



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
AUTHOR

Bc. JAN MATOUŠEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. MIROSLAV PÍŠKA, CSc.

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Jan Matoušek

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 a novými metodami hodnocení jejich opotřebení.

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.
5. HUMÁR, A., PÍŠKA, M. Moderní řezné nástroje a nástrojové materiály. MM Průmyslové spektrum. Speciální vydání včetně CD. 110 s. Praha, 2004, ISSN 1212-2572.
6. KOURIL, 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.
7. KUTTOLAMADON, M.A., MEARS, M.L., KURFESS, T.R. On the Volumetric Assessment of Tool Wear in Machining Inserts With Complex Geometries – Part I: Need, Methodology and Standardization. Transactions of the ASME. Journal of International Manufacturing Science and Engineering. October 2012, Vol. 134, pp. 051002-1-8. ISSN 1087-1357.
8. KUTTOLAMADON, M.A., MEARS, M.L., KURFESS, T.R., BURGER, U. On the Volumetric Assessment of Tool Wear in Machining Inserts With Complex Geometries – Part II: Experimental Investigation and Validation on Ti-6Al-4V. Transactions of the ASME. Journal of International Manufacturing Science and Engineering. October 2012, Vol. 134, pp. 051003-1-9. ISSN 1087-1357.

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

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/2015.

V Brně, dne

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Předkládaná diplomová práce pojednává o vlivu geometrie řezného nástroje s nenulovým úhlem κ_r a řezných podmínek na změnu celkové deformace řezného nástroje při procesu upichování a zapichování. Při experimentech bylo měřeno silové zatížení řezného nástroje, na základě naměřených dat byl vytvořen jednoduchý 3D model řezného nástroje, byla provedena deformační analýza řezného nástroje pomocí simulačního programu ANSYS a na základě zjištěných skutečností byl vyvozen závěr o chování řezného nástroje během procesu upichování a zapichování.

Klíčová slova

upichování, zapichování, řezný nástroj, úhel kapa, řezné podmínky, deformace řezného nástroje, ANSYS.

ABSTRACT

The thesis in question deals with the influence of geometry of the cutting tool with a non-null angle κ_r and of the cutting conditions on change of cutting tool's overall deformation during the process of cutting-off and grooving. When conducting the experiments the loading of cutting tool was measured, there was created a simple 3D model of the cutting tool based on measured data, the deformation analysis of the cutting tool by the simulation programme ANSYS was performed and on the grounds of established facts there was made a conclusion on attributes of the cutting tool during the process of cutting-off and grooving.

Key words

cutting-off, grooving, cutting tool, kappa angle, cutting conditions, deformation of the cutting tool, ANSYS.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MATOUŠEK, Jan. *Moderní řezné nástroje pro zapichování a upichování*. Brno 2014. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 59 s. Vedoucí práce prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.

PROHLÁŠENÍ

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

Datum

Bc. Jan Matoušek

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce panu prof. Ing. Miroslavu Píškovi, CSc. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce. Rovněž děkuji Ing. Stanislavu Žákovi a Jiřímu Čechovi za pomoc a spolupráci při provedení a vyhodnocení experimentů i Ing. Evě Mollikové, Ph.D., Paed IGIP za rady při vypracování diplomové práce. Dále děkuji celé své rodině za trpělivost a podporu, kterou mi poskytovala po celou dobu studia.

OBSAH

ABSTRAKT	4
PROHLÁŠENÍ.....	5
PODĚKOVÁNÍ	6
OBSAH.....	7
ÚVOD.....	9
1. Upichování a výroba zápichů	10
1.1 Charakteristika upichovacího a zapichovacího procesu	10
1.1.1 Upichování.....	10
1.1.2 Zapichování	11
1.2 Faktory ovlivňující řezný proces	11
1.2.1 Geometrie břitu, nastavení a silové zatížení nástroje	11
1.2.2 Utváření a odvod třísky.....	13
1.2.3 Stabilita pracovního procesu.....	13
1.2.4 Řezné podmínky	14
1.2.5 Význam úhlů, rychlostní poměry a kritický průměr.....	15
1.3 Opotřebení nástroje.....	17
1.3.1 Abraze	18
1.3.2 Adheze	18
1.3.3 Difuze.....	19
1.3.4 Oxidace	19
1.3.5 Plastická deformace	20
1.3.6 Křehký lom	20
1.3.7 Kritéria opotřebení	21
1.3.8 Faktory ovlivňující opotřebení nástroje.....	22
1.3.9 Trvanlivost nástroje	23
1.4 Tříska a její průřez	23
1.5 Nástroje pro upichování a zapichování.....	24
1.5.1 Moderní trendy v konstrukci řezných nástrojů.....	25
1.5.2 Příklady konstrukcí modulárních řezných nástrojů firmy ISCAR.....	25
1.5.2.1 TANG-GRIP IQ.....	25
1.5.2.2 PENTAIQGRIP	26
1.5.2.3 Moderní způsoby upínání vyměnitelných břitových destiček	26
1.5.3 Pokročilé materiály pro výrobu nástrojů	27
1.5.3.1 Povlakované slinuté karbidy.....	27

2.	Praktická část práce	29
2.1	Experimentální materiál.....	29
2.2	Parametry nástroje	29
2.3	Technické parametry použitého strojního zařízení	30
2.4	Technické parametry měřicího zařízení.....	31
2.5	Popis experimentu.....	32
2.6	Výsledky experimentu	34
2.7	Zpracování výsledku experimentu.....	37
2.8	Výpočet kritického průměru	46
3.	Diskuse výsledků	47
3.1	Vliv řezné rychlosti při konstantním posuvu.....	47
3.2	Grafická vizualizace	48
3.3	Kritický průměr.....	54
	Závěr	55
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	56
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	58

ÚVOD

Obrábění je určitý druh procesu, při kterém polotovar získává požadovaný tvar a rozměr. Probíhá odebráním částic materiálu pomocí nástroje, jehož břit je přitom namáhán řeznými silami a teplem. Velikost řezných sil je podmíněná odporem materiálu proti jeho porušení. Technologie obrábění můžeme rozdělit na několik způsobů a to soustružení, frézování, vrtání, atd.

Při soustružení je materiál odebírán pomocí jednobřitého nástroje, kdy hlavní pohyb (rotaci) vykonává obrobek a další posuvový pohyb (přímočarý) provádí nástroj. Zvláštním druhem soustružení je upichování a zapichování. Pohyb nástroje probíhá pouze v jednom směru a to radiálním k ose obrobku a tím lze vytvořit drážku nebo oddělit materiál. Stopa řezného nástroje má tvar Archimédovy spirály.

Velký důraz je také kladen na materiál nástroje. V dnešní době jsou nejvíce používány povlakované vyměnitelné břitové destičky ze slinutých karbidů. Dále jsou to řezná keramika, cermety, polykrystalický kubický nitrid boru, polykrystalický diamant. Snahou všech výrobců je neustále zdokonalovat své řezné nástroje.

Tato diplomová práce se zabývá chováním upichovacího nože s nenulovým úhlem nastavení k podélné ose obrobku v procesu upichování. Bude proveden rozbor silového zatížení a provedena deformační analýza pomocí programu ANSYS.

1. UPICHOVÁNÍ A VÝROBA ZÁPICHŮ

Základní cíle procesů upichování a zapichování jsou stejné jako u všeobecných soustružnických operací: tedy dosáhnout požadovaného tvaru obráběného dílu, vyhovět specifikacím přesnosti a maximalizovat produktivitu. Upichování a zapichování se ovšem navíc odlišuje specifickými problémy s ohledem na pevnost a tuhost nástroje a na řízení utváření a odvodu třísek [5].

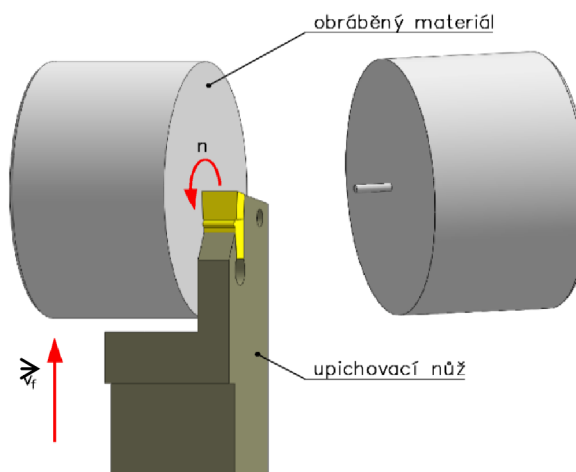
1.1 Charakteristika upichovacího a zapichovacího procesu

Upichování a zapichování je fyzikální-mechanický proces, kterému se říká řezání. Je to proces, při kterém dochází k oddělování částic materiálu ve tvaru třísky břitem nástroje. Při upichování a zapichování se využívá kombinace dvou pohybů tj. rotace obrobku a posuv nástroje, kdy nástroj koná posuv směrem k ose obrobku.

1.1.1 Upichování

Při technologickém procesu upichování je cílem co nejefektivněji oddělit opracovanou část obrobku od polotovaru nebo jednu část obrobku od druhé. Při upichování se nástroj pohybuje od obvodu obrobku k jeho ose, přičemž řezná rychlost klesá na nulu. Průměr obrobku se zmenšuje, až se obrobek pod vlivem radiální složky F_p odlomí dřív, než nástroj dokončí úplné upíchnutí (viz obr. 1.1). Přitom zůstává ve středu obrobku výstupek ve tvaru tenkého čepu; vhodnou geometrií břitu, změnou posuvu nebo podepřením oddělované části obrobku lze výstupek zmenšit [1].

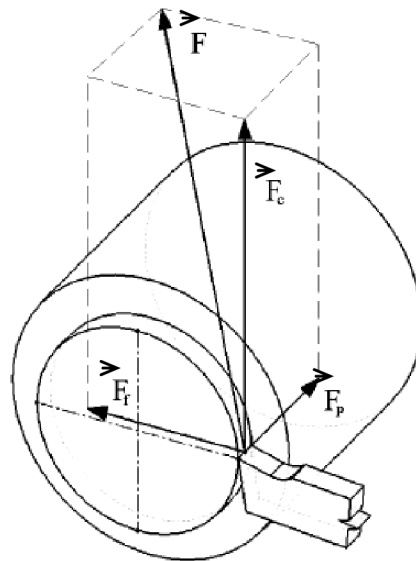
Při posuvu upichovacího nože směrem do obrobku zůstává po obou stranách břitu materiál, což klade vysoké požadavky na přístupnost břitu do obrobku. Proto musí být použité upichovací nože dostatečně úzké a rozměr základního držáku nože se zvětšuje s průměrem obrobku. To znamená, že kritickým faktorem při upichování je stabilita řezného procesu. Jelikož vyměnitelné břitové destičky a držáky musí mít takový tvar, aby umožnil optimální přístupnost břitu do obrobku. Tím zůstává jen velmi malá plocha pro odvod tepla a třísky z místa řezu. Důležitým faktorem je proto přivedení procesní kapaliny do místa řezu, která nám jak odvede teplo, tak vyplaví třísky [1].



Obr. 1.1 Schéma upichování [3].

1.1.2 Zapichování

Výroba zápichů je soustružení různého druhu drážek do obrobku, ale řez není veden až do osy obrobku (viz obr. 1.2). Rozdělujeme několik druhů drážek, a to zejména mělké, hluboké, široké, vnější, vnitřní a čelní. Při výrobě zápichů nevznikají problémy, které vznikají v konečné části upichování, když nástroj odděluje obrobek v ose. Na drážku zápichu jsou kladeny větší požadavky, jak z hlediska tolerance rozměrů šířky a hloubky zápichu, tak na kvalitu opracované plochy [1,2].



Obr. 1.2 Schéma výroby zápichu [3].

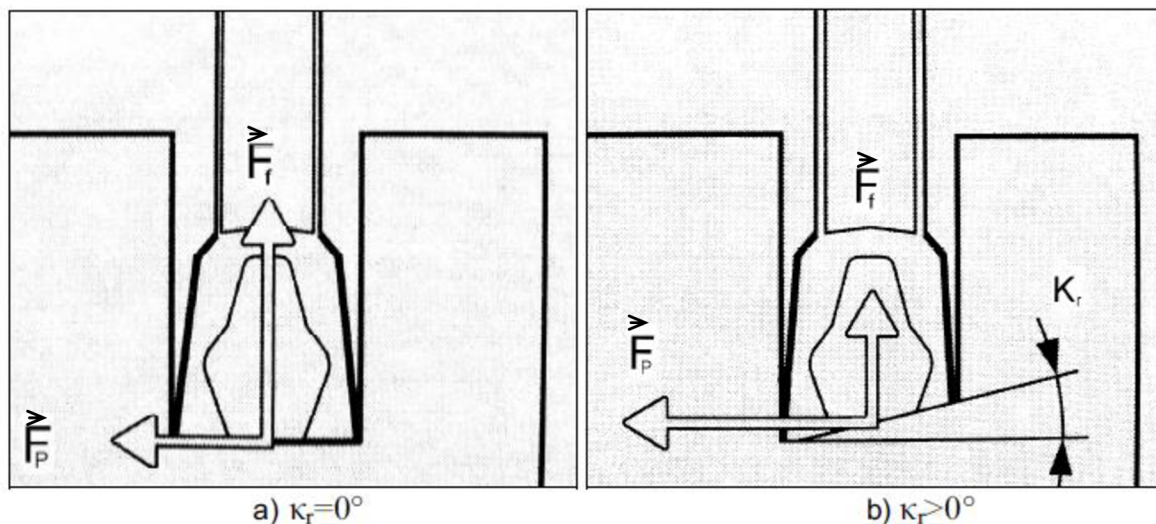
1.2 Faktory ovlivňující řezný proces

Pro hodnocení a optimalizaci řezného procesu z hlediska výkonnostního, kvalitativního a ekonomického je nezbytná znalost velikosti, směru a smyslu řezných sil a jejich změna se změnou parametrů procesu. Pochopení a znalost zákonitostí řezného procesu z pohledu řezných sil umožňuje nejen úspěšně optimalizovat jednotlivé parametry procesu, ale také předcházet kritickým situacím z oblasti bezpečnosti práce [6].

1.2.1 Geometrie břitu, nastavení a silové zatížení nástroje

Geometrické parametry břitu upichovacího nástroje mají na celkovou řeznou sílu rovněž velký vliv. Na jednotlivé složky řezné síly při zapichování (upichování) má vliv zejména úhel čela. Pozitivní úhel čela má za následek malé řezné síly. Menší pasivní síla působící na obrobek způsobí, že se zmenší zbytkový výstupek na obrobku po upichnutí. Na druhé straně je nutné brát v úvahu, že velmi pozitivní úhel čela zeslabuje břit nástroje. Také vliv nastavení úhlu hlavního ostří κ_r má značný vliv na rozložení složek celkové řezné síly F_t a F_p (viz obr. 1.3a). U rovných vyměnitelných břitových destiček je úhel nastavení hlavního ostří nulový. Tato realizace poskytuje stabilní břit, lepší jakost obrobeného povrchu a přitom mohou být dodržovány úzké tolerance rozměru. Když se úhel hlavního ostří zvětšuje, vede to k tomu, že dochází ke zvyšování pasivní složky F_p

(viz obr. 1.3b) a výsledná síla má snahu vytlačit vyměnitelnou břitovou destičku do boku. U velkých úhlů nastavení hlavního ostří může dojít k takovému vychýlení vyměnitelné břitové destičky, že obrobená plocha je buď konvexní, nebo konkávní [1].



Obr. 1.3 Vliv úhlu κ_r na složky řezné síly F_t , F_p [1].

Řezný proces se realizuje jako výsledný proces působení složité silové soustavy mezi obrobkem a nástrojem. Celková řezná síla F se zpravidla vypočítá za pomoci empirických vztahů jednotlivých složek F_c , F_f a F_p . Celkovou řeznou sílu lze vypočítat ze vztahu (1.1). Výpočet jednotlivých složek celkové řezné síly je možné provést na základě empirických vztahů [2].

$$F = \sqrt{F_c^2 + F_p^2 + F_f^2} \quad (1.1)$$

řezná síla:

$$F_c = C_{Fc} \cdot a_p^{X_{Fc}} \cdot f^{Y_{Fc}} \quad (1.2)$$

posuvová síla:

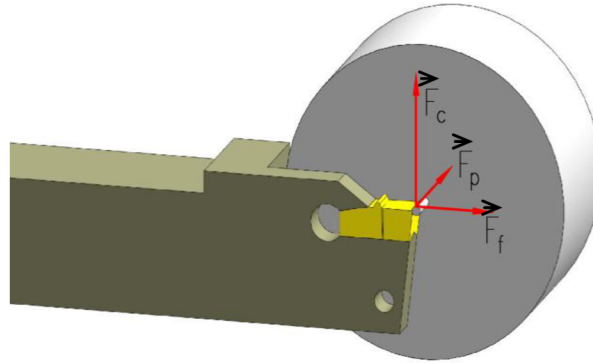
$$F_f = C_{Ff} \cdot a_p^{X_{Ff}} \cdot f^{Y_{Ff}} \quad (1.3)$$

pasivní síla:

$$F_p = C_{Fp} \cdot a_p^{X_{Fp}} \cdot f^{Y_{Fp}} \quad (1.4)$$

kde:	F	[N]	celková řezná síla,
	C_{Fc}, C_{Ff}, C_{Fp}	[-]	materiálové konstanty,
	X_{Fc}, X_{Ff}, X_{Fp}	[-]	exponent vlivu šířky záběru a_p ,
	Y_{Fc}, Y_{Ff}, Y_{Fp}	[-]	exponent vlivu posuvu f ,
	a_p	[mm]	šířka záběru ostří,
	f	[mm]	posuv na otáčku.

Konstanty C_{Fc} , C_{Ff} , C_{Fp} a exponenty x_{Fc} , x_{Ff} , x_{Fp} , y_{Fc} , y_{Ff} , y_{Fp} jsou pro konkrétní podmínky řezného procesu empiricky určené [2,4]. Rozklad celkové řezné síly F při třískovém obrábění (viz obr. 1.4).



Obr. 1.4 Rozklad celkové řezné síly F při upichování a zapichování [3].

K přímému měření složek řezných sil během obrábění jsou využívány dynamometry, které dělíme do několika skupin - mechanické, pneumatické, hydraulické, tenzometrické, kapacitní, polovodičové, indukční, piezoelektrické atd.

1.2.2 Utváření a odvod třísky

Při obrábění zápichů a upichování vznikají obráběné plochy po obou stranách ve směru posuvu. Utvářená tříška musí mít takový tvar, aby byla užší, než je vytvářená drážka, jinak by docházelo ke kontaktu se stěnami vytvářené drážky a tím by vzniklo poškození opracované plochy. Při upichování a zapichování se tříška tvoří ve dvou rovinách, v první rovině je trochu prohnuta podél šířky, ve druhé rovině je v podélném směru stáčená do spirály. Vyměnitelné břitové destičky pro upichování a zapichování jsou vyráběny s tvarovými utvářecími tříska. Vyměnitelné břitové destičky s nulovým úhlem nastavení hlavního ostří vytváří nejlepší třísky. Čím větší je úhel nastavení hlavního ostří, tím více tříška tlačí do boku stěny drážky, kde je ohýbána a tlačena proti protější boční stěně drážky. Tento případ může nastat, pokud není břit nástroje nastaven kolmo k obrobku [1].

1.2.3 Stabilita pracovního procesu

Věnovat pozornost je potřeba stabilitě pracovního procesu, jelikož nástroj pracuje v úzké a hluboké drážce, může docházet k jeho nestabilitě. Aby bylo dosaženo maximální stability, mělo by být vyložení nástroje co nejmenší. Měl by být zvolen takový nožový držák, který má pro vyráběný zápich nejmenší délku řezné části a co největší lůžko vyměnitelné břitové destičky. Další problém může nastat, pokud je obrobek hodně vysunut z upínače, mohou vzniknout vibrace. U obrobku se sklonem k vibracím je doporučeno provádět obrábění co nejblíže k upínači. Snahou je obrábět pokud možno bez vibrací, aby se zejména v oblasti trvanlivosti břitu a jakosti obrobku dosáhlo co nejlepších

výsledků. Proto je potřeba zvolit co nejvhodnější nástroj a jeho upnutí, ale také stanovit vhodné řezné podmínky [1].

1.2.4 Řezné podmínky

Při stanovení řezné rychlosti při upichování a zapichování je potřeba věnovat pozornost dvěma faktorům - vzniku nárůstku při nízkých řezných rychlostech a dále hrozbě plastické deformace břitu při příliš vysokých řezných rychlostech. Průměr obrobku a řezná rychlost se směrem ke středu obrobku snižují, a proto se musí břit vyrovnat jak s nízkými tak vysokými řeznými rychlostmi. Kinematiku řezného procesu popisují následující veličiny: hlavní pohyb, směr hlavního pohybu, řezná rychlost v_c (vztah 1.5, viz obr. 1. 5), směr posuvového pohybu, posuvová rychlost v_f (vztah 1.6, viz obr. 1. 5), řezný pohyb, směr řezného pohybu, výsledná rychlost řezného pohybu v_e (vztah 1.7, viz obr. 1. 5) [1, 2, 4].

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{10^3} \quad (1.5)$$

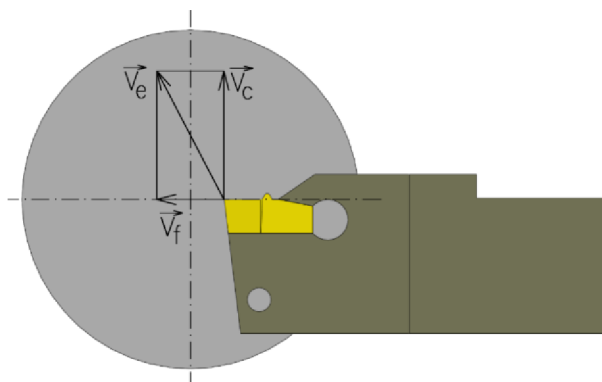
kde:	v_c	[m.min ⁻¹]	řezná rychlost,
	D	[mm]	průměr obrobku,
	n	[min ⁻¹]	otáčky obrobku,
	π	[-]	Ludolfovo číslo.

$$v_f = 10^3 \cdot f \cdot n \quad (1.6)$$

kde:	v_f	[m.min ⁻¹]	posuvová rychlost,
	f	[mm]	posuv na otáčku.

$$v_e = \sqrt{v_c^2 + v_f^2} \quad (1.7)$$

kde:	v_e	[m.min ⁻¹]	výsledná rychlost řezného pohybu.
------	-------	------------------------	-----------------------------------



Obr.1.5 Vektory řezné, posuvové a celkové rychlosti při zapichování a upichování [3].

1.2.5 Význam úhlů, rychlostní poměry a kritický průměr

Nástrojové úhly jsou definovány v nástrojové souřadnicové soustavě a mají jeden index, totožný s indexem nástrojové roviny, v níž jsou měřeny. Ovlivňují velikost řezných sil, teplotu řezání, podmínky tvorby třísky, hospodárnost obrábění, strukturu povrchu obrobku a vlastnosti povrchové vrstvy obrobku. Volí se v závislosti na fyzikálních a mechanických vlastnostech obráběného materiálu, vlastnostech materiálu nástroje, řezných podmínkách, požadované struktuře obrobku, požadovaných vlastnostech povrchové vrstvy obrobku. V důsledku vlivu procesu obrábění při zapichování a upichování se mění rychlostní poměry [7].

Při procesů upichování může dojít k havárii řezného nástroje. Na (obr. 1. 7) jsou uvedeny úhly řezného nástroje a vektory všech pohybů (v_c řezná rychlost, v_f posuvová rychlost, v_e celková řezná rychlost). Při procesu upichování se řezný nástroj posouvá směrem k ose obrobku, dochází ke změně průměru a tím pádem se zmenšuje řezná rychlost, zatímco posuvová rychlost zůstává konstantní. V závislosti na změně řezné rychlosti se mění také řezný úhel η , který se při určité řezné rychlosti vyrovná úhlu hřbetu α_0 . A právě tehdy nastává kritický stav, kdy může dojít k havárii řezného nástroje v důsledku tření mezi hřbetem nástroje a obráběnou plochou obrobku. Výpočet kritické hloubky zápichu je uveden v následujících vztazích (1.8, 1.9, 1.10, 1.11, 1.12), vychází z rovnosti trojúhelníků (viz obr. 1.6), pomocí matematické úpravy vypočítáme kritický průměr D_{krit} . Úhel hřbetu α_0 je definován přímo výrobcem a nelze jej ovlivnit, úhel η je funkcí rychlostí podle vztahu, kde rychlost a posuv se nastavují jako vstupní parametry obráběcího procesu, na základě doporučení výrobcem nástrojů. K havárii dojde v případě, že η se rovná α_0 [7].

Podmínka:

$$\tan \eta = \frac{v_f}{v_c} \text{ se musí rovnat } \tan \alpha_0 = \frac{v_f}{v_c}$$

$$\tan \eta = \frac{v_f}{v_c} \quad (1.8)$$

kde: v_c [m.min⁻¹] řezná rychlost,
 v_f [m.min⁻¹] posuvová rychlost,
 η [°] řezný úhel.

$$\tan \alpha_0 = \frac{v_f}{v_c} \quad (1.9)$$

kde: v_c [m.min⁻¹] řezná rychlost,
 v_f [m.min⁻¹] posuvová rychlost,
 α_0 [°] úhel hřbetu.

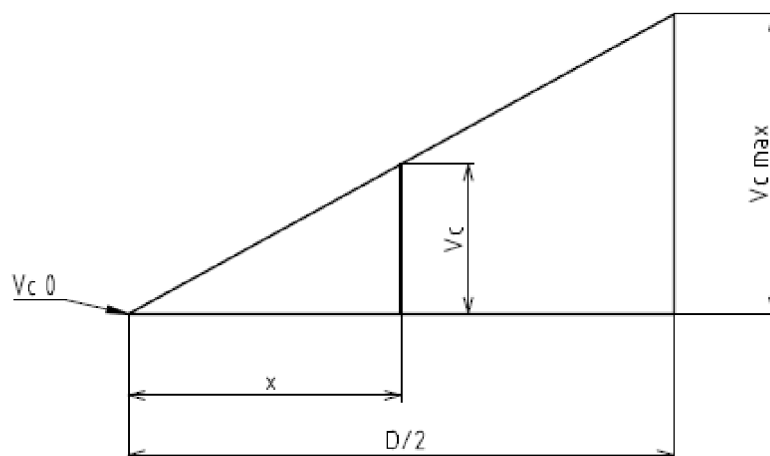
$$x = \frac{v_f \cdot D}{\tan \alpha_0 \cdot v_{c \max} \cdot 2} \quad (1.10)$$

kde: x [mm] vzdálenost od osy obrobku,
 D [mm] průměr obrobku,
 α_0 [°] ortogonální úhel hřbetu,
 v_f [m.min⁻¹] posuvová rychlost,
 $v_{c \max}$ [m.min⁻¹] řezná rychlost.

$$D_{krit} = 2 \cdot x \quad (1.11)$$

kde: x [mm] vzdálenost od osy obrobku,
 D_{krit} [mm] průměr obrobku.

Matematická úprava: podle rovnosti trojúhelníků platí.



Obr. 1.6 Rovnost trojúhelníků.

$$\frac{v_c}{x} = \frac{v_{c \max}}{\frac{D}{2}} \quad (1.12)$$

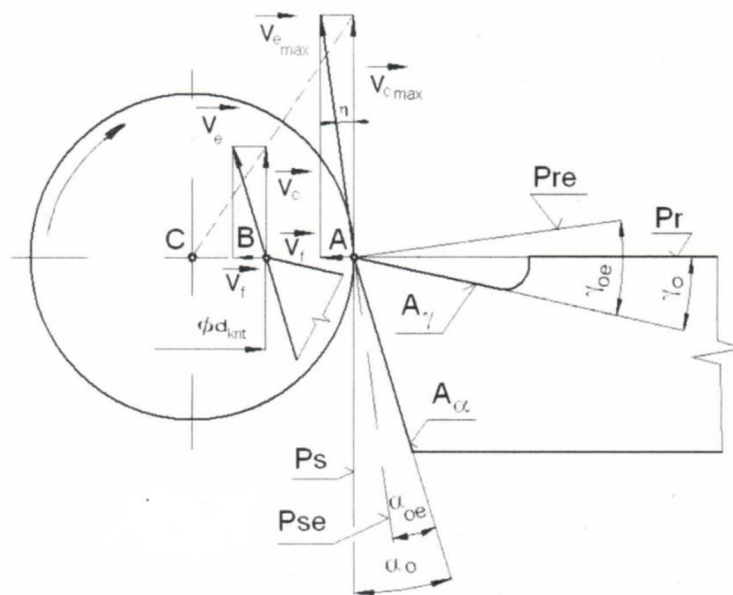
Dosazení za v_c , po úpravách získáme D_{krit} :

$$\frac{v_f}{\tan \alpha_0} = \frac{v_{c \max} \cdot 2}{D}$$

$$\frac{v_f}{\tan \alpha_0 \cdot x} = \frac{v_{c \max} \cdot 2}{D}$$

$$x = \frac{v_f \cdot D}{\tan \alpha_0 \cdot v_{c \max} \cdot 2}$$

$$D_{\text{krit}} = 2 \cdot x$$



Obr. 1.7 Vliv rychlostních poměrů na D_{krit} [7].

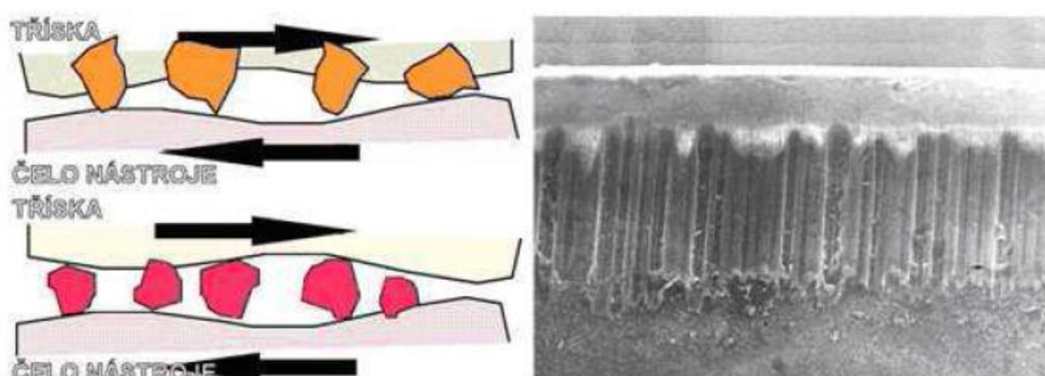
1.3 Opatření nástroje

Opatření je běžným důsledkem činností všech strojních součástí, které pracují ve vzájemném kontaktu a relativním pohybu. Při obrábění dochází v důsledku řezného procesu k relativnímu pohybu nástroj-obrobek a nástroj-tříška, i ke kontaktu nástroje s obrobkem a odcházející třískou. To vše nutně vede k opotřebení nástroje - velmi složitému

ději, který závisí na mnoha faktorech a v jehož průběhu působí mnoho odlišných fyzikálně-chemických jevů neboli mechanismů opotřebení [7]; v následujících kapitolách jsou uvedeny nejdůležitější z nich.

1.3.1 Abrazie

Je velmi častou formou opotřebení, které vzniká působením tvrdých mikročástic v materiálu obrobku i mikročástic uvolněných z řezného nástroje. Je to brusný otěr, při němž se tvrdé částice dostávají mezi povrch obrobku a povrch řezného nástroje (viz obr. 1.9) [1, 7].

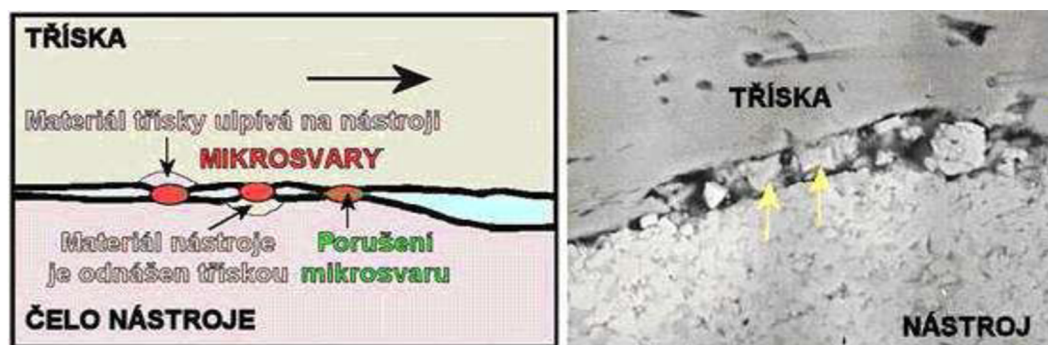


Obr. 1.9 Schéma a fotografie abrazy [7].

1.3.2 Adheze

Vysoké tlaky a chemicky čisté povrchy čela, resp. hřbetu nástroje, a obráběného materiálu vytvářejí v místě styku (na kontaktních plochách) podmínky pro adhezní opotřebení. Vzájemný styk třísky s čelem a hřbetem nástroje za podmínek bodového dotyku nastává při nízkých řezných teplotách jen ve vrcholcích mikronerovností.

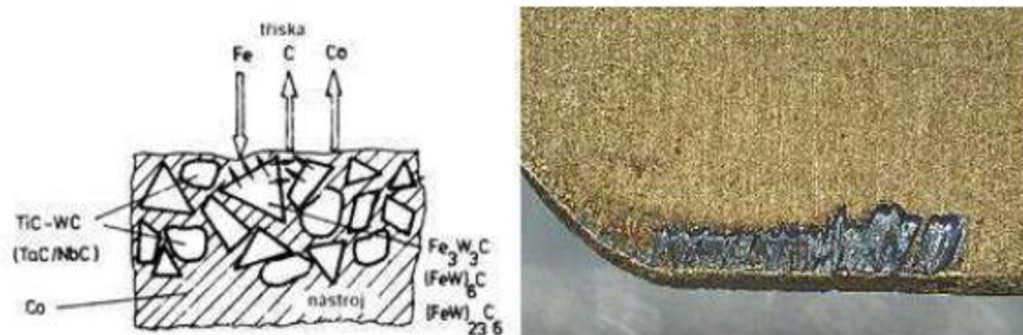
Ve vrcholcích mikronerovností dochází následkem vysokých tlaků k místní plastické deformaci, jejímž působením se především v obráběném materiálu, na vrcholcích nerovností obnaží chemicky čistý materiál, vzrostou místní teploty a vzniknou adhezní spoje - mikroskopické svary (viz obr. 1.10). Při relativním pohybu obou ploch jsou vrcholky mikronerovností namáhány na stříh a probíhá tak plynulý proces vzniku a odtrhávání mikrosvarů. Nejčastěji se vytrhává materiál obrobku, jehož částice zůstávají nalepeny na čele a hřbetě nástroje [8].



Obr. 1.10 Schéma a fotografie adheze [7].

1.3.3 Difuze

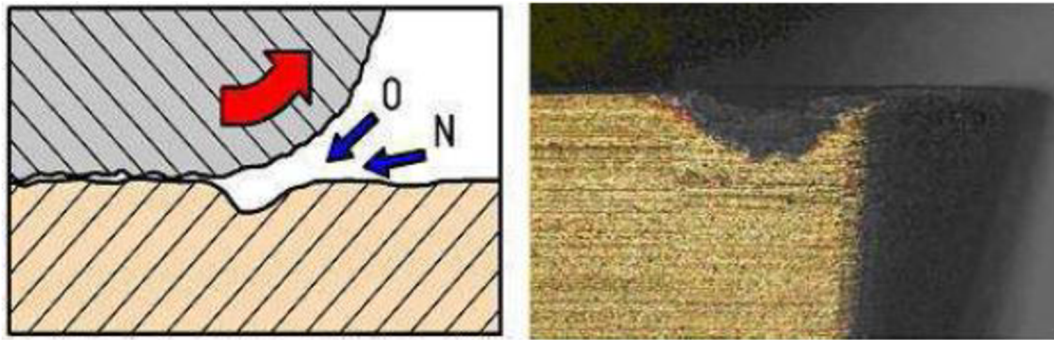
K difuznímu opotřebení (viz obr. 1.11) dochází tehdy, když řezná teplota překročí 800 - 900 °C a kdy se stává difuze jednotlivých atomů obráběného materiálu a slinutého karbidu převládajícím mechanismem procesu opotřebení čela i hřbetu vyměnitelné břitové destičky. Opotřebení jejího břitu za vysokých teplot nezávisí již na poměru tvrdostí (poněvadž jde o chemické opotřebení), ale na teplotě a chemické aktivitě materiálu obrobku a druhu slinutého karbidu, resp. na jeho chemickém složení. Ve styčných plochách hřbetu a čela s obrobkem existují při vyšších řezných rychlostech podmínky urychlující difuzi, při níž je teplota nejvýznamnějším činitelem [2].



Obr. 1.11 Schéma a fotografie difuzního opotřebení [2].

1.3.4 Oxidace

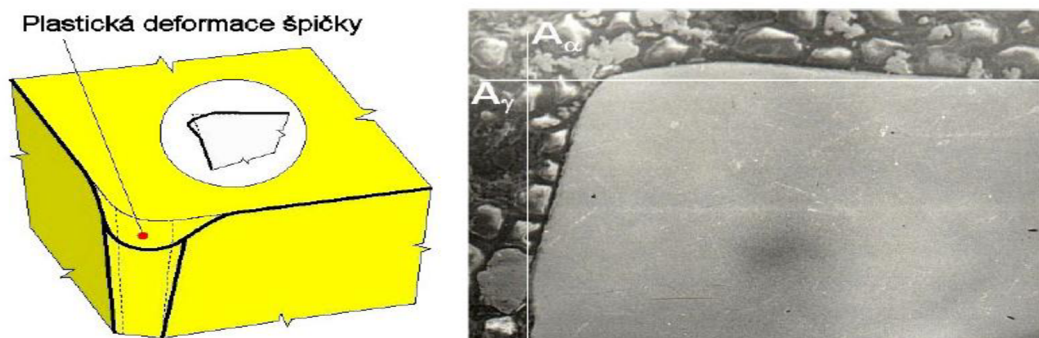
Vlivem vysoké teploty a okolního vzduchu dochází k oxidaci většiny kovů. Wolfram a kobalt tvoří porézní filmy oxidů, které jsou snadno odnášeny třískou. Jiné, jako oxid hlinitý, jsou naproti tomu podstatně pevnější a tvrdší. Speciálně v místě kontaktu břitu, kde končí šířka třísky, má vzduch přístup do prostoru řezného procesu (viz obr. 1.12). Intenzivní oxidace povrchu řezného nástroje zahřátého na vysokou teplotu vede při vyšších řezných rychlostech ke vzniku tzv. oxidační rýhy [1,8].



Obr. 1.12 Schéma a fotografie oxidace [7].

1.3.5 Plastická deformace

V mnoha případech postupujícího opotřebení se setkáváme se zbořením ostří - plastickou deformací (viz obr. 1.13). Plastická deformace vzniká v důsledku nárůstu teplot nad hranici tepelné stability SK (cca 1100 °C). Může dojít k deformaci špičky vyměnitelné břitové destičky směrem do destičky. Tento jev podporuje rostoucí výmol na čele [8].

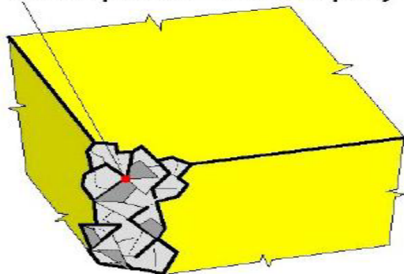


Obr. 1.13 Schéma plastická deformace špičky [7].

1.3.6 Křehký lom

Vylamování břitu nebo celkový lom (viz obr. 1.14) jsou důsledkem přetížení břitu mechanickým tahovým namáháním. Tato namáhání mohou vznikat z řady důvodů, jako např. zasekávání třísek, příliš vysoká hodnota posuvu nebo hloubky řezu, vměstky písku obsažené v materiálu obrobku, tvorba nárůstku, vibrace, nadměrné opotřebení břitové destičky atd. [9].

Křehké porušení v oblasti špičky



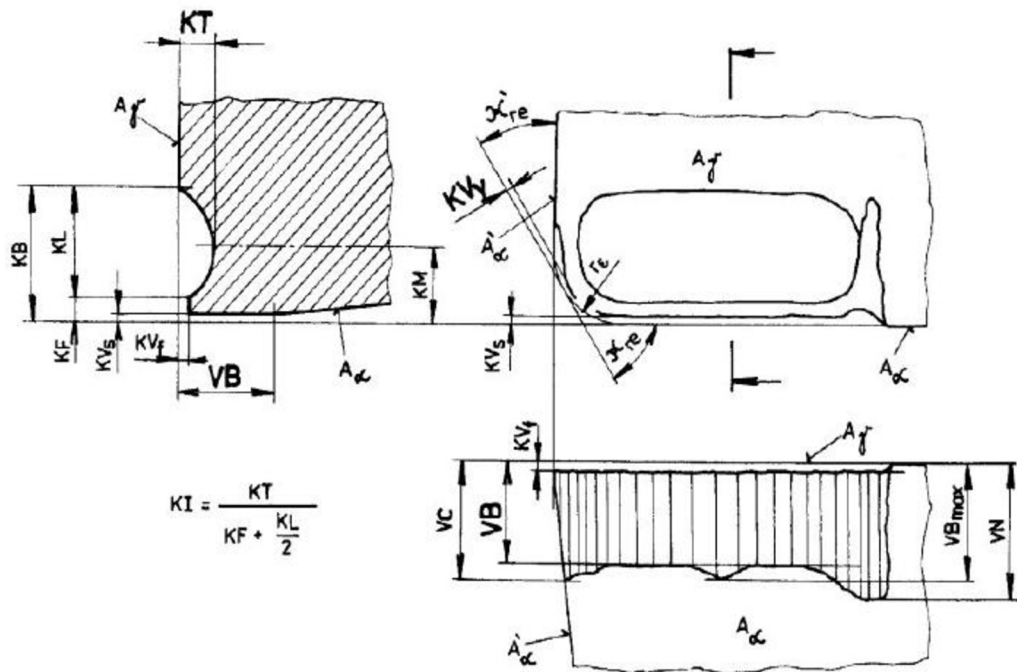
Obr. 1.14 Schéma a fotografie křehkého porušení v oblasti špičky [7].

1.3.7 Kritéria opotřebení

Kritéria opotřebení jsou spolu s doporučenými hodnotami uvedeny v tabulce 1. 1. a (viz. obr. 1.15) [7].

Tab. 1.1 Kritéria opotřebení [7].

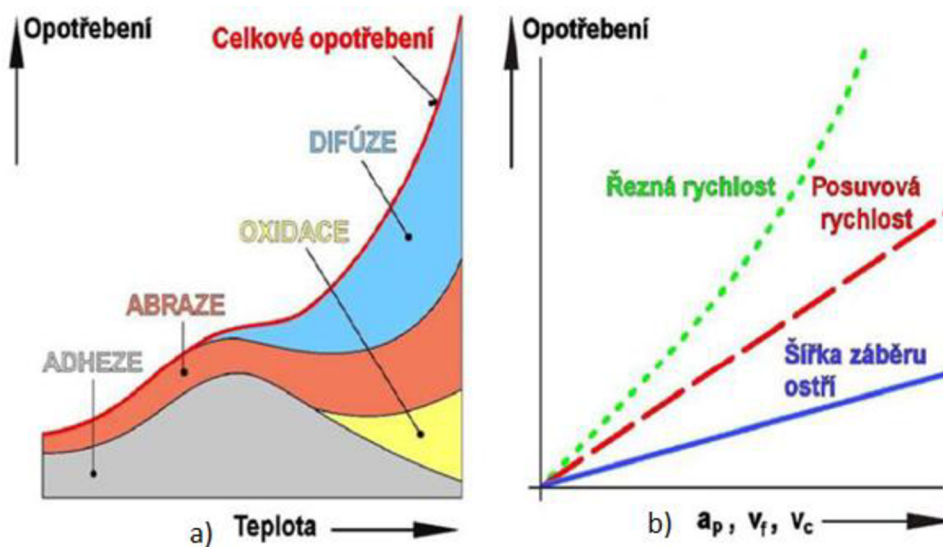
	Kriterium	Označení v obr. 1. 13.	Doporučené hodnoty
Zvyklosti	Šířka fazetky opotřebení na hřbetě	VB	0,2 ÷ 0,8 mm
	Hloubka výmolu na čele	KT	0,2 ÷ 0,3 mm
	Radiální opotřebení špičky	KV _y	
ČSN ISO 3685	Opotřebení hřbetu v oblasti špičky	VB _C	
	Průměrné opotřebení hřbetu	VB _B	
	Maximální opotřebení hřbetu	VB _{B max}	
	Vrubové opotřebení hřbetu	VB _N	



Obr. 1.15 Kriteria opotřebení řezného nástroje [7].

1.3.8 Faktory ovlivňující opotřebení nástroje

Plynule působící základní mechanismy opotřebení mají různý podíl na celkovém opotřebení a tento podíl se zvyšuje s narůstající teplotou (viz obr. 1.16 a). Z řezných podmínek má na intenzitu celkového opotřebení největší vliv řezná rychlost v_c , menší působení vykazuje posuvová rychlost v_f a nejmenší šířka záběru ostří a_p (viz obr. 1.16 b) [2,7].



Obr. 1.16 Závislost opotřebení na; a) teplotě, b) řezných podmínkách [7].

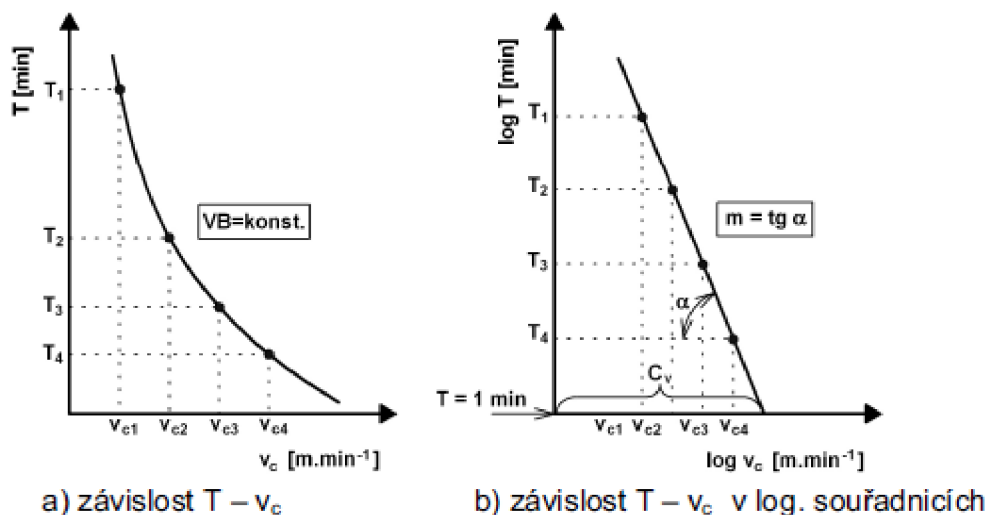
1.3.9 Trvanlivost nástroje

Trvanlivost nástroje, podobně jako opotřebení nástroje, závisí zejména na metodě obrábění (soustružení, frézování, vrtání atd.), na vlastnostech obráběného a nástrojového materiálu a řezných podmínkách (řezná a posuvová rychlost, šířka záběr ostří, řezné prostředí). Z řezných podmínek má na trvanlivost největší vliv řezná rychlost - ČSN ISO 3685, ČSN ISO 8688-1 A ČSN ISO 8688-2 uvádějí tzv. Taylorův vztah neboli $T-v_c$ závislost (vztah 1.13, viz obr. 1.17) [7].

$$T = \frac{C_T}{v_c^m} \quad (1.13)$$

kde:

C_T	[-]	konstanta,
v_c	[m.min ⁻¹]	řezná rychlost,
m	[-]	exponent.



Obr. 1.17 $T-v_c$ závislost [7].

1.4 Tříška a její průřez

Tvar třísky je též velmi důležitým faktorem efektivního využití nástroje a dosažení předepsané kvality obrobku. Plynulá tříška se může namotávat na nástroj a zvyšovat tak jeho poškození i zhoršovat strukturu obrobeného povrchu. Tvar třísky závisí na více faktorech, z nichž nejdůležitější jsou vlastnosti obráběného materiálu, geometrie a tvar bříty nástroje, řezná a posuvová rychlost a nástrojový materiál. Výpočet průřezu třísky A_d je určen posuvem f a šířkou záběru ostří a_p platí vztah (1.14) [7].

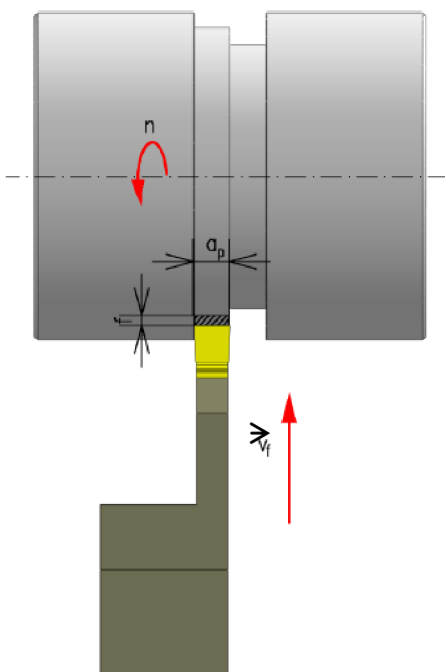
$$A_d = a_p \cdot f \cdot \sin \varphi \quad (1.14)$$

kde:	A_d	[mm ²]	plocha průřezu třísky,
	a_p	[mm]	šířka záběru hlavního ostří,
	f	[mm]	posuv na otáčku obrobku,
	φ	[°]	úhel nastavení na směr hlavního pohybu.

V případě procesu upichování a zapichování - pokud je úhel nastavení $\kappa_r = 0^\circ$ bude $\varphi = 90^\circ$, pak platí vztah (1.15, viz obr. 1.18) [4].

$$A_d = a_p \cdot f \quad (1.15)$$

kde:	A_d	[mm ²]	plocha průřezu třísky,
	a_p	[mm]	šířka záběru hlavního ostří,
	f	[mm]	posuv na otáčku obrobku.



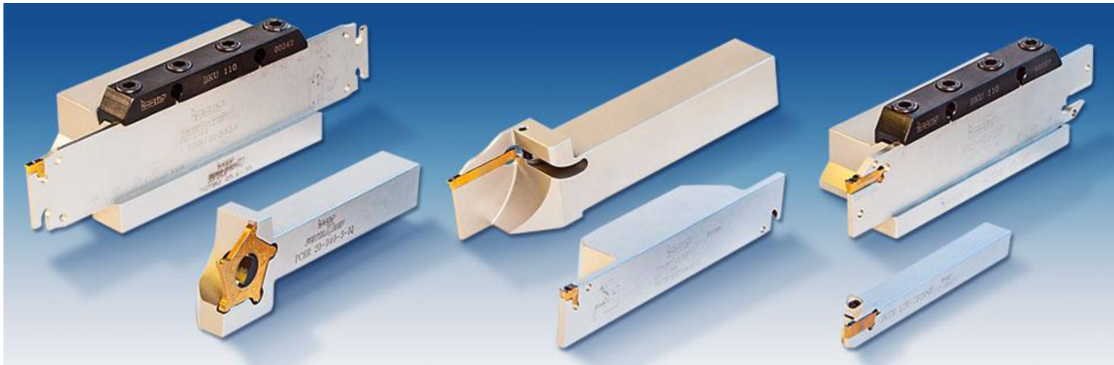
Obr. 1.18 Průřez třísky při upichování [3].

1.5 Nástroje pro upichování a zapichování

Moderní nástroj pro upichování a zapichování musí splňovat řadu požadavků – od spolehlivého upnutí vhodné řezné destičky, vysoké tuhosti, odolnosti proti vibracím, schopnosti produktivně opracovávat složité tvary s vysokou přesností až po schopnost přivést řeznou kapalinu do bezprostřední blízkosti břitu [10].

1.5.1 Moderní trendy v konstrukci řezných nástrojů

Moderní stroje vyžadují nástroje modulární koncepce (viz obr. 1.19), schopné rychlé výměny bez časově náročného seřizování polohy břitu. Všechny tyto požadavky vedou k vyšší rozmanitosti užívaných nástrojů, přičemž z ekonomického hlediska je vhodnější použít modulární koncepci nástrojů místo nástrojů celistvých. Pracují za náročných podmínek, daných měnící se řeznou rychlostí, velkým vyložení nástroje a požadavkem malé stavební šířky. Jejich upnutí je řešeno obdobně jako u běžných stopkových nástrojů, tedy fixací prizmatického tvaru nástroje, např. planžety nebo kazety do příslušného vybraní nástrojového držáku nebo adaptéru; další možností, nacházející stále širší uplatnění, je upnutí zapichovací, resp. upichovací hlavice do vlastního nástrojového držáku, resp. adaptéru, který bývá v tom případě schopen upnout hlavice pro různé soustružnické aplikace, a jde tedy o modulární řešení. Pokud se od zapichovacího nástroje vyžaduje i schopnost provádět operace lehkého podélného soustružení, musí být jeho konstrukce schopna snášet i síly, působící rovnoběžně s osou soustružení [10].



Obr. 1.19 Modulární řezné nástroje, ilustrační foto [11].

1.5.2 Příklady konstrukcí modulárních řezných nástrojů firmy ISCAR

V následujícím textu jsou vybrány některé základní typy řezných nástrojů pro upichování a zapichování.

1.5.2.1 TANG-GRIP IQ

Ekonomicky výhodné upichovací nástroje bez horní upínací čelisti: planžety se 4 lůžky a integrální držáky se 2 lůžky (viz obr. 1.20). Nové planžety TGSU mají vysokou tuhost a jsou vhodné pro těžké hrubování a vysoké posuvy. Absence horní upínací čelisti umožňuje bezproblémový odchod třísky. Vysoká tuhost nástroje zabezpečuje dokonalou přímou zápchu. Lze použít pro hluboké zapichování a upichování (35 mm vysoká planžeta je o 30 mm delší oproti standardním)[11].



Obr. 1.20 Řezný nástroj TANG-GRIP IQ [11].

1.5.2.2 PENTAIQGRIP

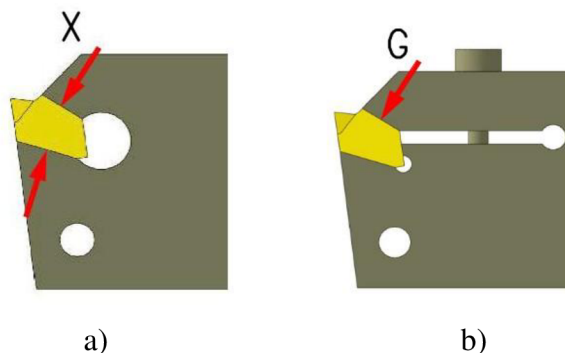
Řezný nástroj má inovovaný způsob uložení destičky v lůžku s rybinovitým vedením a lepší čelní kontakt (viz obr. 1.21). Nástroj se tak stává ještě o něco tužší, lépe snáší boční řezné síly a umožňuje použití vyšších řezných parametrů při soustružení do boku. Tyto nové vlastnosti přinášejí zvýšení rovinnosti a drsnosti upichované plochy. Systém upnutí destičky je snadný, pevný a umožňuje velmi rychlou výměnu břitů přímo na stroji. Na trh budou dodávány tři velikosti pro upichování průměrů 22, 32 a 40 mm [11].



Obr. 1.21 Řezný nástroj PENTAIQGRIP [11].

1.5.2.3 Moderní způsoby upínání vyměnitelných břitových destiček

Dříve se používaly řezné nástroje celistvé, postupem doby se začali používat řezné nástroje s vyměnitelnými břitovými destičkami. Výměna VBD musí být při provozních podmínkách technicky nenáročná a při tom zajistit dokonalou geometrii revitalizovaného řezného nástroje. V současné době je používáno několik způsobů upínání VBD na tělo nástroje, např. pomocí planžety s pružinovým upínáním označované jako X (viz obr. 1.22 a), nebo pomocí šroubu, s označením G (viz obr. 1.22 b) [17].



Obr. 1.22 Typy upnutí břitové destičky a) ISO X, b) ISO G [3].

1.5.3 Pokročilé materiály pro výrobu nástrojů

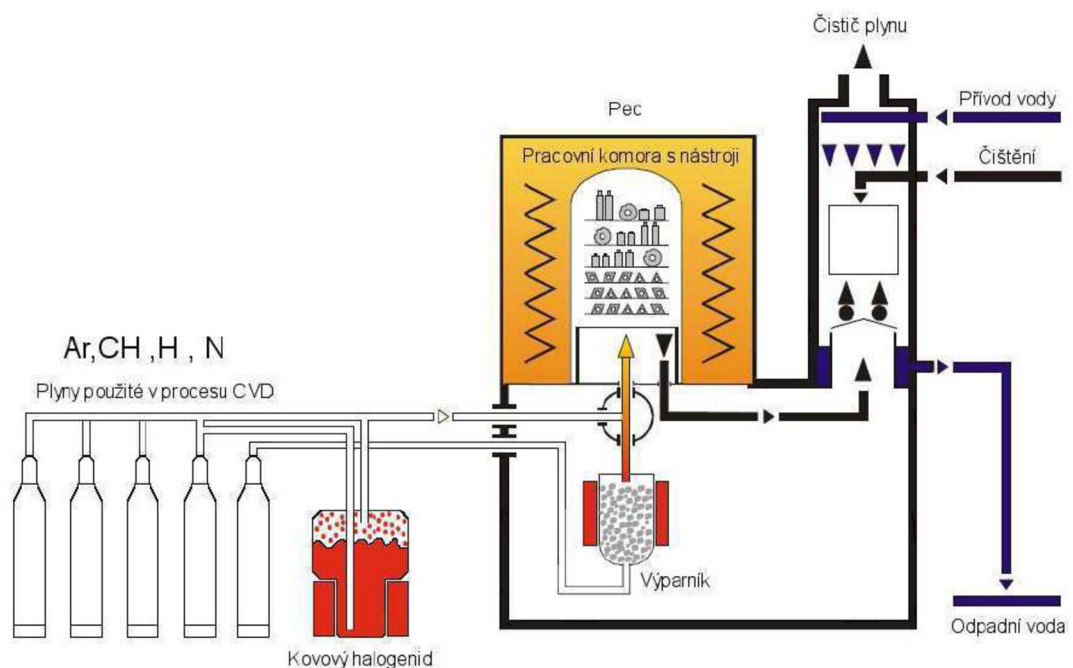
V dnešní době je díky neustálému vývoji k dispozici široký sortiment materiálů pro řezné nástroje od nástrojových ocelí až po syntetický diamant. Nejvíce zastoupenou skupinou řezných nástrojů tvoří povlakované břitové destičky ze slinutého karbidu.

1.5.3.1 Povlakované slinuté karbidy

Povlakované slinuté karbidy jsou vyráběny několika způsoby. Na podklad z běžného slinutého karbidu typu K, P nebo M se nanáší tenká vrstva materiálu s vysokou tvrdostí a vynikající odolností proti opotřebení. Povlakovaný materiál ve srovnání se substrátem neobsahuje žádné pojivo, má o několik řádů jemnější zrnitost a méně strukturních defektů a dále tvoří bariéru proti difuznímu mechanismu opotřebení nástroje.

První povlakované břitové destičky ze slinutého karbidu uvedla na trh (firma Sandvik Coromant, 60. léta 20. století) povlak TiC, tloušťka vrstvy $4 \div 5 \mu\text{m}$. Dále následovaly povlaky typu TiN a TiCN, povlaky Al_2O_3 byly uvedeny na trh až později 70. léta. Povlaky byly zhotovovány metodou CVD (Chemical Vapour Deposition - chemické napařování) jako jedno i vícevrstvé, dalším typem povlakování byla metoda PVD (Physical Vapour Deposition - fyzikální napařování) [7,12].

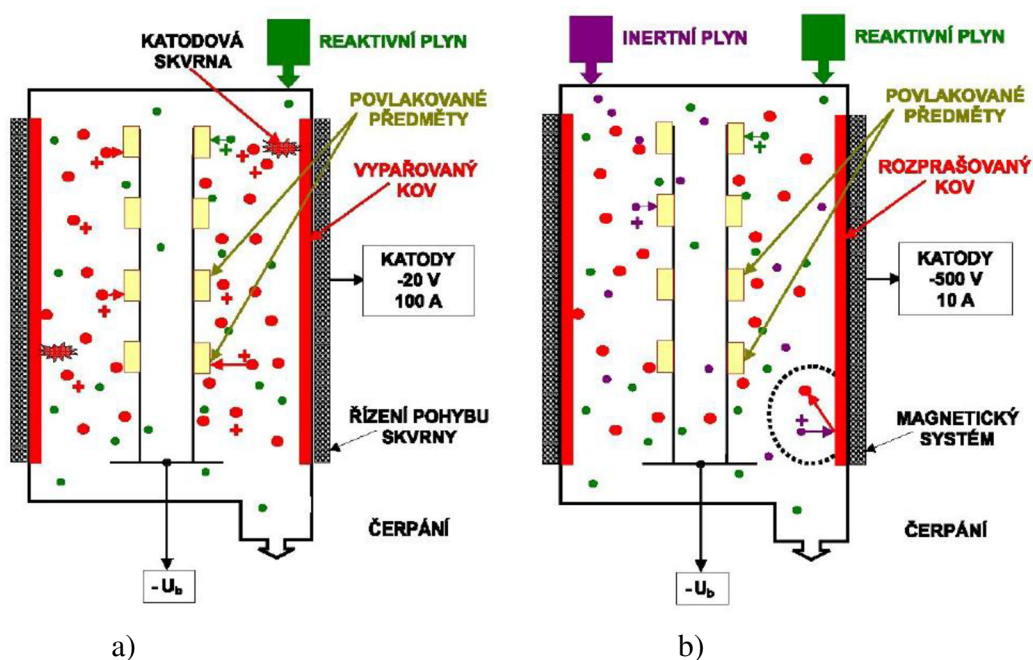
Metoda CVD - jedná se o chemický proces povlakování, který probíhá za vysokých teplot $1000 \div 1200 \text{ }^\circ\text{C}$, je založen na reakci plyných chemických sloučenin v plazmě, které se tvoří v bezprostřední blízkosti povrchu podkladového slinutého karbidu a následném uložení produktů heterogenní reakce na tomto povrchu. Požadavek je, aby výchozí plyny obsahovaly stabilní, ale přitom prachovou sloučeninu, která se při přivedení energie např. ohřevem, plazmovým obloukem nebo laserem chemicky rozkládá např. kovový halogenid, TiCl_4 , ZrCl_4 , AlCl_3 . Takto rozložený produkt se pak ukládá na ohřátý povrch povlakovaného předmětu (viz. obr. 1.23).



Obr. 1.23 Schéma - metoda povlakování CVD [7].

Dále jsou nejčastěji používány různé modifikace CVD metody - např. nízkotlaká CVD metoda (Low - Pressure CVD - LPCVD), metoda CVD se žhavicím vláknem (Hot Filament CVD - HFCVD), laserem indukovaná CVD metoda (Laser Induced CVD - LICVD, LCVD), metoda CVD s lavinovým plazmatickým výbojem (Cascade Arc Plasma - assisted CVD - CACVD) [7,12].

Metoda PVD - je charakteristická nízkými pracovními teplotami (pod 500 °C), povlaky jsou vytvářeny za sníženého tlaku ($0,1 \div 1,0$ Pa) kondenzací částic atomů nebo shlukem atomů, které jsou uvolňovány ze zdroje terčů nebo targetů fyzikálními metodami, a to rozprašováním nebo odpařováním, zejména indukčně, nízkonapěťovým obloukem, laserem nebo elektronovým paprskem (viz. obr. 1.24). Při určité metodě se využívá odporový ohřev. Uvolněné atomy jsou ionizovány, reagují s atmosférou komory, ta je tvořena interním a reaktivním plynem (Ar a N_2) a záporným předpětím, jsou urychlovány k povrchu substrátu, kde ulpívají ve formě tenké vrstvy homogenního povlaku ($1 \div 5 \mu\text{m}$). K nevýhodám všech metod PVD patří relativně složitý vakuový systém a požadavek pohybovat povlakovanými předměty tzv. stínový efekt. Výhodou PVD je možnost povlakování ostrých hran [7,12].



Obr. 1.24 Schéma CVD - a) odpařování a b) rozprašování [7].

2. PRAKTICKÁ ČÁST PRÁCE

Cílem experimentu bylo zjistit, zda má nenulový úhel κ_r hlavního ostří vliv na změnu celkové deformace řezného nástroje při procesu upichování a zapichování. Zkoušky probíhaly v dílnách FSI VUT v Brně ÚST Odboru technologie obrábění. Během experimentu:

- bylo měřeno silové zatížení řezného nástroje,
- na základě naměřených dat byl vytvořen jednoduchý 3D model řezného nástroje,
- byla provedena deformační analýza řezného nástroje pomocí simulačního programu ANSYS (tento program využívá složité matematické výpočty a metodu konečných prvků),
- na základě zjištěných skutečností byl vyvozen závěr o chování řezného nástroje během procesu upichování a zapichování.

2.1 Experimentální materiál

K experimentálnímu obrábění byla vybrána ocel dle ČSN 11 600 dle EN 1.00 60. Jedná se o klasickou konstrukční ocel s max. obsahem 0,5% uhlíku. Technické parametry oceli jsou uvedeny v tabulce 2.1. Byl zvolen polotovar kruhového průřezu o průměru 60 mm a délce $L = 180$ mm, který byl obroben na průměr $D = 58$ mm.

Tab. 2.1 Technické parametry oceli 11 600.0 [13].

Mez pevnosti R_m [MPa]	Mez kluzu R_e [MPa]	Tvrдость HB
590-705	295	Max 205

2.2 Parametry nástroje

K experimentu byl použit řezný nástroj pro upichování a zapichování firmy ISCAR (viz obr. 2.1). Jednalo se o modulární systém řezného nástroje, který měl tři části uvedené v tabulce 2.2. Hlavní část tvořil upínací blok, planžeta s tangenciálně orientovanou jednobřitou destičkou TANG-GRIP pro upichování a zapichování a jednobřítá destička pro upichování tyčoviny, tvrdých materiálů a pro těžké aplikace s nenulovým úhlem κ_r hlavního ostří. Břítová destička byla povlakována metodou PVD, výrobní označení SUMO TEC 808. Tento povlak je houževnatý submikronový substrát s TiAlN. Je konstruován přímo pro obrábění žáruvzdorných slitin, austenitických nerezí, tvrdých slitinových a uhlíkových ocelí při středních až vyšších řezných rychlostech [14].



Obr. 2.1 Řezný nástroj firmy ISCAR.

Tab. 2.2 Typ řezného nástroje [14].

Upínací blok planžety	planžeta s tangenciálně orientovanou jednobřitou destičkou TANG-GRIP pro upichování a zapichování	Jednobřitá destička pro upichování tyčoviny, tvrdých materiálů a pro těžké aplikace
SGTBU 25-6C	TGFH 32-3	TAG R/L 3C-6D

2.3 Technické parametry použitého strojního zařízení

Hrotový soustruh SU50A-SP výrobce firma TOS Kuřim a.s, (viz obr. 2.2). Technické údaje stroje, na kterém byl prováděn experiment, jsou uvedeny v tabulce 2.3.



Obr. 2.2 Hrotový soustruh SU50A-SP.

Tab. 2.3 Technické parametry [15]

oběžný průměr nad ložem	500	[mm]
oběžný průměr nad suportem	205	[mm]
vzdálenost hrotů	1500	[mm]
rozměry 4 nožové hlavy	160 x 160	[mm]
otáčky vřetene	11,2-1400	[min ⁻¹]
výkon motoru	11	[kW]

2.4 Technické parametry měřícího zařízení

Při experimentu byl pro měření silového zatížení řezného nástroje použit piezoelektrický dynamometr firmy KISTLER 9257B (viz obr. 2.3), vícekanálový zesilovač typ 5070A11000, A/d převodník, distribuční box s BNC konektory, počítač ACER, software DynoWare 2852 A-02-2 a spojovací kabely. Typ tohoto měřícího zařízení měřil silové složky ve třech osách *x*, *y*, *z*. Schéma zapojení měřící soustavy je zřejmé z (obr. 2.4).



Obr. 2.3 Dynamometr firmy KISTLER 9257B.



Obr. 2.4 Schéma zapojení soustavy: a) Dynamometr firmy KISTLER 9257B, b) distribuční box s BNC konektory, c) vícekanálový zesilovač typ 5070A11000, d) počítač ACER + software DynoWare 2852 A-02-2 [16]

2.5 Popis experimentu

Na hrotový soustruh SU50A-SP byl na místo nožové hlavy na podélném suportu upnut dynamometr firmy KISTLER 9257B, na kterém byl namontován přípravek sloužící k upnutí řezného nástroje. Do přípravku byl uchycen řezný nástroj pro upichování a zapichování firmy ISCAR. Do sklíčidla soustruhu byl vložen a upnut zkušební vzorek kruhového průřezu o průměru 60 mm a délce 180 mm, který byl obroben na průměr 58 mm a na druhém konci byl podepřen otočným hrotem, aby nedocházelo k vibracím a tím pádem k ovlivnění v průběhu měření (viz obr. 2.5). Při experimentu byl měřen průběh silového zatížení řezného nástroje ve třech osách x , y a z . Nejdříve byla provedena kalibrace měřící soustavy, aby byla vyloučena chyba při nastavení měřící soustavy. Celkem bylo provedeno 6 měření silového zatížení řezného nástroje; údaje o nastavených parametrech pro jednotlivá měření jsou uvedeny v tabulce 2.4. Po každém nastavení a překontrolování jednotlivých parametrů započala jednotlivá měření, která byla zaznamenána a vyhodnocena v počítači pomocí softwaru DynoWare 2852 A-02-2. Měření probíhala tak, že byl spuštěn stroj zároveň s měřícím zařízením, řezný nástroj prováděl zápichy do zkušební vzorku na stanovený průměr 38 mm (viz obr. 2.6). Po ukončení experimentu byl získán soubor informací o silách působících na řezný nástroj v závislosti na změně řezných a posuvových podmínek při zapichování daným řezným nástrojem.



Obr. 2.5 Upnutí řezného nástroje pro měření silového zatížení.



Obr. 2.6 Jednotlivé experimentální zápichy do zkušebního vzorku.

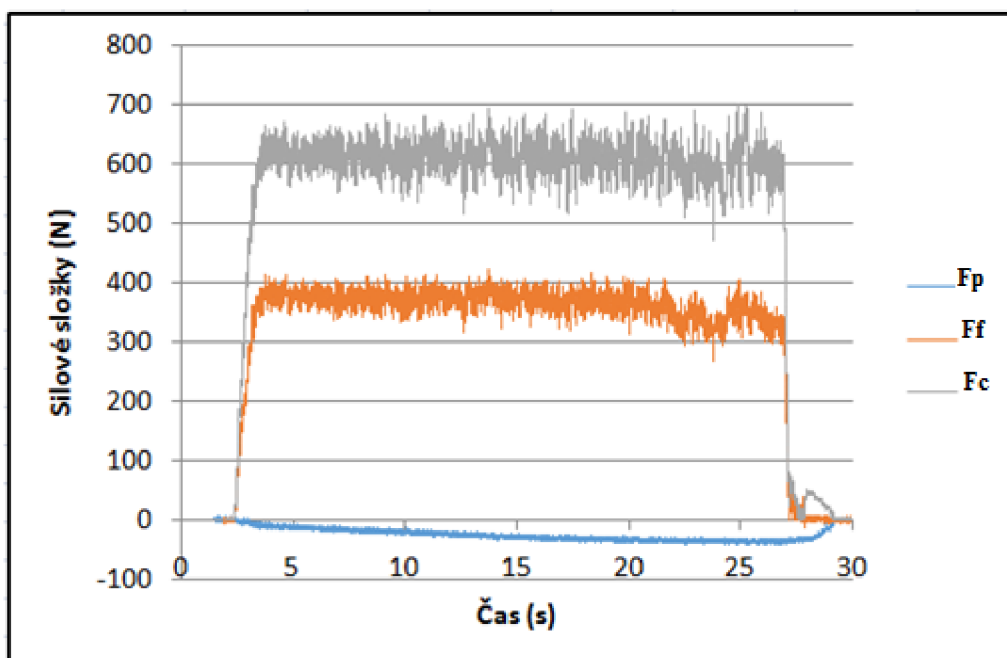
Tab. 2.4 Parametry pro experiment.

Číslo experimentu	Řezná rychlost v_c [m.min ⁻¹]	Otáčky n [min ⁻¹]	Posuv na otáčku f [mm]	Šířka záběru a_p [mm]	Průměr výchozí [mm]	Průměr po zápichu [mm]
A 1	60	329	0.08	3	58	38
A 2	80	439	0.08	3	58	38
A 3	100	548	0.08	3	58	38
A 4	60	329	0.135	3	58	38
A 5	80	439	0.135	3	58	38
A 6	100	548	0.135	3	58	38

2.6 Výsledky experimentu

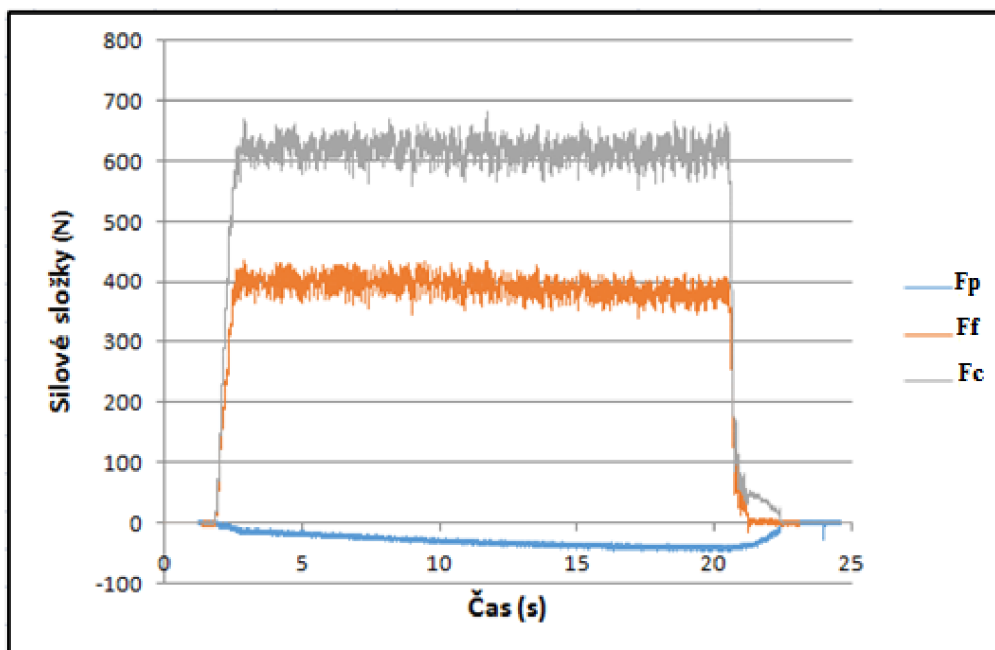
Během experimentu byly snímány síly (posuvová F_f , pasivní F_p , řezná F_c) působící na řezný nástroj v závislosti na čase obrábění při daných řezných podmínkách. Grafické znázornění těchto závislostí je spolu s parametry nastavení uvedeno na (obr. 2.7 ÷ 2.12).

Experiment A1: $n=329 \text{ mm}^{-1}$, $v_c=60 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, $f=0,008 \text{ mm}$, $a_p=3 \text{ mm}$, $D=58 \text{ mm}$, $D_{\text{obr}}=38 \text{ mm}$



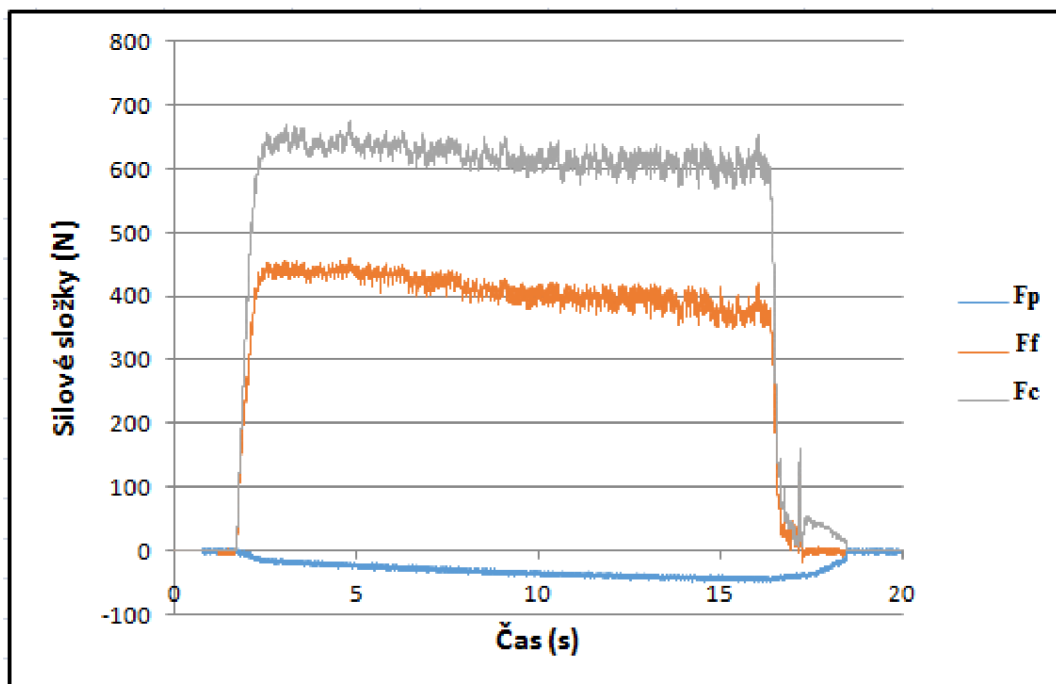
Obr. 2.7 Složky jednotlivých sil v závislosti na čase.

Experiment A2: $n=439 \text{ mm}^{-1}$, $v_c=80 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, $f=0,008 \text{ mm}$, $a_p=3 \text{ mm}$, $D=58 \text{ mm}$, $D_{\text{obr}}=38 \text{ mm}$



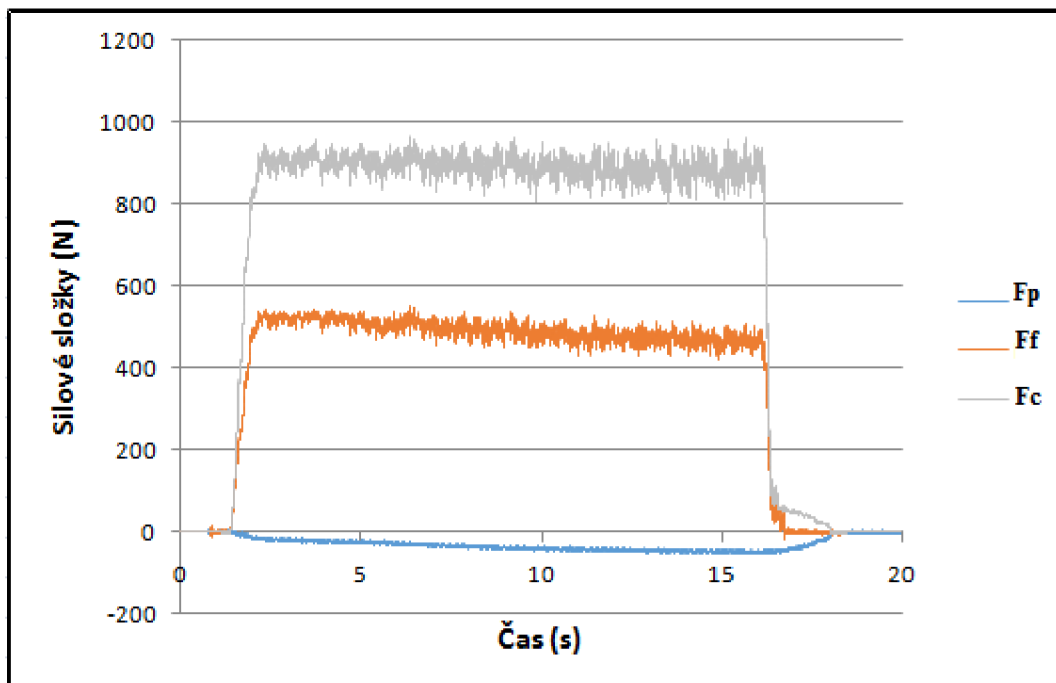
Obr. 2.8 Složky jednotlivých sil v závislosti na čase.

Experiment A3: $n=548 \text{ mm}^{-1}$, $v_c=100 \text{ m.min}^{-1}$, $f=0,008 \text{ mm}$, $a_p=3 \text{ mm}$, $D=58 \text{ mm}$, $D_{obr}=38 \text{ mm}$



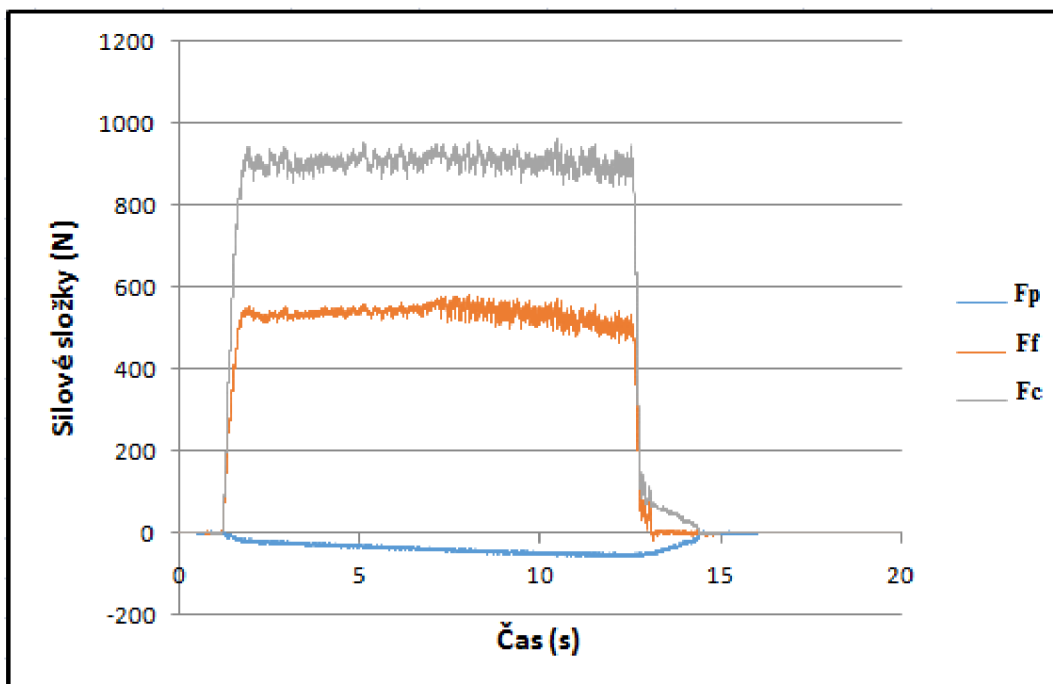
Obr. 2.9 Složky jednotlivých sil v závislosti na čase.

Experiment A4: $n=329 \text{ mm}^{-1}$, $v_c=60 \text{ m.min}^{-1}$, $f=0,135 \text{ mm}$, $a_p=3 \text{ mm}$, $D=58 \text{ mm}$, $D_{obr}=38 \text{ mm}$



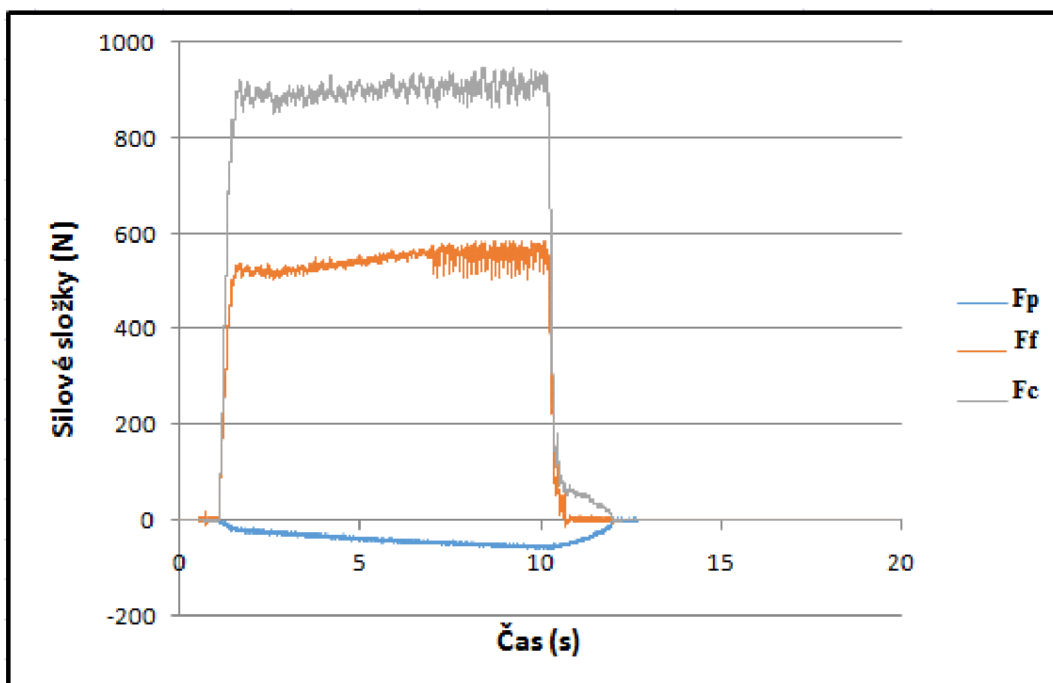
Obr. 2.10 Složky jednotlivých sil v závislosti na čase.

Experiment A 5: $n=439 \text{ mm}^{-1}$, $v_c=80 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, $f=0,135 \text{ mm}$, $a_p=3 \text{ mm}$, $D=58 \text{ mm}$, $D_{obr}=38 \text{ mm}$



Obr. 2.11 Složky jednotlivých sil v závislosti na čase.

Experiment A 6: $n=548 \text{ mm}^{-1}$, $v_c=100 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, $f=0,135 \text{ mm}$, $a_p=3 \text{ mm}$, $D=58 \text{ mm}$, $D_{obr}=38 \text{ mm}$



Obr. 2.12 Složky jednotlivých sil v závislosti na čase.

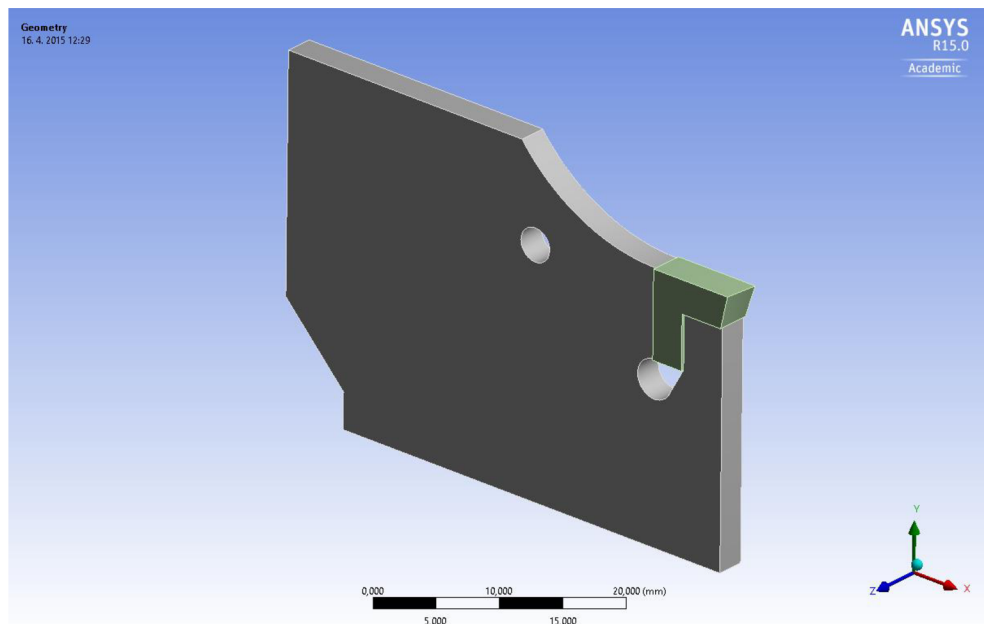
2.7 Zpracování výsledku experimentu

Získané informace o průběhu obráběcího procesu byly zpracovány metodami matematické statistiky, přičemž byly pro každou sílu a zadané řezné podmínky určeny střední hodnoty a směrodatné odchylky; získané hodnoty jsou uvedeny v tabulce 2.5.

Tab. 2.5 Statistické hodnoty pro síly F_c , F_p , F_f .

Číslo experimentu	Střední hodnota sil [N]			Směrodatná odchylka sil [N]		
	Síla řezná F_c	Síla posuvová F_f	Síla pasivní F_p	Síla řezná F_c	Síla posuvová F_f	Síla pasivní F_p
A1	-614	-374,1	-17,77	19,84	10,82	1,08
A2	-623,8	-401,3	-20,45	14,43	12,63	3,79
A3	-632,7	-429,9	-25,89	12,63	12,63	4,15
A4	-903	-508,2	-28,61	19,84	16,24	5,05
A5	-912,8	-545,9	-40,63	14,43	16,24	5,23
A6	-902,5	-548,4	-42,15	14,43	12,63	6,31

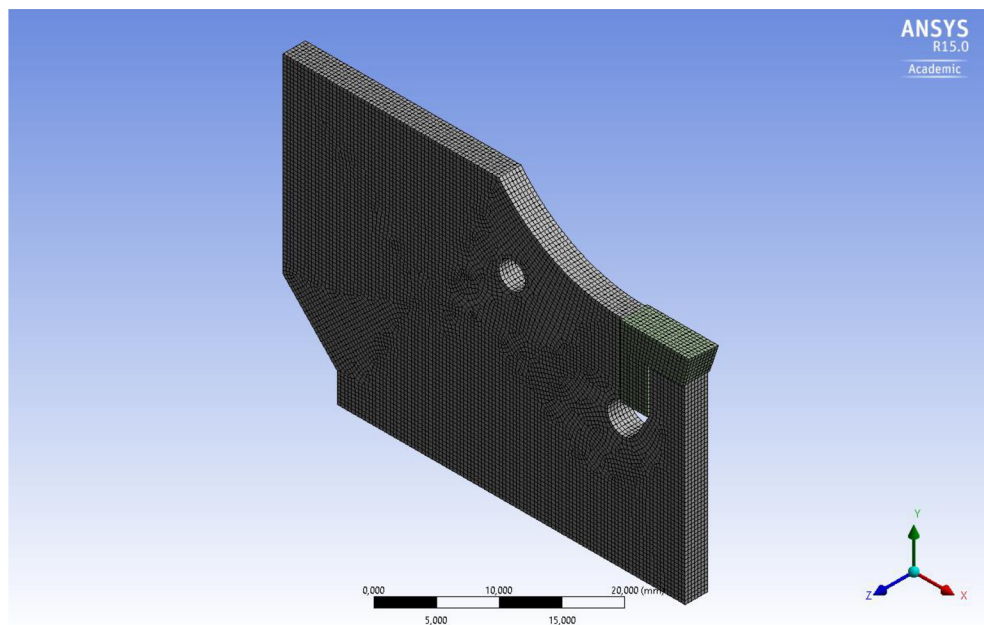
Na základě zpracovaných dat byla za pomoci programu Ansys určena napěťová a celková deformační analýza řezného nástroje při provozních podmínkách. Výsledky analýzy jsou uvedeny v tabulce 2.7÷2.8. Geometrie modelu je dána tvarem řezného nástroje – ocelová planžeta o tloušťce 2,5 mm se vsazenou řeznou destičkou o tloušťce 3 mm (viz obr. 2.13).



Obr. 2.13 Model části řezného nástroje.

Geometrie byla vytvořena pouze pro část nástroje, která vyčnívá z uchycení. Zbylá část nástroje je pevně vetknutá a nemá na výslednou deformaci podstatný vliv. Model byl tvořen plně 3D, protože z důvodu obecného zatížení řeznými silami nelze využít žádnou rovinu symetrie.

Pro výpočet numerickou metodou konečných prvků (MKP) programem Ansys je nutné na geometrickém modelu vytvořit síť konečných prvků. Pro tento konkrétní model byl zvolen kvadratický typ konečných prvků (SOLID186) o velikosti 0,4 mm (viz obr. 2.14).



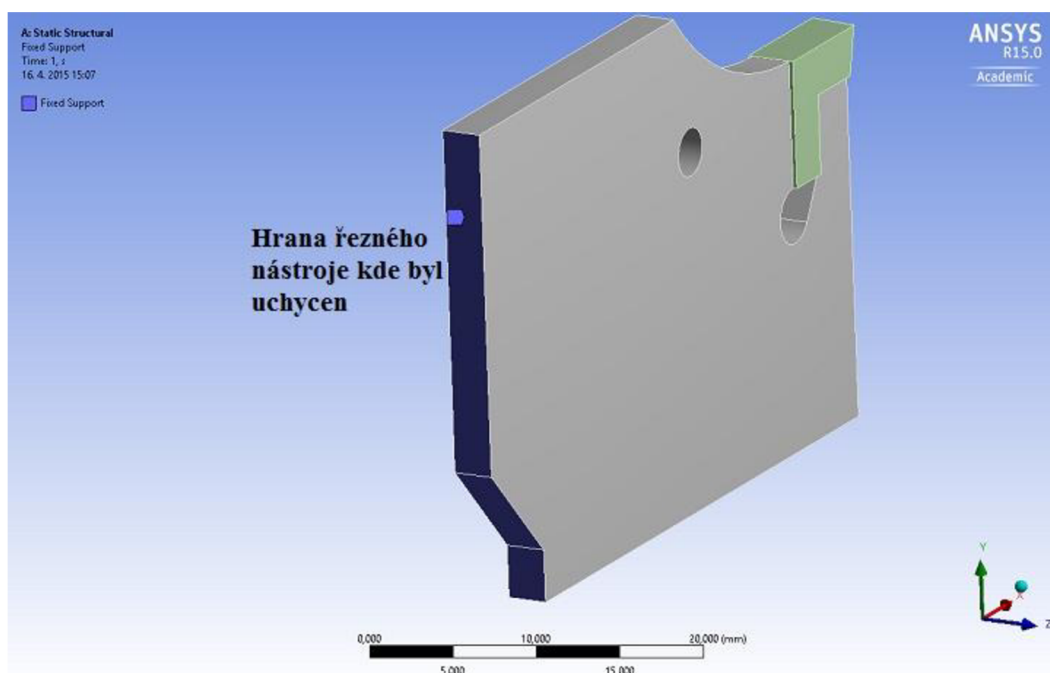
Obr. 2.14 Zasítovaný model.

Materiálové charakteristiky byly použity v souladu s použitými materiály. Vzhledem k tomu že se jednalo pouze o elastickou analýzu a uvažované materiály jsou izotropní, je možné je charakterizovat pouze dvěma konstantami pro planžetu řezného nástroje a vyměnitelnou břitovou destičku (VBD), které jsou uvedeny v tabulce 2.6.

Tab. 2.6 Materiálové charakteristiky komponentů řezného nástroje [13].

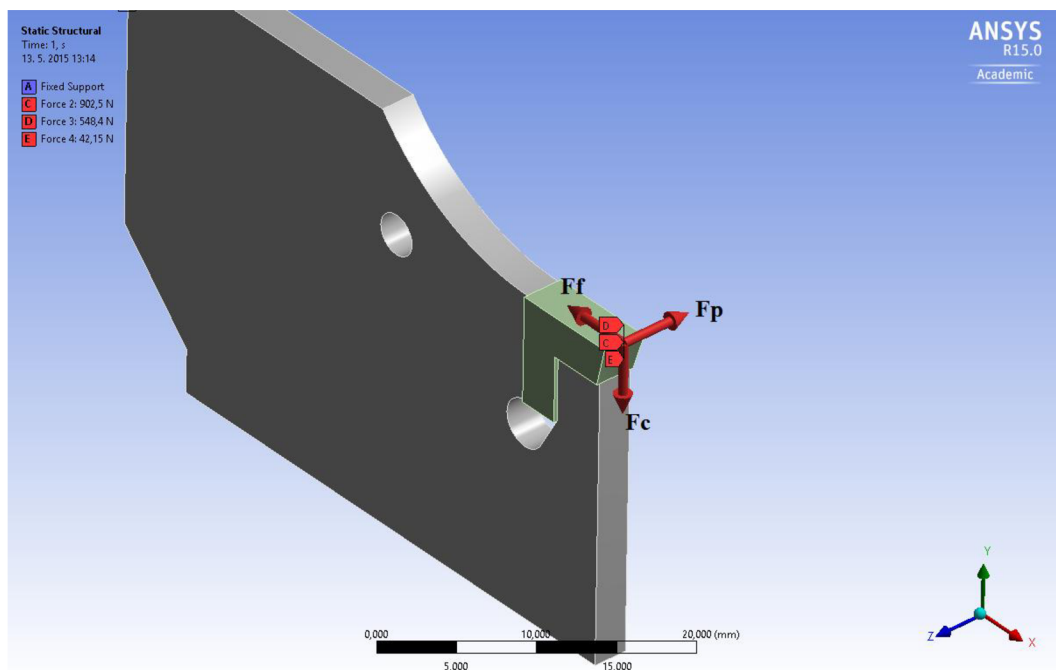
Komponenty nástroje	Modul pružnosti E [MPa]	Poissonovo číslo
Planžeta mat. 15 260	200000	0.274
VBD	590000	0.19

V modelové situaci byl řezný nástroj uchycen v souladu s reálným uchycením nože – v místě, kde dochází k přechodu mezi volnou a uchycenou částí planžety je vloženo pevné uložení, které při numerickém výpočtu zamezuje na dané ploše v pohybu ve všech směrech (vazba typu vetknutí, viz obr. 2.15).



Obr. 2.15 Řezný nástroj uchycení typ vetknutý.

Zatížení řezného nástroje bylo realizováno silově, vložení silového působení na řeznou hranu nástroje dle naměřených hodnot (viz obr. 2.16), které byly zpracovány statisticky a do výpočtu byla použita jejich střední hodnota a směrodatná odchylka (viz tabulka 2.7÷2.8).



Obr. 2.16 Znázornění sil působících na řezný nástroj.

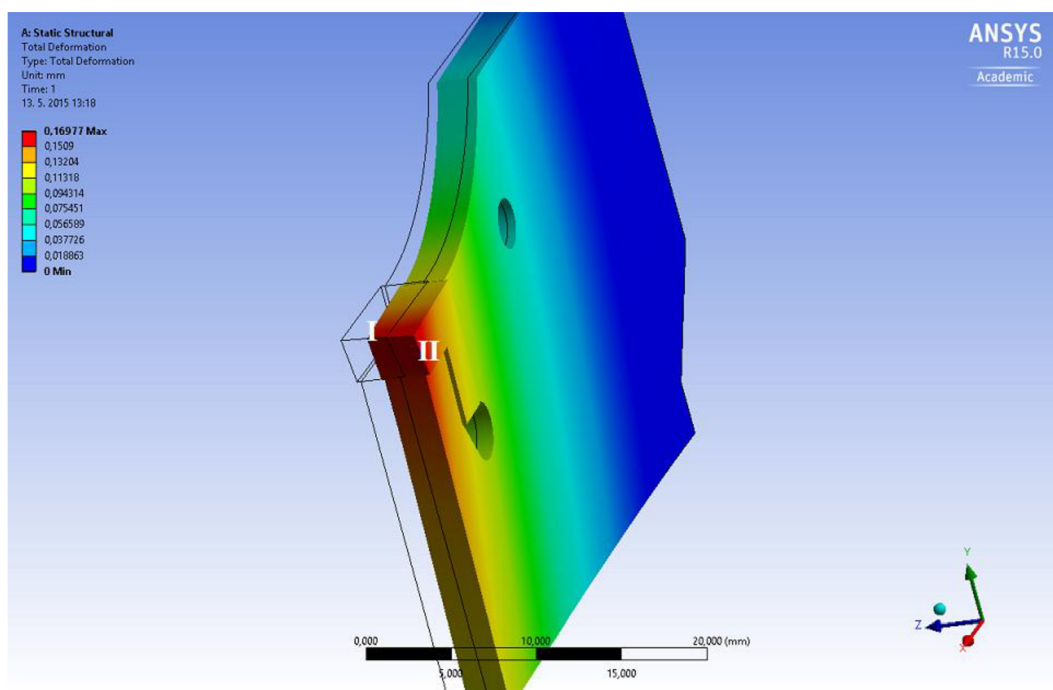
Pro všech šest možných provozních stavů byly provedeny výpočty pomocí Six Sigma Analysis, součásti programu Ansys, která umožňuje mít vstupy i výstupy náhodného charakteru. Pro zadané vstupní zatížení pomocí střední hodnoty a směrodatné odchylky s předpokladem normálního rozložení tak bylo možné získat požadované výsledky deformací, opět definované pomocí střední hodnoty a směrodatné odchylky. Hodnoceny byly největší posuvy hrany řezné destičky, jejich hodnoty byly zaznamenány v tabulce 2. 7. a tabulce 2. 8. a graficky byly znázorněny v závislosti na řezné rychlosti a posuvu. Celkový posun VBD z pozice I do pozice II je délka úhlopříčky, 3D pohled A6 je v měřítku 25:1 (viz obr. 2.17) a čelní pohled A6 je měřítku 25:1 (viz obr. 2.18) při provozním zatížení řezného nástroje. Deformační a napěťová analýza byla zpracována graficky pro jednotlivá měření experimentu. Pohled na A6 v měřítku 25:1 (viz obr. 2.19). Pro jednotlivá měření byly zpracovány grafy funkčních závislostí (viz obr. 2.20 ÷ 2.24).

Tab. 2.7 Hodnoty posunutí střední hodnota VBD.

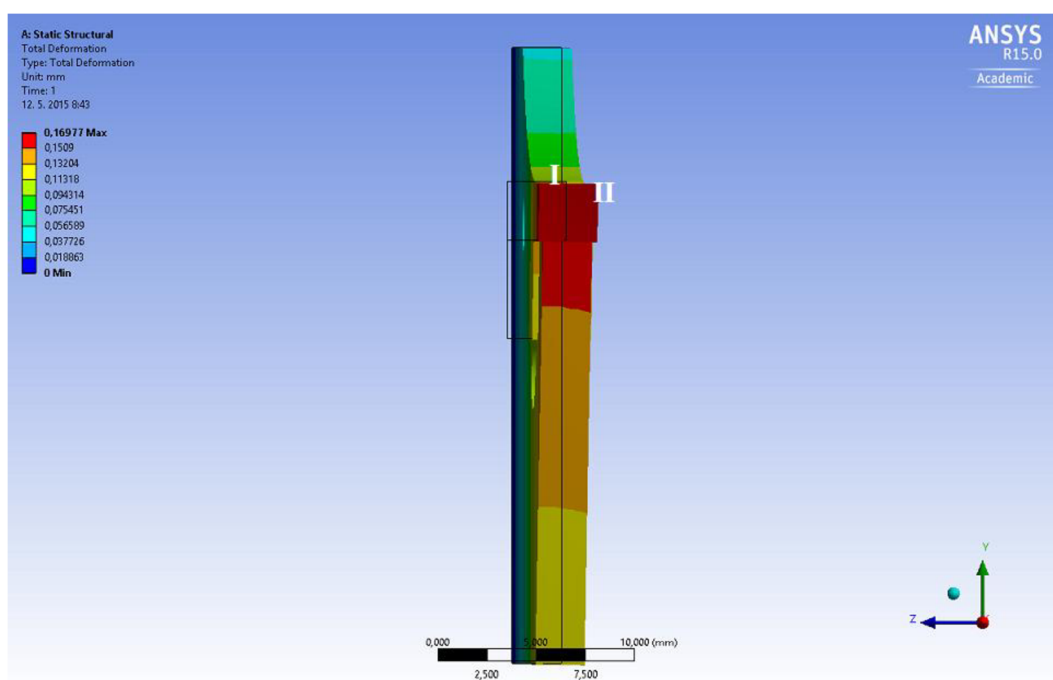
Číslo experimentu	Střední hodnota posunutí [mm]			
	Celkový posun VBD z pozice I do pozice II	Posun ve směru osy x	Posun ve směru osy y	Posun ve směru osy z
A1	0,07217	-0,00727	-0,00805	-0,07135
A2	0,08295	-0,00745	-0,00938	-0,08207
A3	0,10466	-0,00817	-0,01097	-0,10375
A4	0,11589	-0,01198	-0,01009	-0,11483
A5	0,16378	-0,01391	-0,01234	-0,16272
A6	0,16984	-0,014	-0,01275	-0,16878

Tab. 2.8 Hodnoty posunutí směrodatná odchylka VBD.

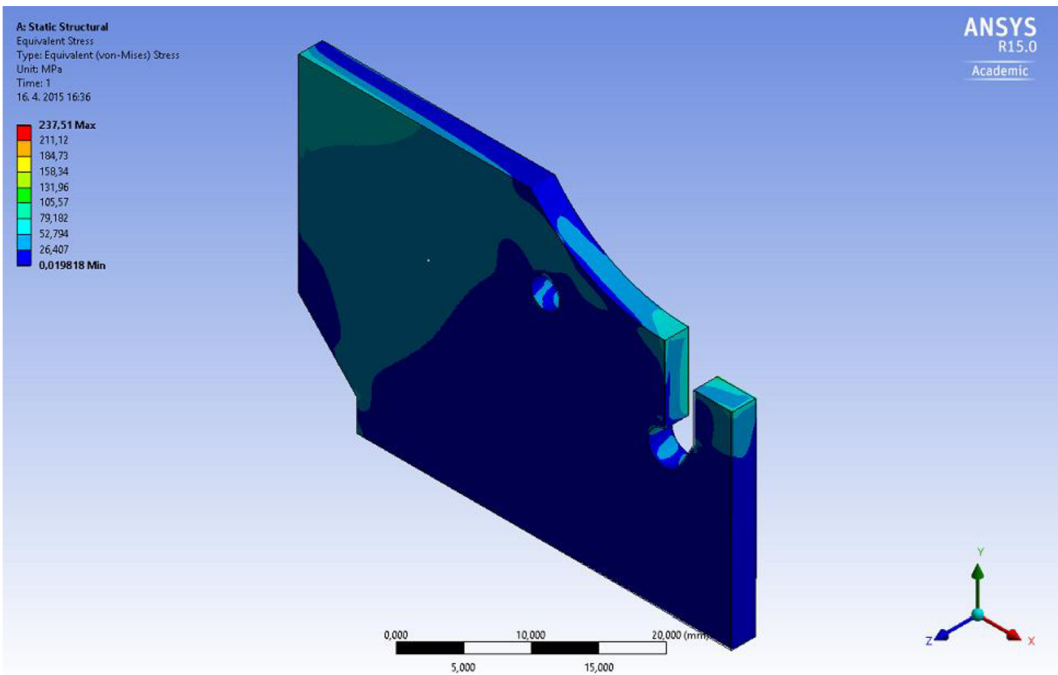
Číslo experimentu	Směrodatná odchylka posunutí [mm]			
	Celkový posun VBD z pozice I do pozice II	Posun ve směru osy x	Posun ve směru osy y	Posun ve směru osy z
A1	0,004335	0,000457	0,000661	0,004355
A2	0,015220	0,000877	0,000742	0,015285
A3	0,016686	0,000941	0,000734	0,016737
A4	0,020313	0,001136	0,000855	0,020367
A5	0,021070	0,00115	0,000905	0,021093
A6	0,025423	0,001347	0,0008	0,025449



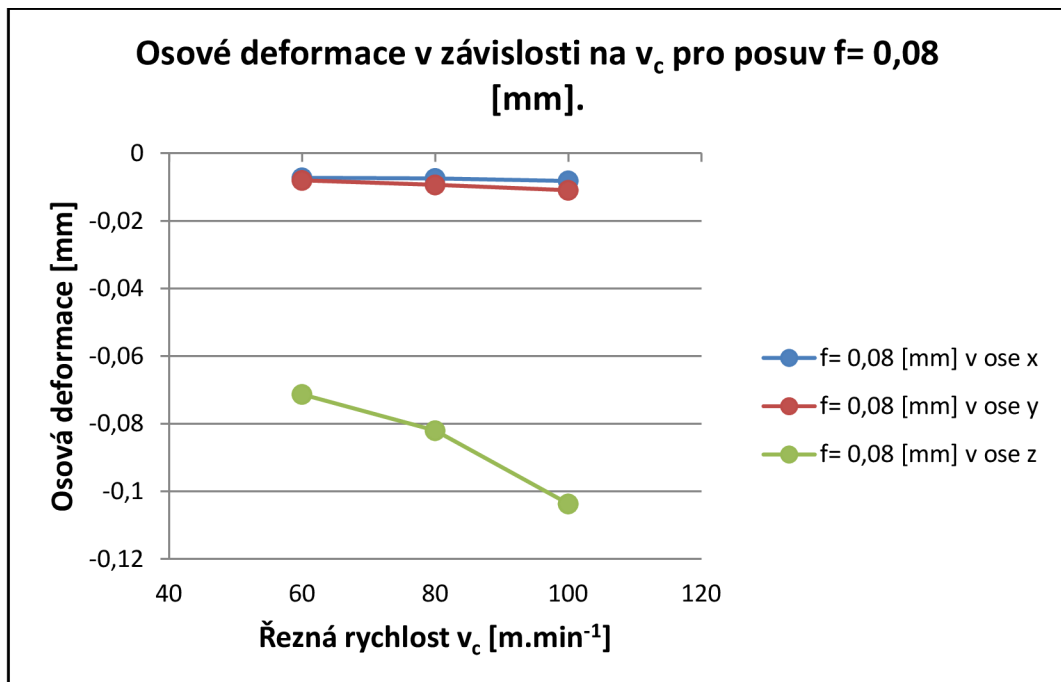
Obr. 2.17 Celkový posun VBD z pozice I do pozice II - 3D pohled.



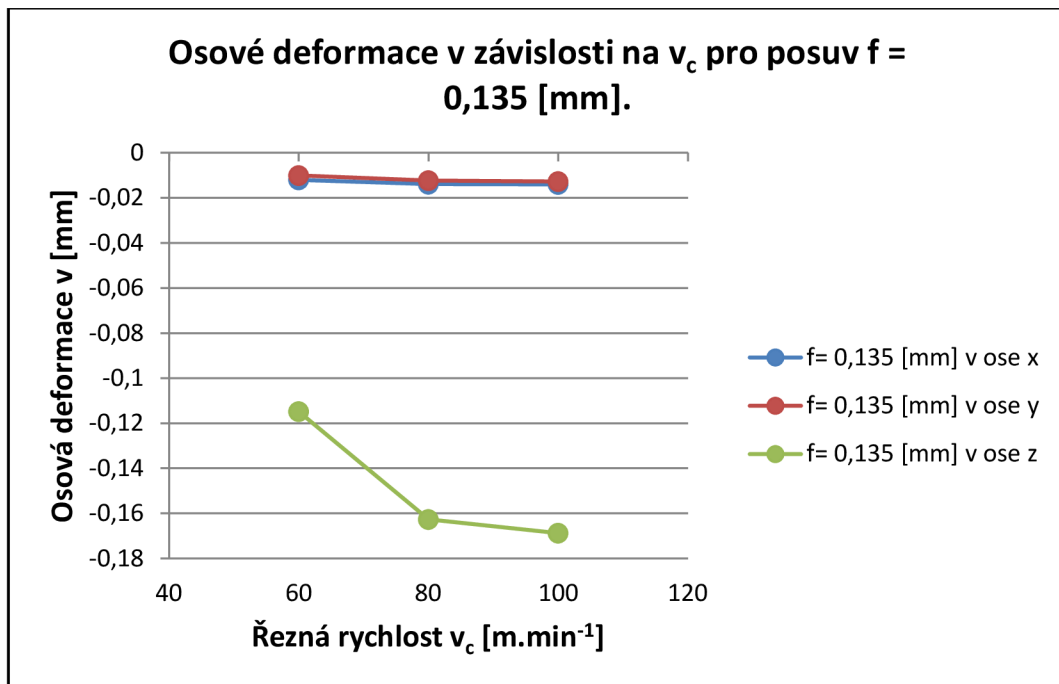
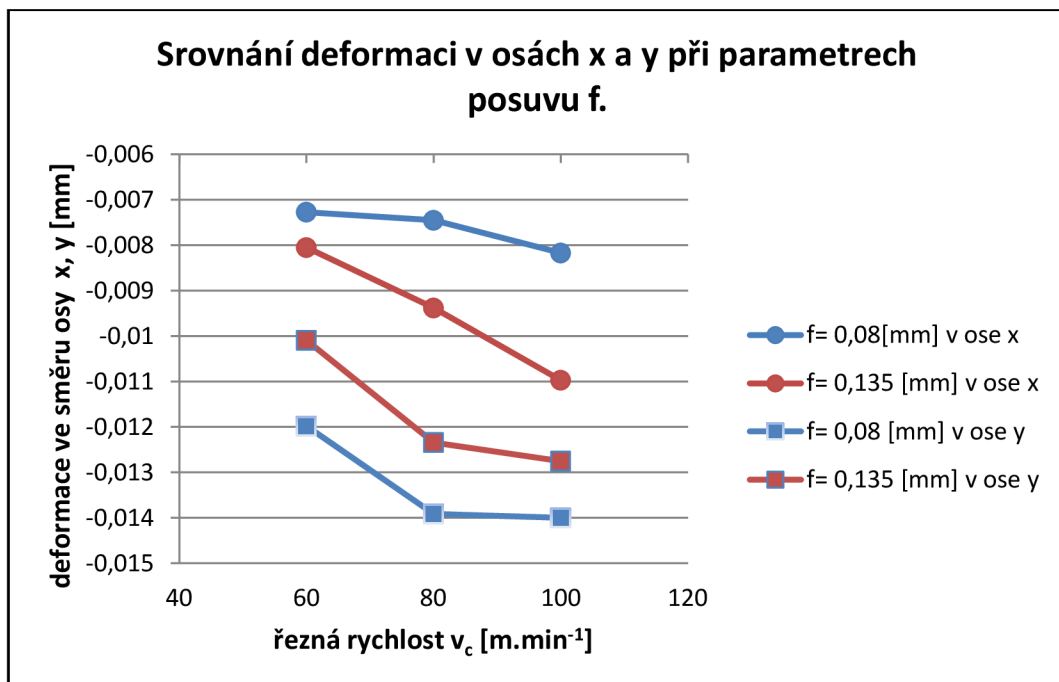
Obr. 2.18 Celkový posun VBD z pozice I do pozice II - čelní pohled.

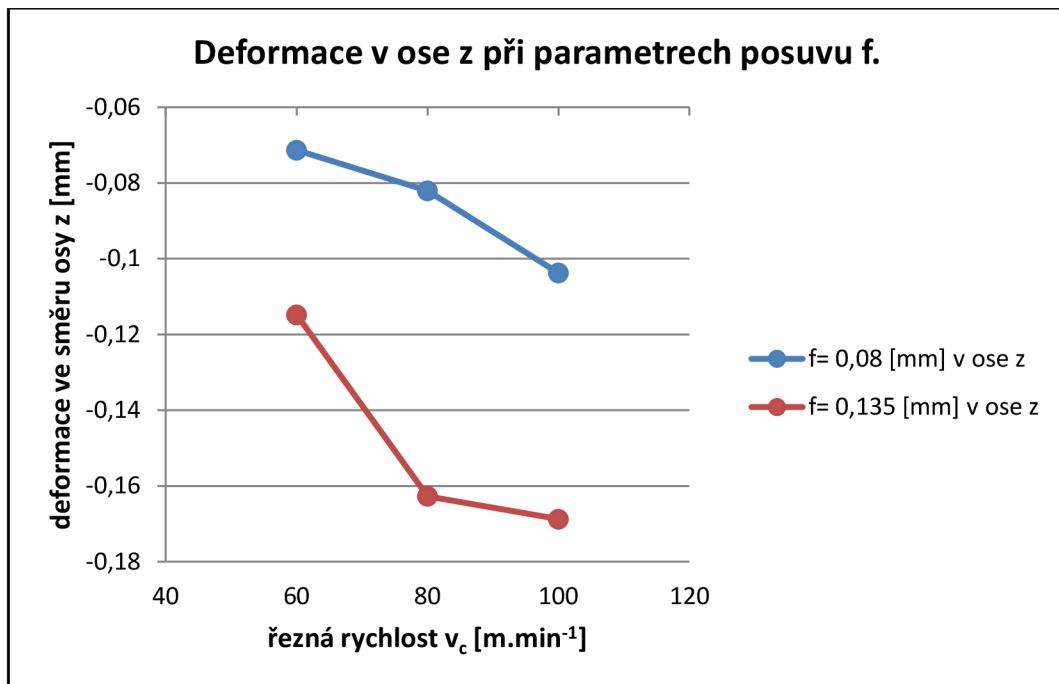


Obr. 2.19 Grafické znázornění napětí při provozním stavu, situace A6.

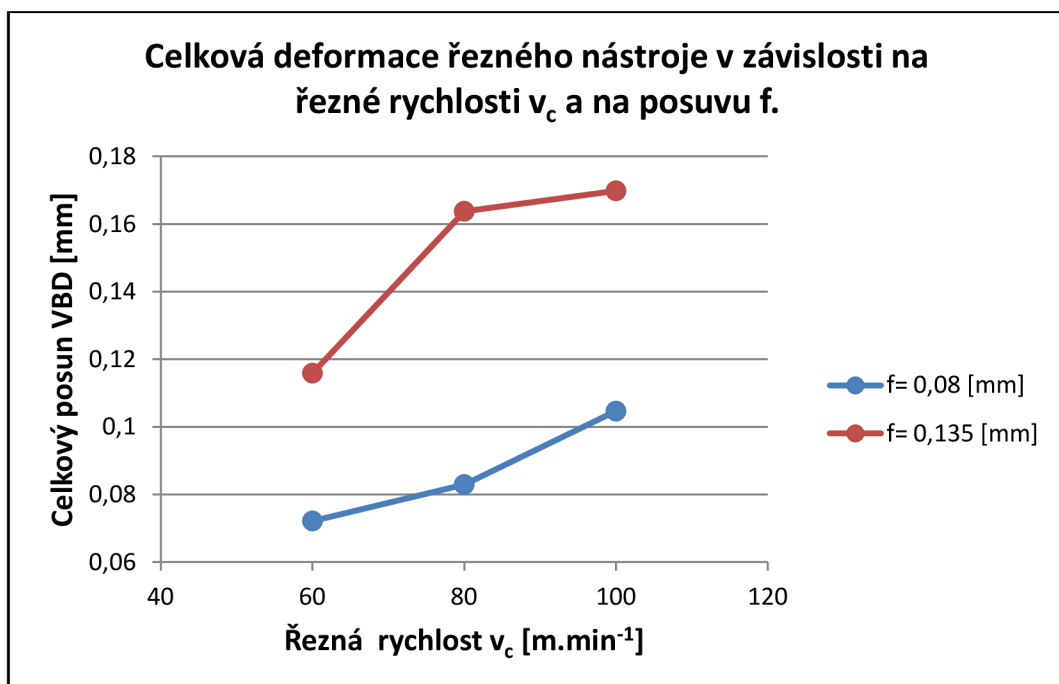


Obr. 2.20 Osová deformace pro posuv $f = 0,08$ [mm].

Obr. 2.21 Osová deformace pro posuv $f = 0,135$ [mm].Obr. 2.22 Deformace v ose x a y při parametrech posuvu f .



Obr. 2.23 Deformace v ose z při parametrech posuvu f.



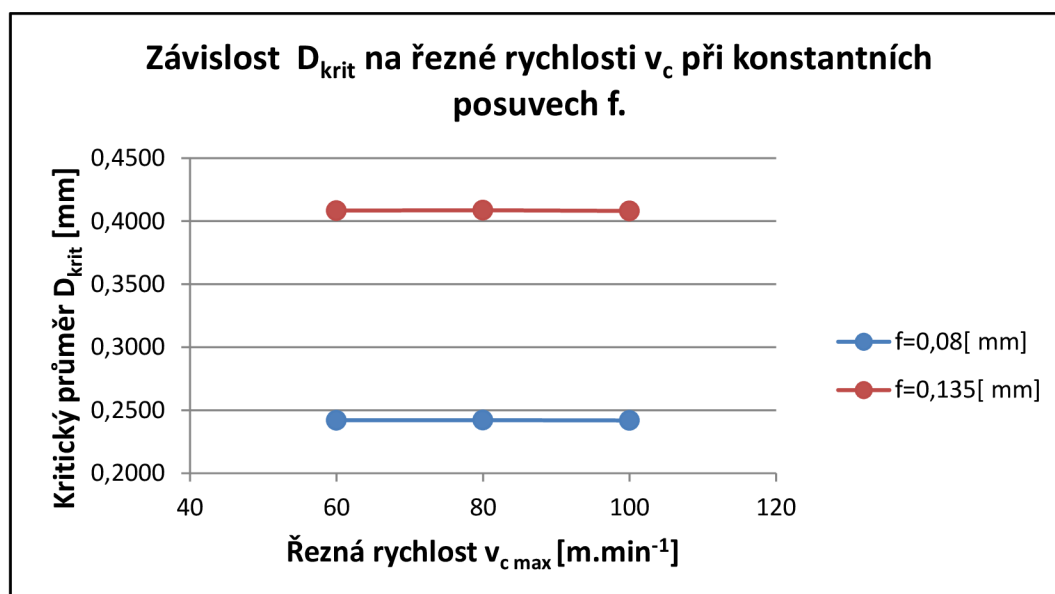
Obr. 2.24 Celková deformace.

2.8 Výpočet kritického průměru

Kritický průměr jako funkce posuvové a řezné rychlosti je pro daný řezný nástroj, vztah $D_{krit} = 2 \cdot \frac{v_f \cdot D}{\tan \alpha_0 \cdot v_{c \max} \cdot 2}$. V tabulce 2.9 jsou uvedeny výsledky výpočtů D_{krit} pro konkrétní podmínky experimentů prováděných v rámci této práce a vyneseny do grafu (viz obr. 2.25).

Tab. 2.9 Vstupy a výsledné hodnoty D_{krit} .

Číslo experimentu	Vstupy do vzorce				Kritický průměr D_{krit} [m]	Kritický průměr D_{krit} [mm]
	Řezná rychlost $v_{c \max}$ [m.min ⁻¹]	Posuvová rychlost v_f [m.min ⁻¹]	Úhel hlavního ostří κ_r [°]	Průměr vzorku D [m]		
A1	60	0.02632	6	0.058	0.0002420	0.2420
A2	80	0.03512	6	0.058	0.0002422	0.2422
A3	100	0.04384	6	0.058	0.0002419	0.2419
A4	60	0.044415	6	0.058	0.0004084	0.4084
A5	80	0.059265	6	0.058	0.0004088	0.4088
A6	100	0.07398	6	0.058	0.0004082	0.4082



Obr. 2.25 Závislost D_{krit} na v_c .

3. DISKUSE VÝSLEDKŮ

3.1 Vliv řezné rychlosti při konstantním posuvu.

Řezná rychlost $v_c = 60, 80, 100$ [m.min⁻¹], posuv $f = 0,08$ [mm]. Z obr. 2.20 vidíme, že;

- osová deformace řezného nástroje ve směru osy x a y ;

- jsou téměř stejné;
- velmi malé (cca = 0,01 mm),
- nezávislé na v_c ,

- osová deformace v ose z ;

- je podstatně větší než v ose x, y (cca = $0,07 \div 0,105$ mm),
- vliv řezné rychlosti v_c je výrazný.

Řezná rychlost $v_c = 60, 80, 100$ [m.min⁻¹], posuv $f = 0,135$ [mm]. Z obr. 2.21 vidíme že;

- osová deformace řezného nástroje ve směru osy x a y ;

- jsou téměř stejné,
- velmi malé (0,012 mm),
- nezávislé na v_c .

- osová deformace v ose z ;

- je podstatně větší než v ose x, y ($0,114 \div 0,168$ mm),
- vliv řezné rychlosti v_c je výrazný.

Řezné rychlosti $v_c = 60, 80, 100$ [m.min⁻¹], deformace ve směru osy x a y pro hodnoty posuvu $f = 0,08$ [mm] a $f = 0,135$ [mm]. Z obr. 2.22 vidíme, že;

- v detailním pohledu je deformace v osách x a y závislá nejvíce na posuvu, ale absolutní vypočtené hodnoty jsou velmi malé ($0,008 \div 0,014$ mm).

Řezné rychlosti $v_c = 60, 80, 100$ [m.min⁻¹], deformace ve směru osy z pro hodnoty posuvu $f = 0,08$ [mm] a $f = 0,135$ [mm]. Z obr. 2.23 vidíme, že;

- deformace v ose z je závislá na posuvu a řezné rychlosti,
- její hodnoty jsou o řád vyšší než v osách x a y ,
- je nejvýznamnější složkou celkové deformace.

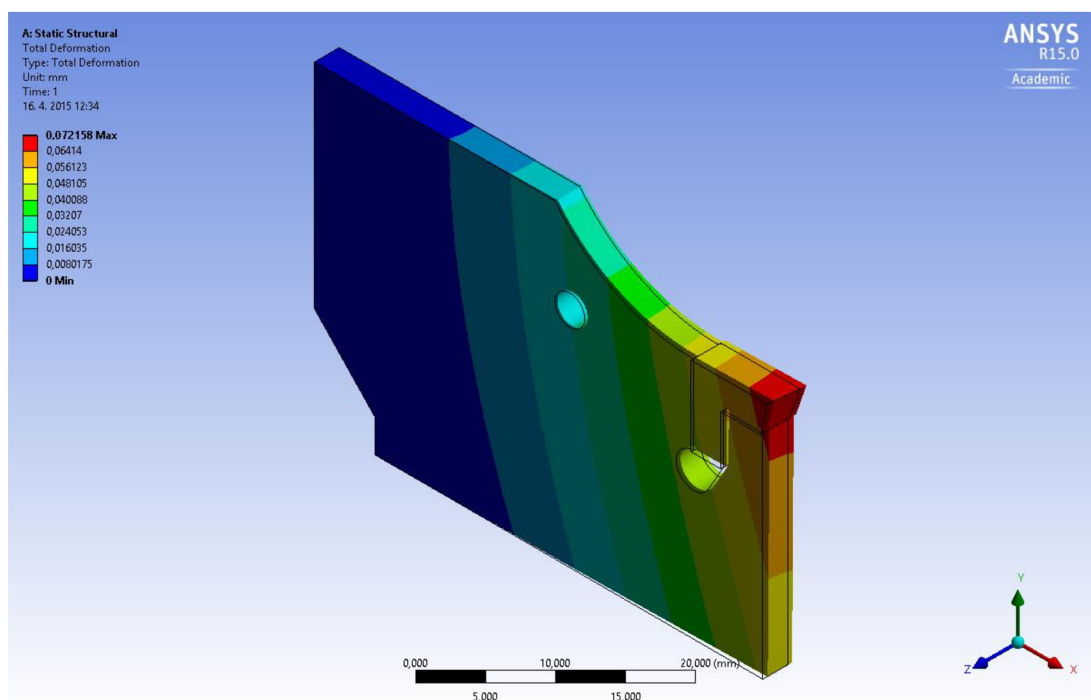
Řezné rychlosti $v_c = 60, 80, 100$ [m.min⁻¹], deformace celková pro hodnoty posuvu $f = 0,08$ [mm] a $f = 0,135$ [mm]. Z obr. 2.24 vidíme, že;

- při všech hodnotách řezné rychlosti je celková deformace výrazně větší při posuvu $f = 0,135$ [mm] než při posuvu $f = 0,08$ [mm],
- vyšší parametry řezného procesu způsobují vyšší deformaci řezného nástroje.

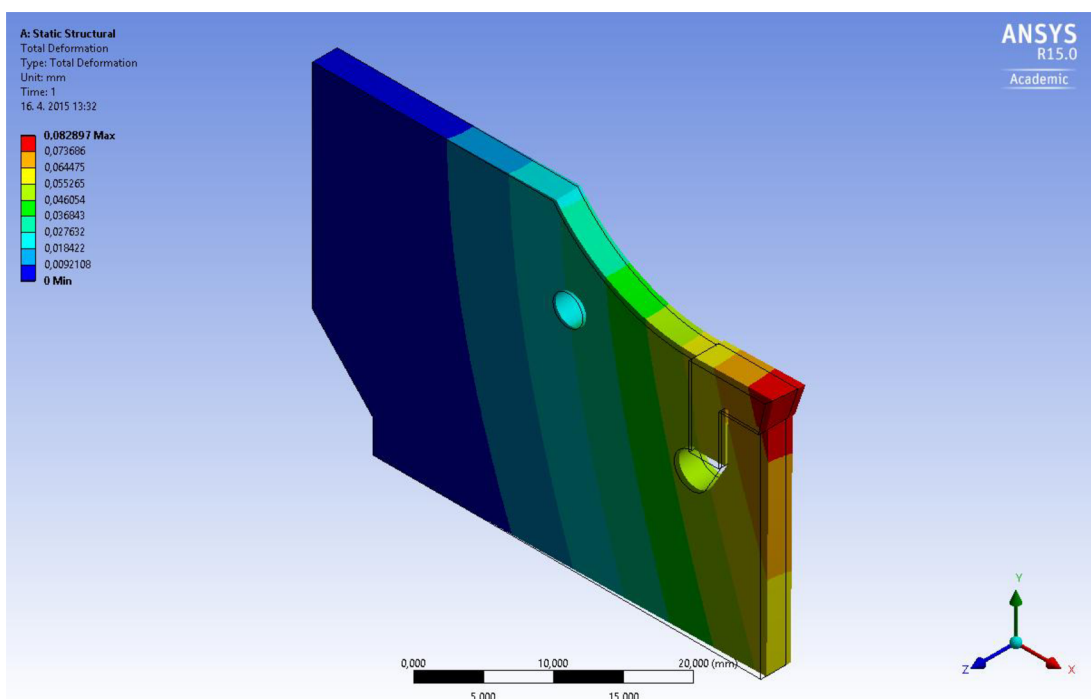
3.2 Grafická vizualizace

Obr. 2.26÷2.37 jsou grafickým výstupem výpočetního programu Ansys v měřítku 25:1.

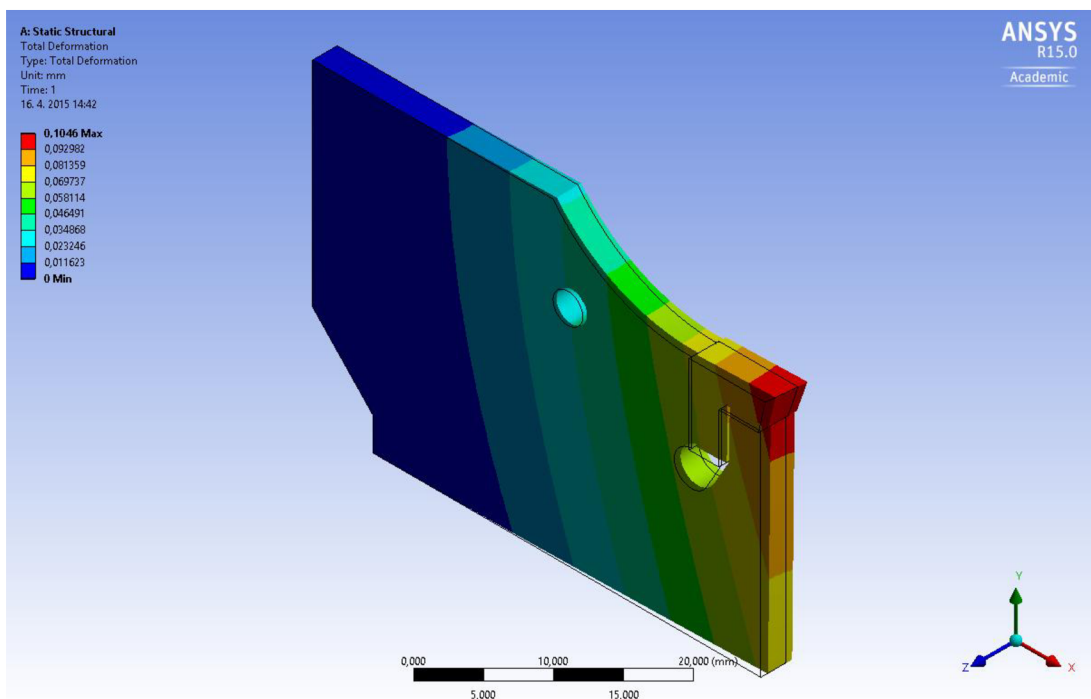
Na obrázku 2.26 ÷ 2.31 je znázorněná celková deformace řezného nástroje při experimentálních řezných rychlostech a posuvech. Z obrázku je zřejmé, že rostoucí parametry řezného procesu vyvolávají větší deformaci řezného nástroje.



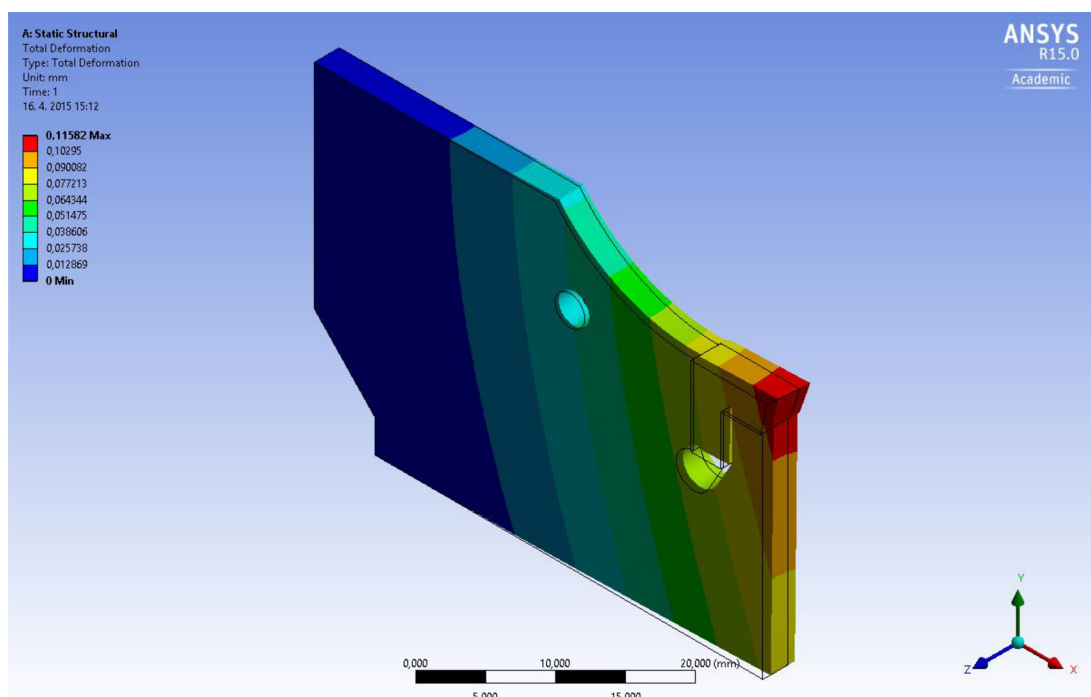
Obr. 2.26 Celková deformace řezného nástroje pro $v_c = 60$ [m.min⁻¹] a $f = 0,08$ [mm].



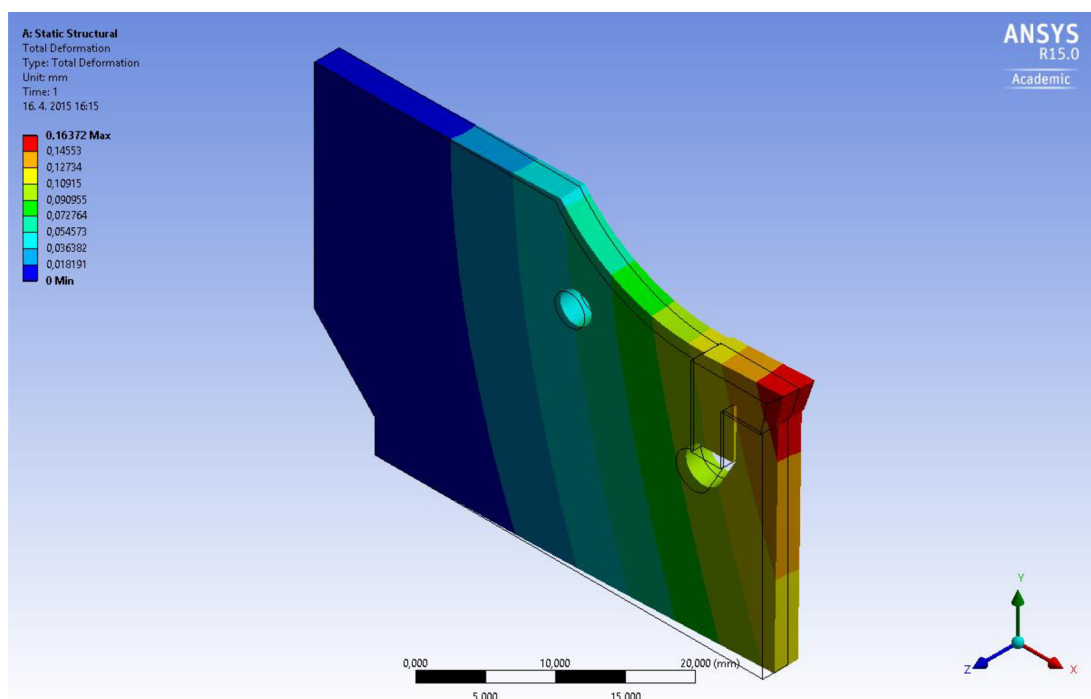
Obr. 2.27 Celková deformace řezného nástroje pro $v_c = 80$ [m.min⁻¹] a $f = 0,08$ [mm].



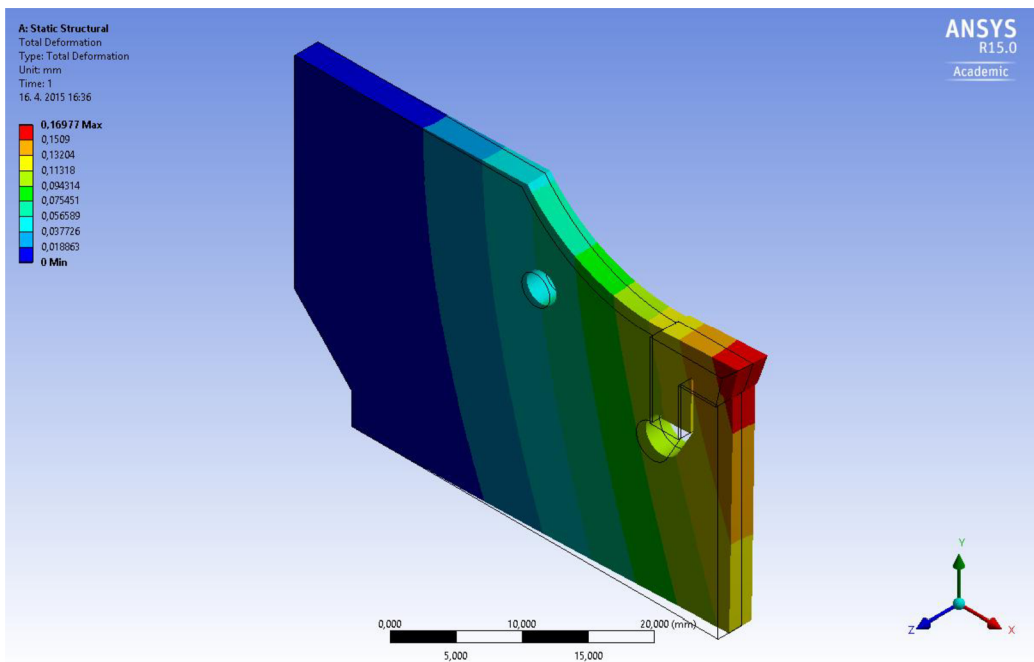
Obr. 2.28 Celková deformace řezného nástroje pro $v_c = 100$ [m.min⁻¹] a $f = 0,08$ [mm].



Obr. 2.29 Celková deformace řezného nástroje pro $v_c = 60$ [m.min⁻¹] a $f = 0,135$ [mm].

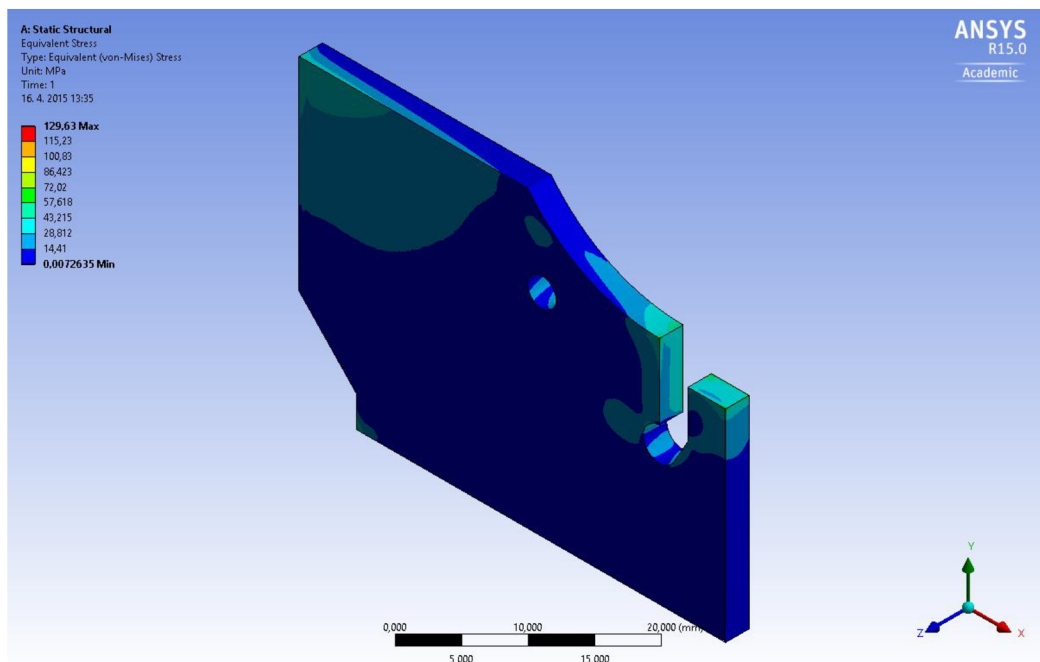


Obr. 2.30 Celková deformace řezného nástroje pro $v_c = 80$ [m.min⁻¹] a $f = 0,135$ [mm].

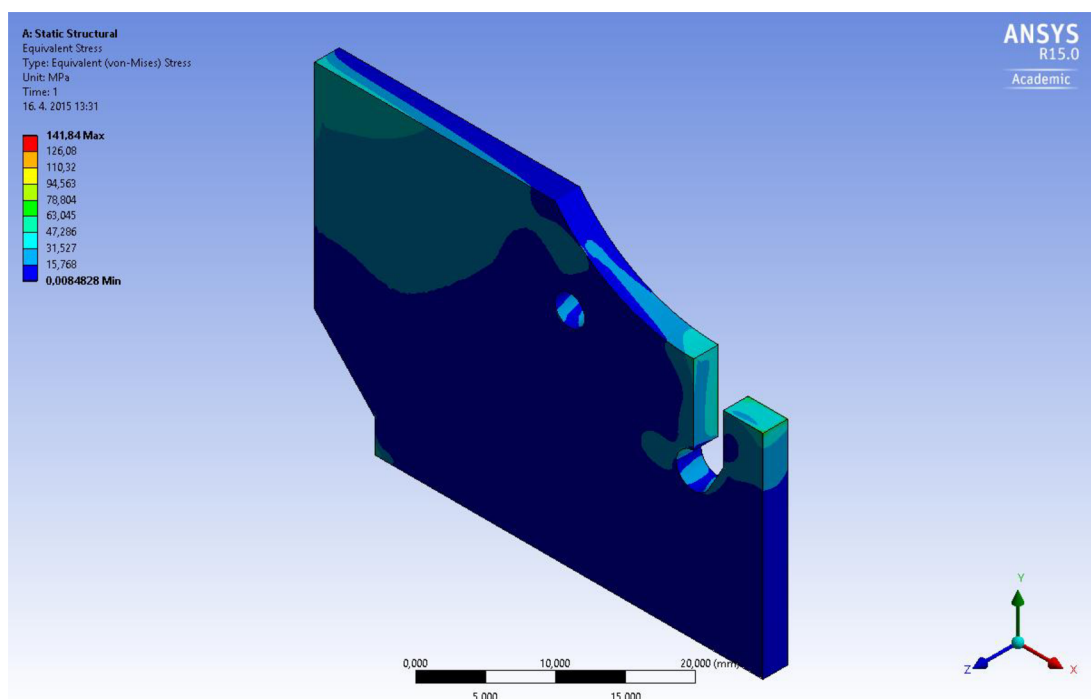


Obr. 2.31 Celková deformace řezného nástroje pro $v_c = 100$ [m.min⁻¹] a $f = 0,135$ [mm].

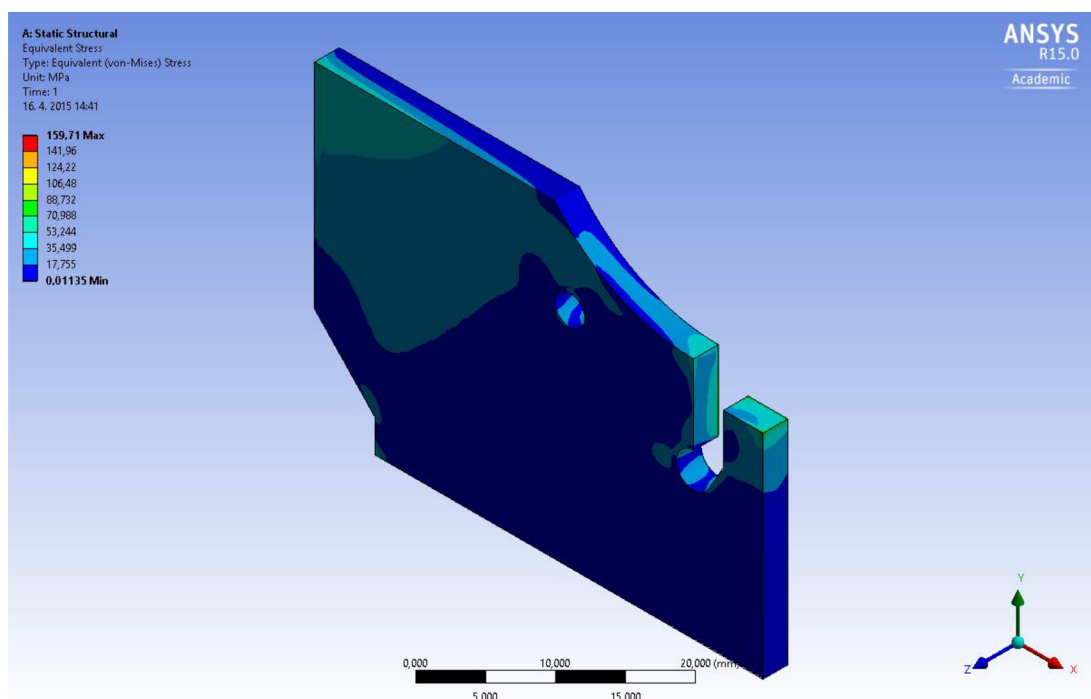
Na obrázku 2.32 ÷ 2.37 je vidět průběh napětí vyvolané v těle řezného nástroje při experimentálních řezných rychlostech a posuvech. Z obrázku je zřejmé, že rostoucí parametry řezného procesu vyvolávají větší napětí v těle řezného nástroje, zvláště v oblasti upínání VBD, kde je téměř dvojnásobné.



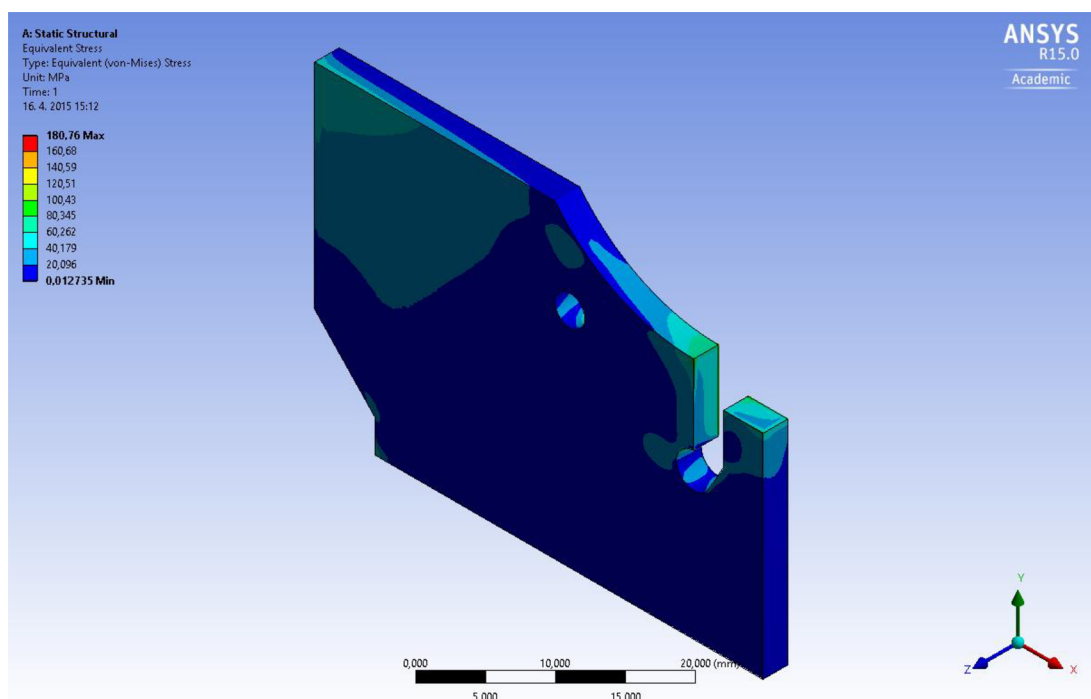
Obr. 2.32 Celkové napětí v těle řezného nástroje pro $v_c = 60$ [m.min⁻¹] a $f = 0,08$ [mm].



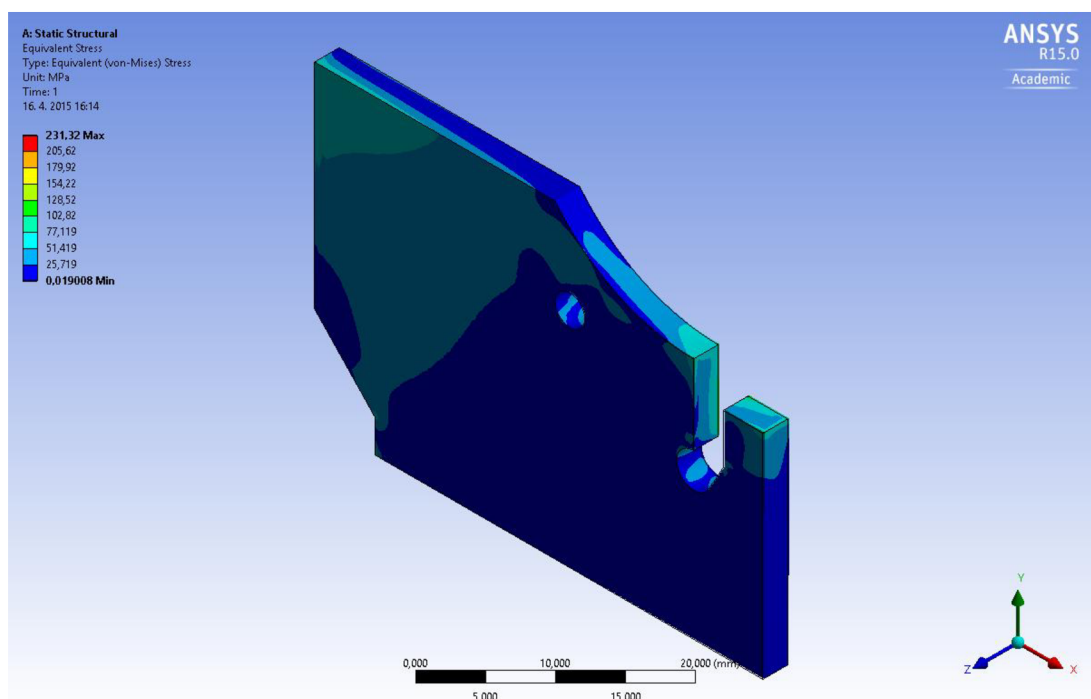
Obr. 2.33 Celkové napětí v těle řezného nástroje pro $v_c = 80 \text{ [m.min}^{-1}\text{]}$ a $f = 0,08 \text{ [mm]}$.



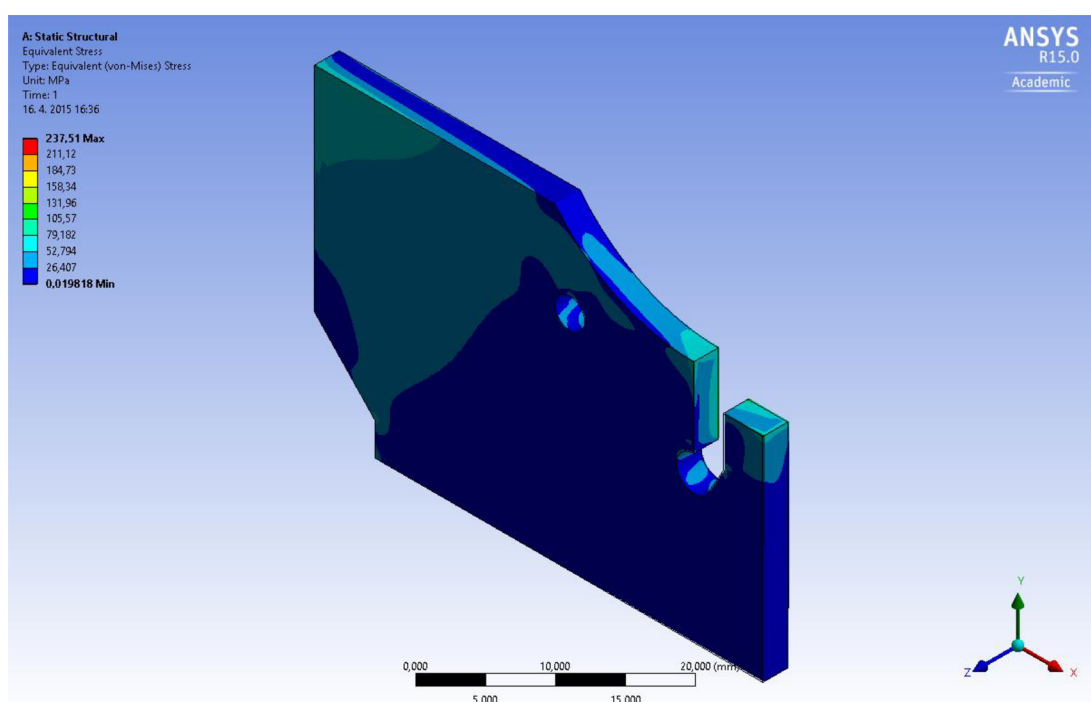
Obr. 2.34 Celkové napětí v těle řezného nástroje pro $v_c = 100 \text{ [m.min}^{-1}\text{]}$ a $f = 0,08 \text{ [mm]}$.



Obr. 2.35 Celkové napětí v těle řezného nástroje pro $v_c = 60$ [m.min⁻¹] a $f = 0,135$ [mm].



Obr. 2.36 Celkové napětí v těle řezného nástroje pro $v_c = 80$ [m.min⁻¹] a $f = 0,135$ [mm].



Obr. 2.37 Celkové napětí v těle řezného nástroje pro $v_c = 100$ [m.min⁻¹] a $f = 0,135$ [mm].

3.3 Kritický průměr

Z tabulky 2.9 je zřejmé, že na D_{krit} má největší vliv změna posuvové rychlosti v_f , vliv změny řezné rychlosti v_c je velice nepatrný. Rozdíl je nejvíce vidět mezi experimentem A3 a A4, kde se mění hodnota v_f . Při nárůstu v_f narůstá D_{krit} , což je patrné z grafu závislosti D_{krit} na v_c (obr. 2.25).

ZÁVĚR

V předkládané práci jsou uvedeny výsledky deformační analýzy řezného nástroje určeného k upichování a zapichování s nenulovým úhlem κ_r vytvořené na základě experimentálně získaných údajů o silovém zatížení nástroje během reálného procesu obrábění.

Bylo zjištěno, že:

- největší vliv na deformaci řezného nástroje nemá řezná rychlost v_c , ale posuv v milimetrech na otáčku f ,
- deformace řezného nástroje ovlivňuje tvarovou přesnost obrobku, nejvíce je ovlivněná rovinnost čelních ploch,
- ke snížení vlivu deformace řezného nástroje je potřeba snížit posuv.

Při použití řezné nástroje s nenulovým úhlem nastavení hlavního ostří lze dosáhnout menšího středového čepu než s řezným nástrojem nulovým úhlem nastavení hlavního ostří.

- na velikost středového čepu nemá vliv řezná rychlost v_c , ale posuv v milimetrech na otáčku f ,
- pro zmenšení středového čepu je potřeba snížit posuv.

Dále bylo při obráběcím procesu pozorováno, že:

- na začátku procesu obrábění vzniká dlouhá tříska, která se tře o boční obrobenou plochu obrobku,
- tím je nepříznivě ovlivněna drsnost obráběných ploch,
- z toho hlediska se jeví vhodnější použít řezný nástroj s nulovým úhlem nastavení hlavního ostří.

Tento experiment ověřil a potvrdil poznatky o chování řezného nástroje pro upichování a zapichování s nenulovým úhlem hlavního ostří κ_r , které jsou uvedeny v publikacích a literaturách výrobců těchto řezných nástrojů, např. v [1,11].

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. AB SANDVIK COROMANT. *Příručka obrábění: Kniha pro praktiky*. Praha: Scientia, 1997. ISBN 91-97 22 99-4-6.
2. FOREJT, Milan a PÍŠKA, Miroslav. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 225 s. ISBN 80-214-2374-9.
3. AXMANOVÁ, Hana. *Moderní řezné nástroje pro zapichování a upichování*. Brno, 2013, 61 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství
4. KOCMAN, Karel. *Technologie obrábění*. 2. vyd. Brno: CERM, 2005, 270 s. ISBN 80-214-3068-0.
5. MARTINEZ, Carlos Bueno. *MM PRŮMYSLOVÉ SPEKTRUM Nástroje a strategie použití pro upichování a zapichování* [online]. © 2015. 2013 [cit. 2015-05-25]. Dostupné z: <http://www.cnckonstrukce.cz/novinka-121/nastroje-a-strategie-pouziti-pro-upichovani-a-zapichovani.html>
6. SKOPEČEK, Tomáš. *MM PRŮMYSLOVÉ SPEKTRUM Vliv vybraných parametrů procesu na řezné síly při HSC* [online]. © 2015. 2002 [cit. 2015-05-25]. Dostupné z: <http://www.cnckonstrukce.cz/clanek-118/vliv-vybranych-parametru-procesu-na-rezne-sily-pri-hsc.html>
7. HUMÁR, Anton. *Technologie I, technologie obrábění - 1. část: studijní opory pro magisterskou formu studia* [online]. © 2015 UST. Brno: VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, 2003 [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf
8. HOUDEC, Josef a KOUŘIL, Karel. *MM PRŮMYSLOVÉ SPEKTRUM Opatření břitů nástrojů ze slinutých karbidů* [online]. © 2015. 2005 [cit. 2015-05-25]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/opotrebeni-britu-nastroju-ze-slinutych-karbidu-2.html>
9. SANDVIK COROMANT, SANDVIK. *Opatření břitové destičky* [online]. [cit. 2015-05-25]. Dostupné z: http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/cutting_tool_materials/wear_on_cutting_edges/pages/default.aspx
10. BORO VAN, Petr. *Technický týdeník* [online]. © 2015. 2012 [cit. 2015-05-25]. Dostupné z: <http://www.t-support.cz/kat/soustruznicke-nastroje-3>
11. ISCAR TOOL, *Nástroje pro zapichování* [online]. © 2015. 2012 [cit. 2015-05-25]. Dostupné z: <http://www.iscar.cz/Products.aspx/CountryId/6/ProductId/10>
12. HUMÁR, Anton. *Materiály pro řezné nástroje*. Praha: MM Publishing, 2008, 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.
13. LEINVEBER, Jan a VÁVRA, Pavel. *Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. 4., dopl. vyd. Úvaly: Albra, 2008, xiv, 914 s. ISBN 978-80-7361-051-7.
14. ISCAR TOOL, *Katalog nových produktů: Czech Version 2013*. č.4. 2013, 254 s.
15. TOS KUŘIM. Dokumentace ke stroji SU50A – SP.

16. KISTLER, [online]. © 2014 Kistler Holding AG. [cit. 2015-05-25]. Dostupné z: [http://www.kistler.com/cz/en/suche/?tx_kesearch_pi1\[sword\]=9257&tx_kesearch_pi1\[page\]=1&tx_kesearch_pi1\[resetFilters\]=0&tx_kesearch_pi1\[sortByField\]=&tx_kesearch_pi1\[sortByDir\]=](http://www.kistler.com/cz/en/suche/?tx_kesearch_pi1[sword]=9257&tx_kesearch_pi1[page]=1&tx_kesearch_pi1[resetFilters]=0&tx_kesearch_pi1[sortByField]=&tx_kesearch_pi1[sortByDir]=)
17. PRAMET TOOLS, s.r.o. , ČR. *Soustružení, Nože pro upichování a zapichování* [online]. © Copyright Pramet 2015. [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <http://www.pramet.cz/cz/produkty/soustruzeni/noze-pro-upichovani-a-zapichovani.html>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
A_D	[mm ²]	plocha průřezu třísky
C_T	[-]	konstanta
C_{FC}, C_{Ff}, C_{Fp}	[-]	materiálové konstanty
D	[mm]	průměr obrobku
D_{krit}	[mm]	kritický průměr obrobku
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
KV_Y	[mm]	radiální opotřebení špičky
L	[mm]	délka experimentálního vzorku
R_e	[MPa]	mez kluzu
T	[min]	trvanlivost bříty
VB	[mm]	opotřebení na hřbetě
VB_B	[mm]	průměrné opotřebení hřbetu
VB_{Bmax}	[mm]	maximální opotřebení hřbetu
VB_N	[mm]	vrubové opotřebení hřbetu
VB_C	[mm]	opotřebení hřbetu v oblasti špičky
a_p	[mm]	šířka záběru hlavního ostří
f	[mm]	posuv na otáčku
m	[-]	exponent
n	[min ⁻¹]	otáčky obrobku
t	[s]	čas řezného procesu
v_c	[m.min ⁻¹]	řezná rychlost
$v_{c max}$	[m.min ⁻¹]	maximální řezná síla
v_e	[m.min ⁻¹]	celková řezná rychlost
v_f	[m.min ⁻¹]	posuvová rychlost
x	[mm]	vzdálenost od osy obrobku
x_{Fc}, x_{Ff}, x_{Fp}	[-]	exponent vlivu šířky záběru a_p

y_{Fc}, y_{Ff}, y_{Fp}	[-]	exponent vlivu posuvu f
α_o	[°]	ortogonální úhel hřbetu
η	[°]	řezný úhel
κ_r	[°]	úhel nastavení hlavního ostří
π	[-]	Ludolfovo číslo
φ	[°]	úhel nastavení ostří směr hlavního pohybu
CVD		chemický proces povlakování
PVD		fyzikální proces povlakování
HFCVD		chemický proces povlakování se žhavicím vláknem
LICVD		laserem indukovaný chemický proces povlakování
LPCVD		nízkotlaký chemický proces povlakování
SK		slinutý karbid
VBD		vyměnitelná břitová destička

