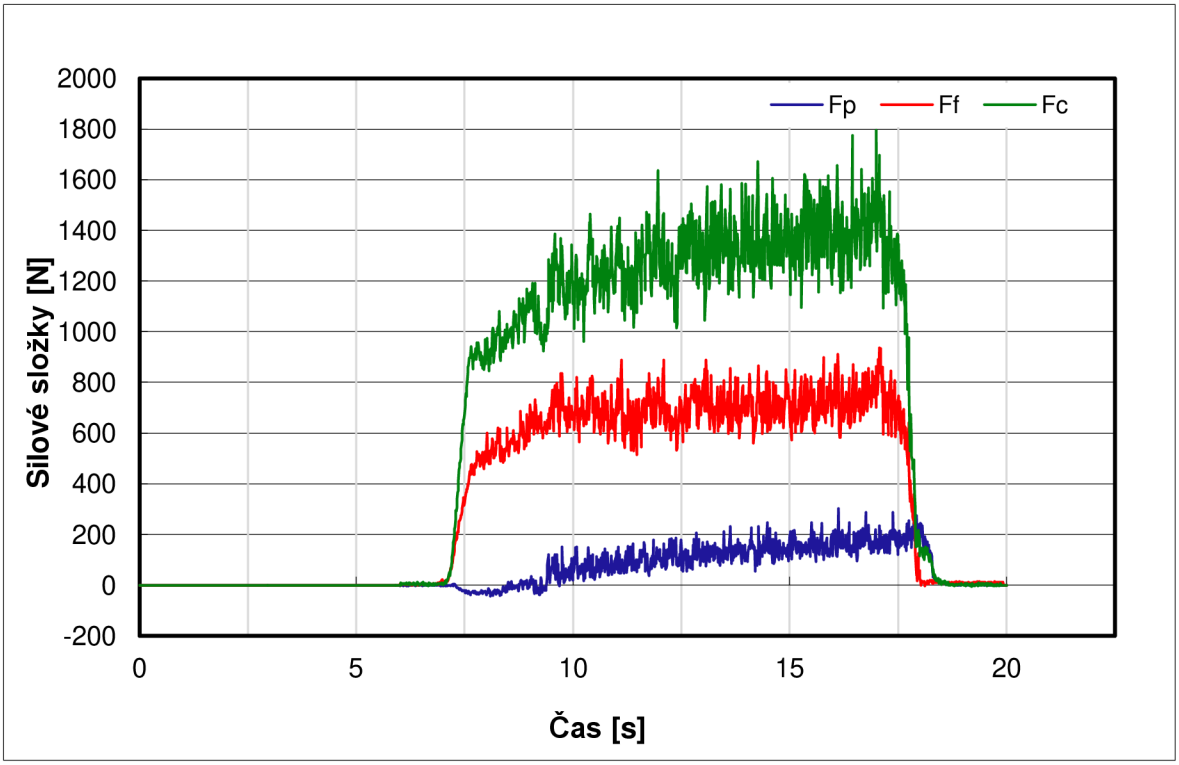
Obr. 4.27 Silový průběh jednotlivých složek celkové řezné síly při x = 0,08 mm.



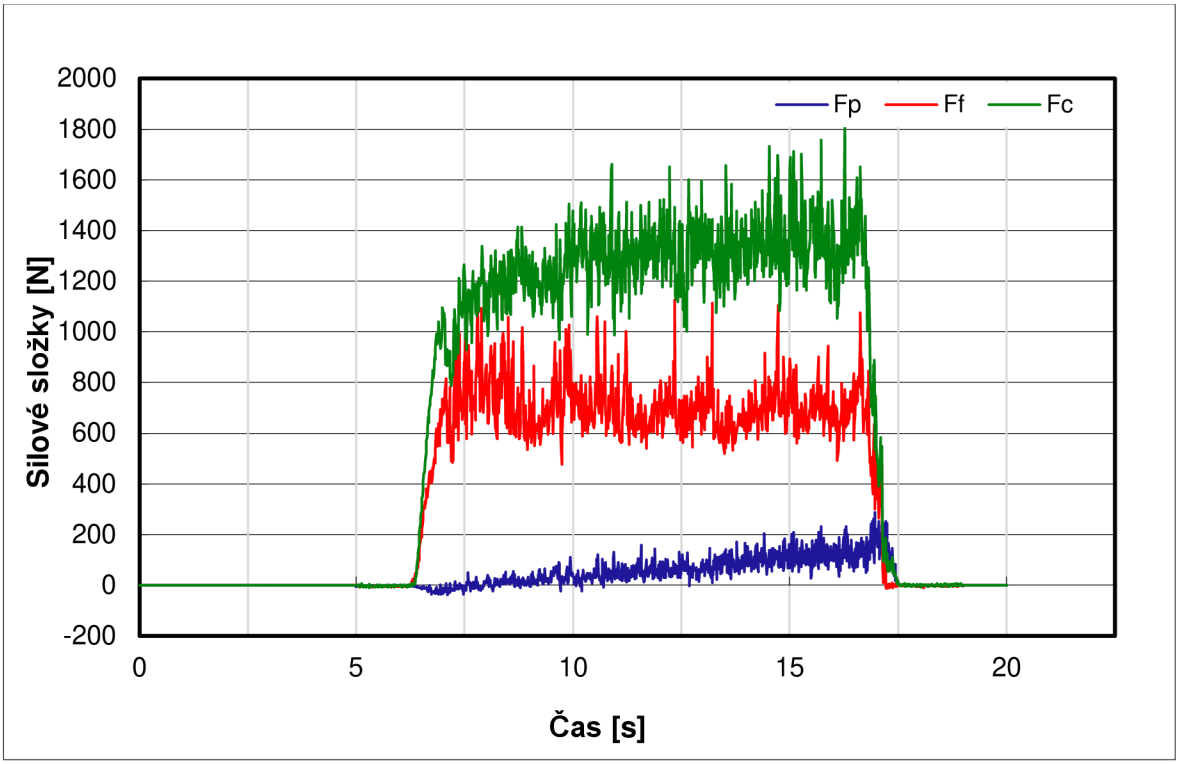
Obr. 4.28 Silový průběh jednotlivých složek celkové řezné síly při x = 0,12 mm.



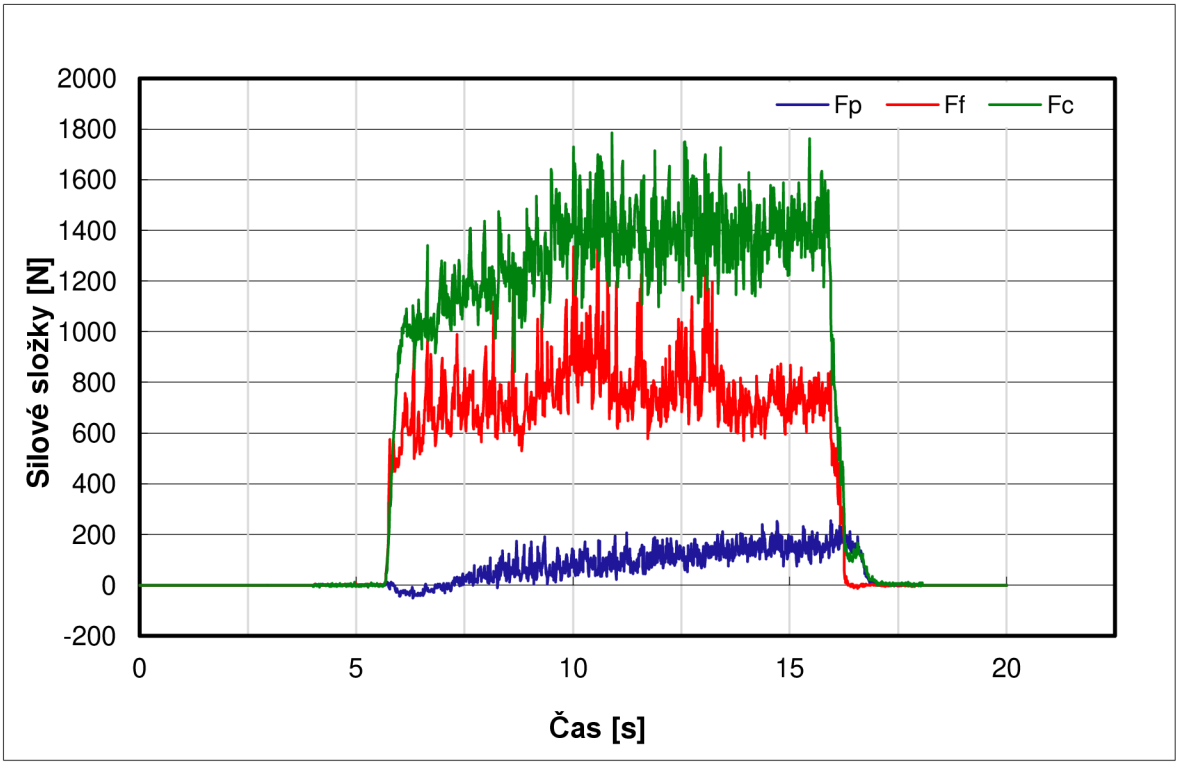
Obr. 4.29 Silový průběh jednotlivých složek celkové řezné síly při x = 0,19 mm.



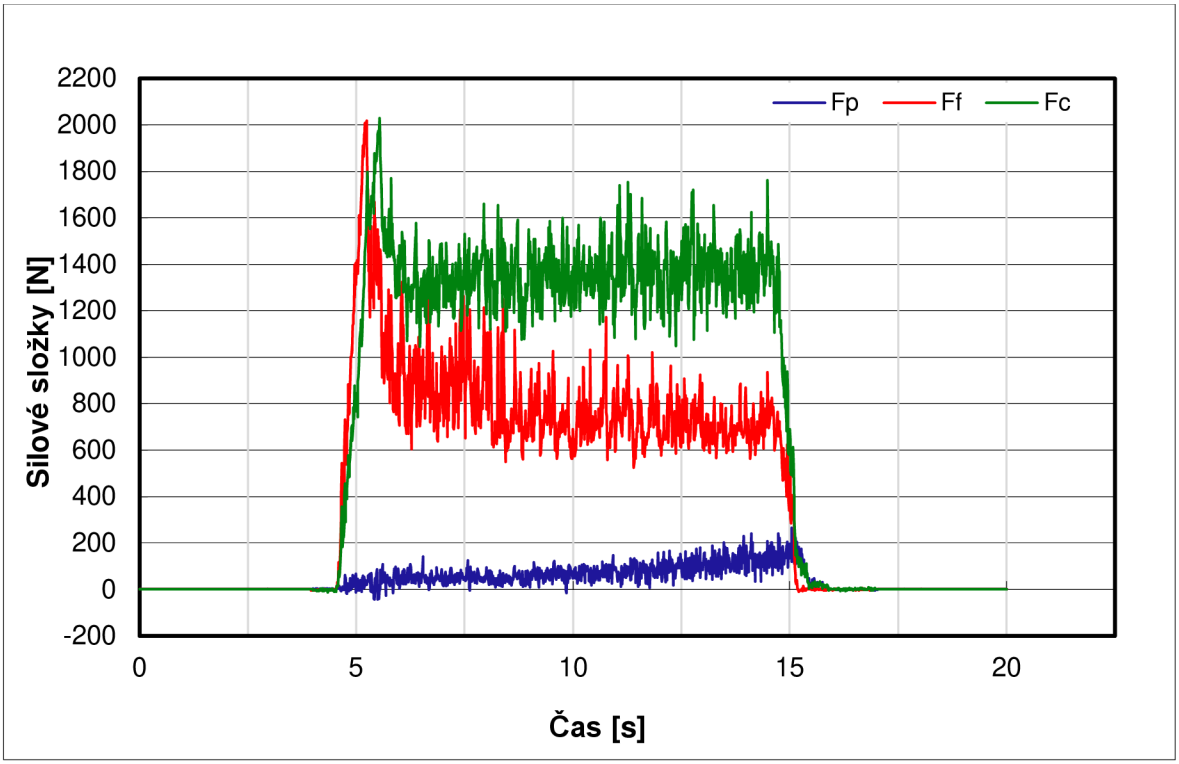
Obr. 4.30 Silový průběh jednotlivých složek celkové řezné síly při x = 0,22 mm.



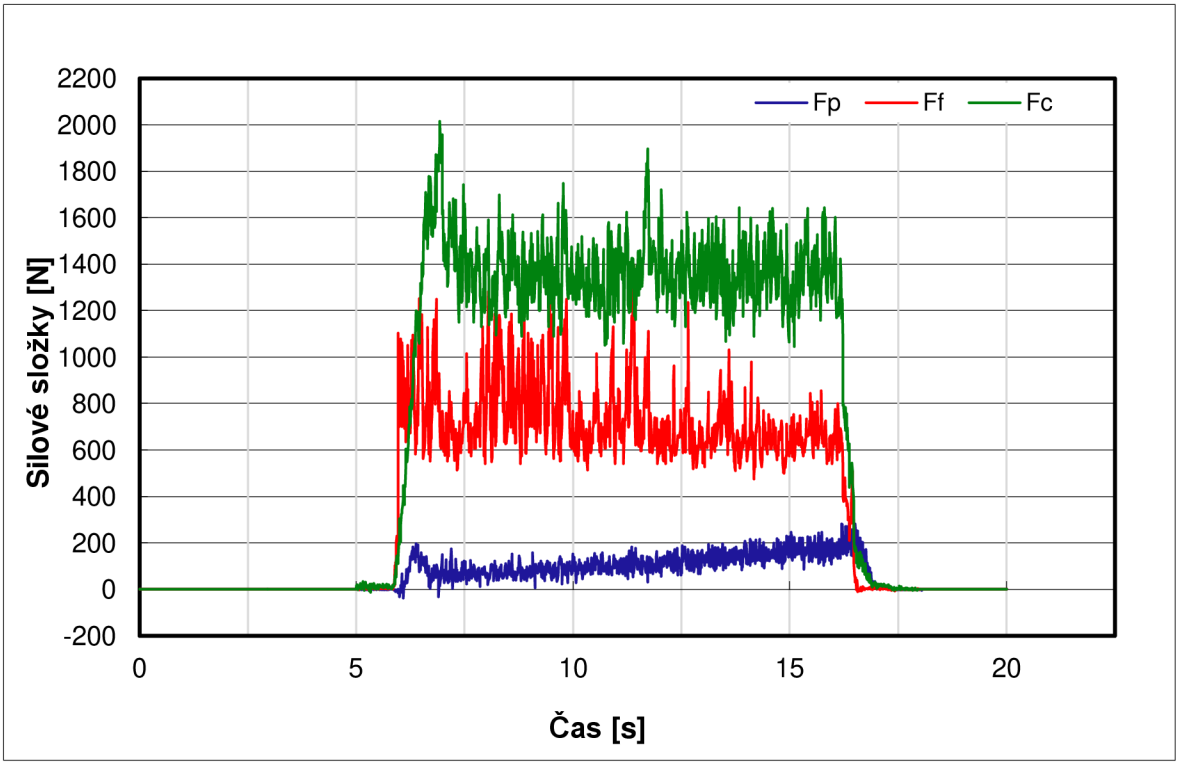
Obr. 4.31 Silový průběh jednotlivých složek celkové řezné síly při x = 0,28 mm.



Obr. 4.32 Silový průběh jednotlivých složek celkové řezné síly při x = 0,35 mm.



Obr. 4.33 Silový průběh jednotlivých složek celkové řezné síly při x = 0,43 mm.



Obr. 4.34 Silový průběh jednotlivých složek celkové řezné síly při x = 0,55 mm.

4.2.10 Vyhodnocení výsledků

Všechny naměřené hodnoty silového zatížení nástroje u jednotlivých opotřebení byly statisticky zpracovány a byla vypočítaná celková řezná síla F podle vzorce 1.6. Z grafů 4.25 až 4.34 byly použity pouze hodnoty, které byly naměřeny při vlastním procesu zapichování, tj bez náběhu a přeběhu.

Tab. 4.7 Statistické hodnoty pasivní síly F_p.

x [mm]	minimum	maximum	aritmetický průměr	medián	směrodatná odchylka
0,00	-5,646	274,506	101,859	97,351	54,083
0,03	-4,729	309,849	92,878	91,268	52,626
0,08	3,589	254,549	105,753	101,459	56,010
0,12	-15,111	327,696	158,947	161,916	68,385
0,19	48,837	286,747	142,084	137,840	41,187
0,22	-39,760	301,495	115,562	122,172	53,707
0,28	-24,863	287,905	82,926	73,712	50,579
0,35	-16,036	229,227	71,693	66,969	36,305
0,43	-32,196	252,380	90,950	89,264	51,808
0,55	4,700	228,528	107,233	105,192	38,944

Tab. 4.8 Statistické hodnoty posuvové síly F_f.

x [mm]	minimum	maximum	aritmetický průměr	medián	směrodatná odchylka
0,00	367,975	663,708	505,103	504,608	48,237
0,03	395,874	671,450	514,006	514,216	47,155
0,08	398,337	725,339	526,290	522,976	47,137
0,12	304,115	656,933	474,139	472,872	64,737
0,19	409,030	797,727	562,190	559,796	65,634
0,22	514,127	1161,190	701,849	695,798	72,934
0,28	-13,472	1125,860	675,491	678,385	140,748
0,35	523,559	1323,330	768,553	731,487	136,117
0,43	529,319	1262,380	770,971	747,176	125,068
0,55	475,773	1397,650	732,146	688,230	158,305

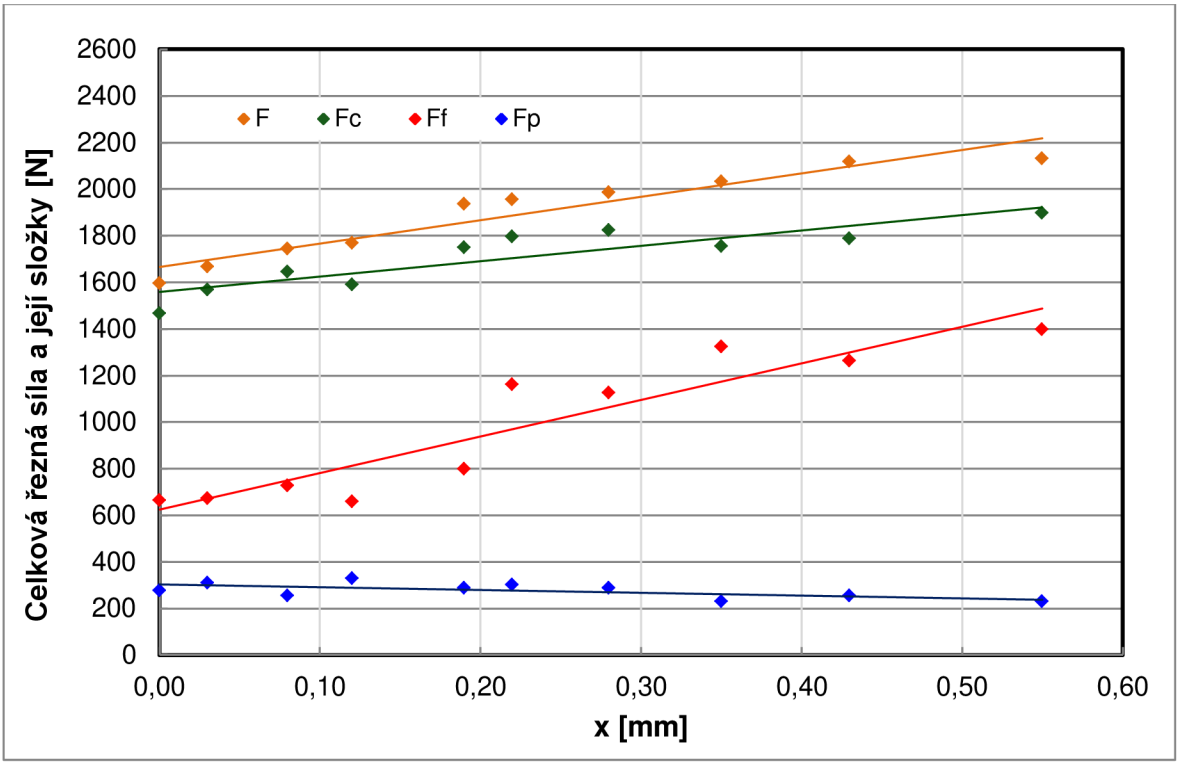
Tab. 4.9 Statistické hodnoty řezné síly F_c.

x [mm]	minimum	maximum	aritmetický průměr	medián	směrodatná odchylka
0,00	840,85	1464,73	1082,21	1073,58	101,90
0,03	851,33	1567,58	1172,54	1171,00	121,02
0,08	901,40	1644,82	1224,68	1229,49	128,83
0,12	854,23	1588,46	1220,19	1237,18	154,33
0,19	947,34	1748,99	1306,53	1304,77	146,85
0,22	924,57	1795,68	1302,10	1295,70	139,01
0,28	53,41	1821,12	1271,26	1307,94	244,20
0,35	1045,45	1753,54	1348,93	1342,34	116,00
0,43	841,77	1785,85	1336,75	1337,59	151,92
0,55	1050,86	1895,53	1358,61	1354,83	128,32

Tab. 4.10 Statistické hodnoty celkové řezné síly F.

x [mm]	minimum	maximum	aritmetický průměr	medián	směrodatná odchylka
0,00	909,59	1594,15	1187,65	1179,02	110,00
0,03	960,88	1667,01	1285,07	1281,48	125,89
0,08	991,15	1742,02	1339,20	1339,59	133,77
0,12	821,16	1767,56	1320,68	1348,11	185,43
0,19	618,79	1934,99	1441,99	1450,09	169,45
0,22	1088,99	1954,97	1454,06	1455,18	155,39
0,28	1151,00	1983,52	1480,39	1475,31	135,27
0,35	1203,66	2030,51	1558,79	1545,36	137,40
0,43	1029,39	2116,53	1549,40	1544,03	174,15
0,55	1191,70	2130,38	1552,80	1534,46	158,72

Maximální hodnoty celkové řezné síly a jejích složek byly vyneseny do grafu, který je na obrázku 4.35.



Obr. 4.35 Graf závislosti celkové řezné síly a jejích složek na hloubce opotřebení x.

Z grafu na obrázku 4.35 je patrné, že celková maximální řezná síla se zvyšuje a to od hodnoty F=1594 N, kdy byl zapichovací nůž nový až po hodnotu F=2130 N, kdy opotřebení na hřbetě VB dosáhlo hodnoty 3,28 mm, což je hodnota velmi vysoká a v běžném provozu se takto opotřebovaný nástroj nepoužívá. Z grafu je též patrné, že maximální hodnoty posuvové síly F_f rostou rychleji než maximální hodnoty řezné síly F_c.

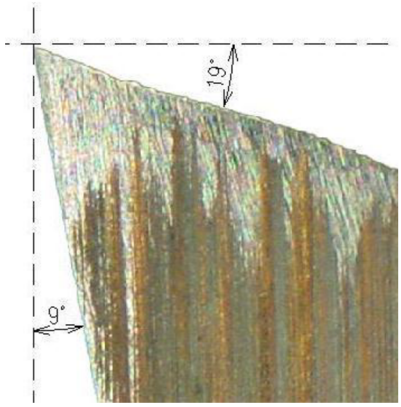
Při soustružení se měnil i tvar a barva třísky v závislosti na velikosti opotřebení. U nového nástroje se tvořila dlouhá prostorově vinutá tříska. Vinutí bylo velmi husté a barva třísky byla stejná jako výchozí polotovar jak je vidět na obrázku 4.36. Při opotřebení na hřbetě VB = 1,13 mm byla třísky mírně zbarvena do mosazné barvy. Vinutí třísky bylo prostorové, ale nebylo tak husté jako u třísky vytvořené novým nástrojem. Tříska byla kratší a je vyobrazena na obrázku 4.37. Fialovou barvu měla tříska při velkém opotřebení nástroje na hřbetě VB = 3,28 mm. Tato tříska je krátká a vinutá a je vyobrazena na obrázku 4.38.

Obr. 4.36 Tvar a barva třísky u nového nástroje VB = 0,00 mm

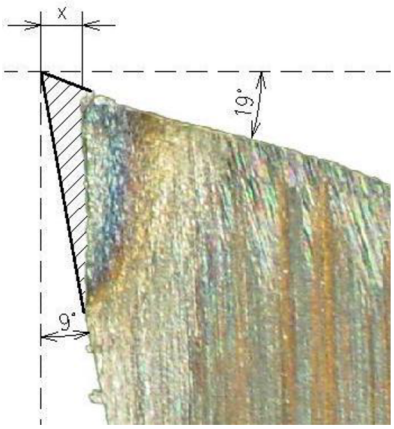
Obr. 4.37 Tvar a barva třísky při opotřebení na hřbetě VB = 1,13 mm

Obr. 4.38 Tvar a barva třísky při opotřebení na hřbetě VB = 3,28 mm

Během soustružení docházelo k tepelnému ovlivnění řezného nástroje, jak je vidět na obrázku 4.39. Vyšrafovaná oblast představuje opotřebovaný materiál nástroje. Na obrázku 4.38 je fotografie nového nástroje s vyznačenou geometrií.



Obr. 4.38 Detail řezného klínu u nového nástroje.



Obr. 4.39 Detail řezného klínu u opotřebovaného nástroje, x = 0,19 mm.

DISKUZE

Nárůst objemového opotřebení nástroje v závislosti na hloubce opotřebení na hřbetě x není lineární. Funkcí závislosti je parabola a to u různých tvarů ostří (ostrý břit, břit s fazetkou a rektifikované ostří). Závislost opotřebení na hřbetě VB na hloubce opotřebení x je lineární.

Objem opotřebení v závislosti na hloubce opotřebení na hřbetu x narůstá nejrychleji u nástroje s rektifikovaným ostřím, což je dáno právě zaoblením řezné hrany. Nejpomaleji objem opotřebení narůstá u nástroje s ostrým břitem.

Rozdíl mezi objemem opotřebení nástroje s konstantní šířkou ostří a proměnnou šířkou ostří (reálný stav) je u opotřebení na hřbetě VB = 0,7 asi 0,5%, což se může v dalších výpočtech zanedbat a může se používat pouze konstantní šířka hlavního ostří.

Z grafů silového zatížení nástroje je evidentní, že síly působící na řezný se zvyšují s mírou opotřebení nástroje. Celková řezná síla se zvýšila z 1594 N na 2130 N a opotřebení na hřbetě dosáhlo hodnoty 3,28 mm, což je hodnota velmi vysoká a v běžném provozu se takto opotřebovaný nástroj nepoužívá.

Hodnoty posuvové síly Ff, rostou s opotřebením rychleji než řezná síla F_c a s mírou opotřebení více ovlivňuje celkovou řeznou sílu, která působí na řezný nástroj. Pasivní složka řezné síly se po celou dobu měření neměnila.

4.3 Návrhy pokračování řešení

Opotřebení nástroje bylo simulováno na brusce BND 17 TOS Hostivař a všechny závislosti jak objemového opotřebení, tak opotřebení na hřbetě byly vztahovány k hloubce opotřebení na hřbetě x. Objem opotřebení nástroje se vypočítal pomocí goniometrických funkcí, ale u složitější geometrie nástroje, by bylo vhodné využít 3D scan (InfiniteFocus standard) pro měření povrchů, který by přesně změřil objem opotřebení nástroje.

Tato práce představuje novou metodu, která bude posuzovat opotřebení nástrojů pomocí objemového opotřebení, které bude hrát významnou roli pro hrubovací i dokončovací operace. Na tuto práci mohou navazovat i jiné práce, které se budou zabývat stanovením optimálních parametru opotřebení nástroje vzhledem k požadovaným kvalitativním a výkonnostním ukazatelům. Na tuto práci mohou také navazovat práce, které by se zabývali hodnocením objemového opotřebení nástroje v závislosti na čase.

ZÁVĚR

V této diplomové práci bylo teoreticky vypočítáno objemové opotřebení nástrojů V pro tři různé tvary ostří (ostrý břit, břit s fazetkou a rektifikované ostří) v závislosti na hloubce opotřebení nástroje x. Byly vypočítány hodnoty opotřebení na hřbetě VB pro stejné tvary ostří v závislosti na hloubce opotřebení x. Vzorce pro výpočet byly odvozeny pomocí goniometrických funkcí. Při experimentu se sledoval průběh silového zatížení nástroje pro zapichování v různých stádiích opotřebení a sledovala se hloubka opotřebení na hřbetě x. Z výpočtů a experimentu bylo prokázáno že:

- objem opotřebení nástroje v závislosti na hloubce opotřebení na hřbetě narůstá nejrychleji u břitu s rektifikovaným ostřím, kdy objem opotřebení je při hloubce opotřebení x = 0,1 mm o cca 13,3% větší než u ostrého břitu,
- u břitu s fazetkou narůstá objem opotřebeného materiálu pomaleji a u hloubky opotřebení na hřbetě x = 0,1 je objem opotřebení nástroje o cca 4% větší než u nástroje s ostrým břitem,
- při porovnání opotřebení na hřbetě VB v závislosti na hloubce opotřebení x je rozdíl u ostrého břitu a břitu s rektifikovaným ostřím cca 7,6% a u ostrého břitu a břitu s fazetkou cca 3,1%,
- v experimentu u hloubky opotřebení hřbetu x = 0,12 mm (VB = 0,7 mm) je rozdíl mezi objemem opotřebení nástroje s konstantní šířkou ostří a proměnnou šířkou ostří (reálnou) cca 0,5%,
- v průběhu experimentu docházelo k nárůstu řezné síly o cca 29%, posuvové síly o 110% a celkové řezné síly o cca 34% oproti hodnotám, které byly naměřeny u nového nástroje,
- během experimentu se utvářely třísky, které byly z počátku hustě svinuté a stříbrné barvy, potom zbarvení přecházelo v mosaznou barvu a na konci experimentu byly třísky barvy fialové a prostorové svinutí nebylo tak husté.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. AB SANDVIK COROMANT. *Technická příručka obrábění: Soustružení - frézování - vrtání - vyvrtávání - upínání nástrojů*. Elanders. Švédsko, 2005.

2. KOCMAN, Karel a Jaroslav PROKOP. *Technologie obrábění*. 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2005, 270s. ISBN 80-214-3068-0.

3. FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2012, 225. ISBN 80-214-2374-9.

4. HUMÁR, A. *Technologie I, Technologie obrábění – 1. část: Studijní opory pro magisterskou formu studia* [online]. Brno: VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2003, Copyright © 2013 UST [cit. 2013-05-18]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/?page=opory.

5. PRAMET TOOLS, s.r.o., ČR: Příručka obrábění 2004. [online]. [cit. 2013-05-14]. Dostupné z: http://sphinx-eg.org/photo/prirucka_cz_2004.pdf.

6. PRAMET TOOLS, s.r.o., ČR: Zapichovací program. [online]. [cit. 2013-05-14]. Dostupné z: http://www.pramet.com/cz/produkty/soustruzeni/noze-pro-upichovani-a-zapichovani.html.

7. HUMÁR, A. *Materiály pro řezné nástroje*. 1. vyd. Praha: MM publishing, s.r.o., 2008, 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.

8. PRAMET TOOLS, s.r.o. *Soustružení 2012* [online]. 2012, 340 s., © Copyright Pramet 2013 [cit. 2013-05-14]. Dostupné z: http://www.pramet.com/cz/ke-stazeni.html.

9. SANDVIC COROMANT - SANDVIC CZ, s.r.o.: Povlakovaný slinutý karbid. [online]. [cit. 2013-05-14]. Dostupné z: http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/cutting_tool_materials/coated_cemented_carbide/pages/default.aspx.

10. HUMÁR, A. Trendy vývoje materiálů pro řezné nástroje. In Sborník odborné konference Frézování III. FSI VUT v Brně, Ústav strojírenské technologie ve spolupráci s PRAMET TOOLS, s.r.o. Šumperk a ZPS – Frézovací nástroje, a.s., Zlín. Brno, 2003, ISBN 80-214-2436-2, s. 5-14.

11. SANDVIC COROMANT - SANDVIC CZ, s.r.o.: Opotřebení břitové destičky. *Upichování a zapichování*. [online]. [cit. 2013-05-19]. Dostupné z: http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/parting_grooving/troubleshooting/insert_wear/pages/default.aspx.

12. KUTTOLAMADOM, Mathew A. a M. Laine MEARS. On the Volumetric Assessment of Tool Wear in Machining Inserts With Complex Geometries: Need, Methodology and Validation.*ASME 2011 International Manufacturing Science and Engineering Conference, Volume 2*. ASME, 2011, s. 313-322. DOI: 10.1115/MSEC 2011-50278. Dostupné z: http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/ proceeding.aspx?articleid=1623499.

13. LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. 4., dopl. vyd. Úvaly: Albra, 2008, xiv, 914 s. ISBN 978-80-7361-051-7.

14. Kistler measure, analyze, innovate. KISTLER, s.r.o. [online]. © 2013 Kistler Holding AG [cit. 2013-05-21]. Dostupné z: http://www.kistler.com/cz/en/products/Overview.

15. TOS KUŘIM. Dokumentace ke stroji SU50A – SP.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
A	[mm^2]	plocha opotřebení nástroje u ostrého břitu
A_D	[mm^2]	plocha průřezu třísky
Aα	[-]	hlavní hřbet nástroje
Aα’	[-]	vedlejší hřbet nástroje
Aγ	[-]	čelo nástroje
B	[mm^2]	plocha opotřebení nástroje u břitu s fazetkou
C	[mm^2]	plocha opotřebení nástroje u rektifikovaného ostří
C_{Fc}, C_{Ff}, C_{Fp}	[-]	materiálové konstanty
D	[mm]	průměr obrobku
E_c	[J]	práce řezání
E_e	[J]	práce řezného procesu
E_f	[J]	práce posuvu
F	[N]	celková řezná síla
F_c	[N]	řezná síla
F_f	[N]	posuvová síla
F_p	[N]	pasivní síla
HB	[-]	tvrdost podle Brinella
KT	[mm]	hloubka výmolu na čele
P_c	[kW]	řezný výkon
Re	[MPa]	mez kluzu
Rm	[MPa]	střední mez pevnosti v tahu
S	[-]	hlavní ostří
S’	[-]	vedlejší ostří
V	[mm^3]	objem opotřebení nástroje
V_A	[mm^3]	objem opotřebení nástroje u ostrého břitu
V_B	[mm^3]	objem opotřebení nástroje u břitu s fazetkou
V_C	[mm^3]	objem opotřebení nástroje u rektifikovaného ostří
VB	[mm]	opotřebení na hřbetě
VB_A	[mm]	opotřebení na hřbetě u ostrého břitu
VB_B	[mm]	opotřebení na hřbetě u břitu s fazetkou
VB_C	[mm]	opotřebení na hřbetě u rektifikovaného ostří

a	[mm]	délka fazetky
a_p	[mm]	šířka záběru hlavního ostří
f	[mm]	posuv na otáčku
k_c	[MPa]	měrný řezný odpor
n	[min^{-1}]	otáčky obrobku
r	[mm]	poloměr zaoblení břitu nástroje
t	[s]	čas řezného procesu
v_c	[$m.min^{-1}$]	řezná rychlost
v_e	[$m.min^{-1}$]	celková řezná rychlost
v_f	[$m.min^{-1}$]	posuvová rychlost
x	[mm]	hloubka opotřebení na hřbetě
x_{Fc}, x_{Ff}, x_{Fp}	[-]	exponenty vlivu šířky záběru a_p
y_{Fc}, y_{Ff}, y_{Fp}	[-]	exponenty vlivu posuvu f
α_o	[°]	ortogonální úhel hřbetu
β_o	[°]	ortogonální úhel břitu
γ_o	[°]	ortogonální úhel čela
ε	[°]	úhel fazetky
κ_r	[°]	úhel nastavení hlavního ostří
κ_r'	[°]	úhel nastavení vedlejšího ostří
π	[-]	Ludolfovo číslo
φ	[°]	úhel nastavení ostří na směr hlavního pohybu
CVD		Chemical Vapur Deposition
PVD		Physical Vapur Deposition
MTCVD		Medium Temperature Chemical Vapor Deposition
MWPCVD		MicroWave Plasma Chemical Vapor Deposition
PCVD		Plasma Chemical Vapor Deposition
PKD		polykrystalický diamant
PKNB		polykrystalický kubický nitrid bóru
RO		rychlořezná ocel
SK		slinutý karbid
VBD		vyměnitelná břitová destička

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 Technické parametry soustruhu SU50A – SP

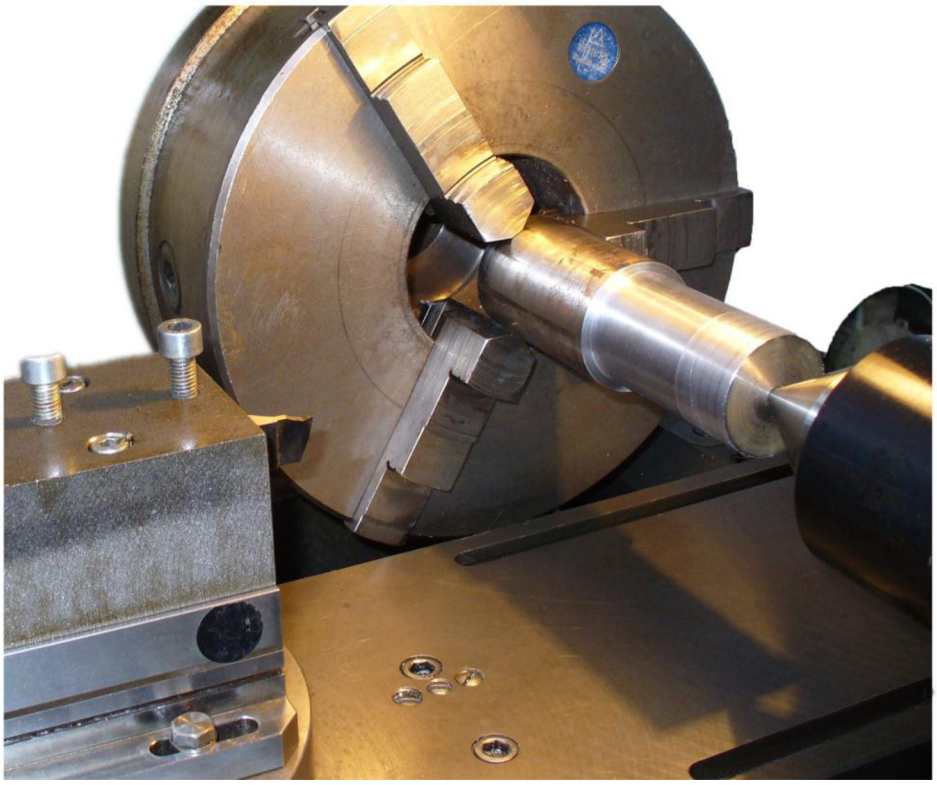
Příloha 2 Fotodokumentace

Příloha 1 Technické parametry soustruhu SU50A – SP 10 [15]

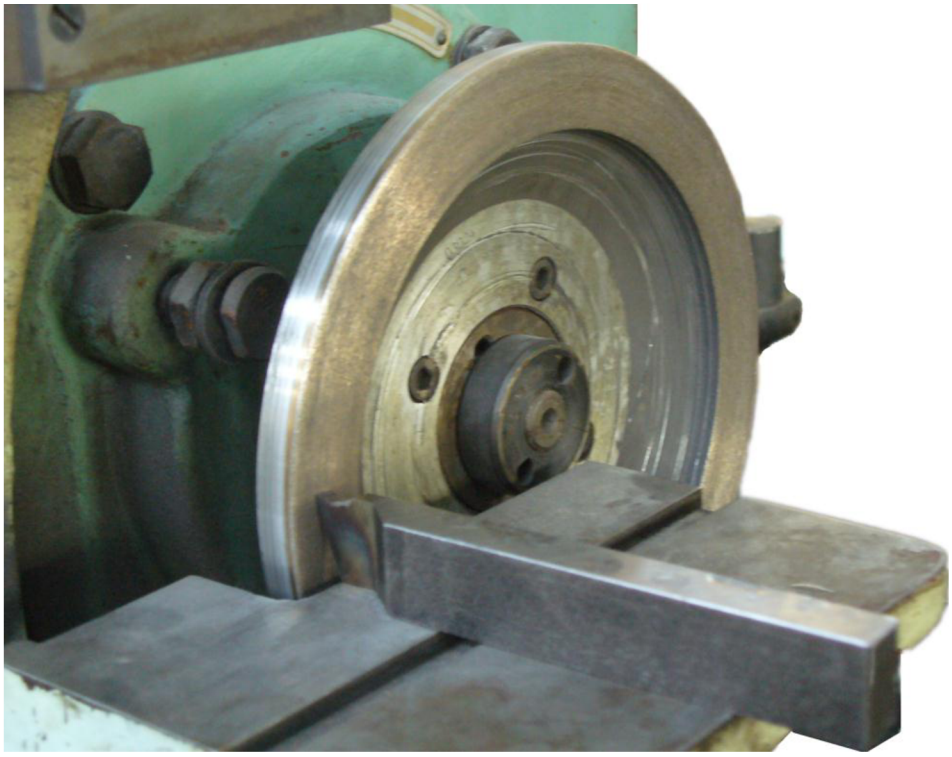
Hlavní technické údaje

Oběžný průměr nad ložem	[mm]	500
Oběžný průměr nad suportem	[mm]	250
Oběžný průměr v prohloubení	[mm]	
Oběžný průměr v opěrce pevné	[mm]	25-140-250
Oběžný průměr v opěrce souběžné	[mm]	25-140
Vzdálenost hrotů	[mm]	1000, 1500, 2000
Točná délka při použití kužel. pravítka	[mm]	350
Vrtání vřetena	[mm]	56
Kužel ve vřetenu		Morse 6
Kužel hrotů		Morse 5
Přední konec vřetena	[mm]	220 ČSN 20 10 11
Průměr předního ložiska	[mm]	105
Šířka lože	[mm]	420
Průměr upínací desky	[mm]	500
Průměr unášecí desky	[mm]	265
Průměr sklíčidla	[mm]	250
Rozměr čtyřnožné hlavy	[mm]	160x160
Největší průřez lože	[mm]	32x32
Průměr objímky koníku	[mm]	85
Zdvih objímky koníku	[mm]	220
Kužel v objímce koníku		Morse 5
Největší váha obráběného kusu	[kg]	1120
Otáčky vřetena: počet stupňů		22
rozsah otáček	[min^{-1}]	11,2 – 1400
Součinitel odstup. rychl. vřetena		1,25
Průměr a stoupání vodícího šroubu	[mm]	50x12
Závity: metrické se stoupáním	[mm]	0,5 – 36 poč. 38
whitworthské, počet chodů na 1”		7/8 – 72 poč. 48
modulové s modulem		0,5 – 18 poč. 28
Diametral pitch		1 5/8 – 72 poč. 40
Počet motorů pro hlavní pohon stroje		2
Otáčky	[min^{-1}]	1400
Výkon motoru pro hlavní pohon stroje	[kW]	11
Motor pro čerpadlo na chladicí kapalinu:		
otáčky	[min^{-1}]	2800
výkon		0.175
Motor pro rychloposuv:	[min^{-1}]	2800
otáčky	[kg]	4000
výkon	[kg]	1600
Půdorysná plocha stroje (šířka x délka)	[mm]	1180x3775
Váha stroje s normálním příslušenstvím	[kg]	2800

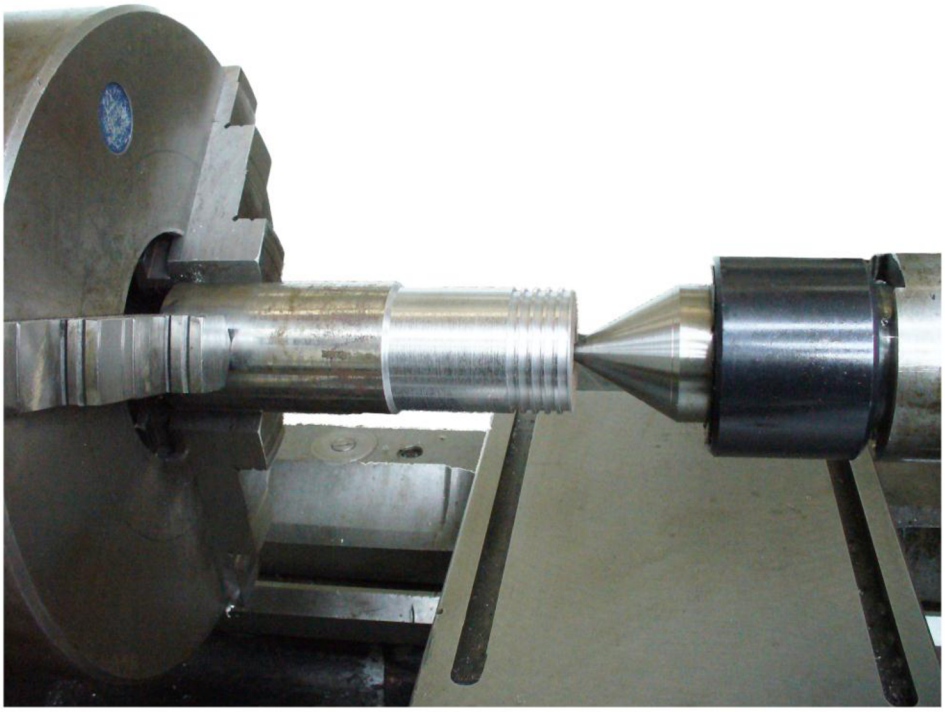
Příloha 2 Fotodokumentace



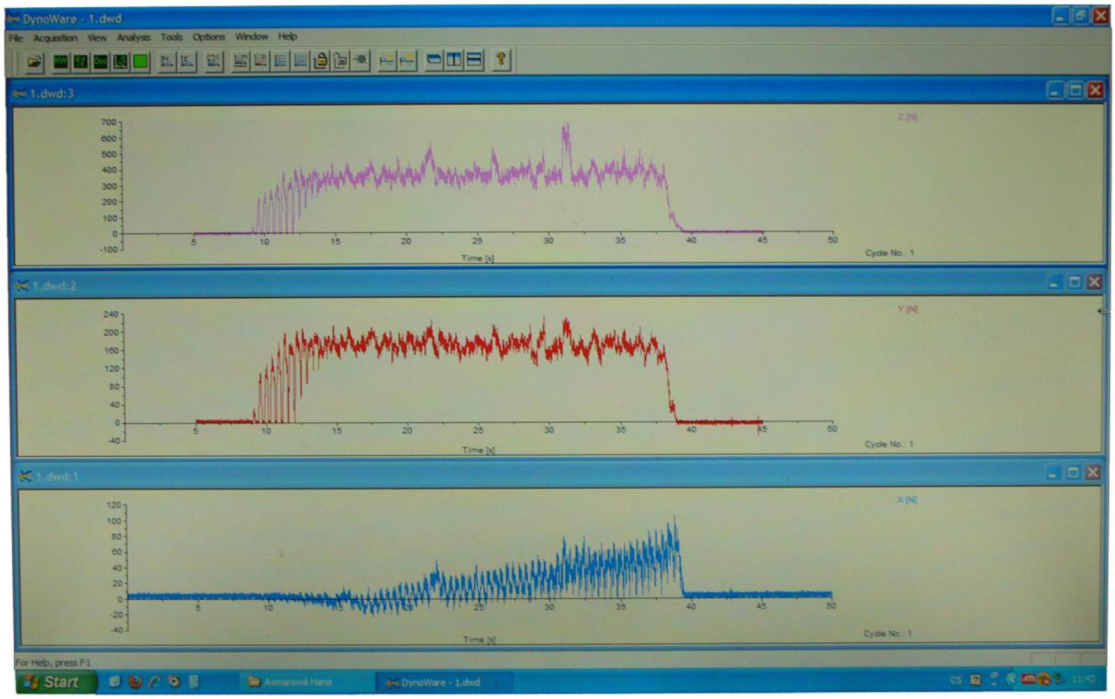
Dynamometr Kistler s nožovým držákem a s nožem pro zapichování.



Bruska BND 17 TOS Hostivař při simulaci opotřebení.



Zkušební vzorek upnutý ve sklíčidle a podepřený hrotem koníku v průběhu experimentu.



Vyhodnocení řezných sil pomocí softwaru DynoWare.