



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

ANALÝZA SOUČASNÝCH TECHNOLOGIÍ UPICHOVÁNÍ A ZAPICHOVÁNÍ

ANALYSIS OF CURRENT PARTING AND GROOVING TECHNOLOGIES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Filip Gažo

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.

BRNO 2020

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Bc. Filip Gažo**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.**
Akademický rok: 2019/20

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:

Analyza současných technologií upichování a zapichování

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Rozbor soudobých technologií zapichování a upichování, návrh postupu obrábění, výběr nástrojů, řezných podmínek, stanovení strategie obrábění, verifikace a rozbor dosažených výsledků.

Cíle diplomové práce:

Studie problematiky zapichování a upichování dílů, návrh technologie řezných zkoušek, technologicko-ekonomické zhodnocení dosažených výsledků.

Seznam doporučené literatury:

DERFLINGER, V. H., SCHUTZE, A., ANTE, M. Mechanical and structural properties of various alloyed TiAlN-based hard coatings. *Surface & Coatings Technology*, 2006, Vol. 200, pp. 4693 – 4700.

EE, K. C., BALAJI, A. K., JAWAHIR, I. S. Progressive Tool-wear Mechanisms and their Effects on Chip Curl/Chip-form in Machining with Grooved Tools. *Wear*, 2003, Vol. 255, pp. 1404-1413.

FOFANA, M. S., EE, K. C., JAWAHIR I. S. Machining Stability in Turning Operations when Cutting with a Progressively Worn Tool Insert. *Wear*, 2003, Vol. 255, pp. 1395-1403.

FOREJT, M., PÍŠKA, M. *Theory of Machining, Forming and Cutting tools*. Brno: CERM, 2006. ISBN 80-214-2374-9.

JAWAHIR, I. S. AND BALAJI, A. K. Predictive Modeling and Optimization of Turning Operations with Complex Grooved Tools for Curled Chip Formation and Chip Breaking. *Machining Science & Technology*, 2000, Vol. 4, pp. 399-443.

PARAKKAL, G., ZHU, R., KAPOOR, S. G. AND DEVOR, R. E. Modeling of turning process cutting forces for grooved tools. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2002, Vol. 42, pp.179-19.

BOBZIN, K. High-performance coatings for cutting tools. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. 2017, 18, 1-9.

WANIGARATHNE, P. C., KARDEKAR, A. D., DILLON, O. W., POULACHON, G. AND JAWAHIR, I. S. Progressive Tool-wear in Machining with Coated Grooved Tools and Its Correlation with Cutting Temperature, Wear, 2005, Vol. 259, pp. 1215-1224.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

GAŽO Filip: Analýza současných technologií upichování a zapichování

Táto diplomová práca sa zaoberá a komplexne spája teoretické poznatky z oblasti sústruženia, výroby zápichov a upichovania materiálu. Taktiež sa venuje teórii materiálov rezných nástrojov ako aj ich konštrukčnej a tvarovej charakteristike. V praktickej časti práce je navrhnutý postup a podmienky potrebné pre vykonanie experimentu merania silového zaťaženia nástroja, ako aj popisu technického prevedenia zapichovania. V neposlednom rade sú všetky namerané dáta vyhodnotené a vykreslené do závislostí, z ktorých sú vyvedené výsledky a odporúčania pre optimálnu tvorbu zápichov pri konkrétnom reznom nástroji.

Klíčové slová

Sústruženie, upichovanie, zapichovanie, silová analýza

ABSTRACT

GAŽO Filip: Analysis of current parting and grooving technologies

This diploma thesis deals and comprehensively unifies the theoretical knowledge in the field of turning, grooving and parting of material. Furthermore, the thesis also deals with the theory of cutting tool materials as well as tool's construction and shape characteristics. In the practical part of the thesis there is proposed procedure and conditions necessary to perform the experiment of the tool force loaded measurements, as well as the technical description of the grooving process. Last but not the least, all the measured data is evaluated and plotted into dependencies, from which the results and recommendations for the optimal groove cutting with the particular cutting tool are made.

Keywords

Turning, parting, grooving, force analysis

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

GAŽO, Filip. *Analýza současných technologií upichování a zapichování*. Brno, 2020. 62s. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/121497>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce prof. Ing. Miroslav Piška, CSc.

ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Týmto prehlasujem, že predkladanú diplomovú prácu som vypracoval samostatne, s využitím uvedenej literatúry a podkladov, na základe konzultácií a pod vedením vedúceho diplomovej práce.

V Brne dňa 26.6.2020

.....

Podpis

POĎAKOVANIE

Týmto ďakujem pánovi prof. Ing. Miroslavu Piškovi, CSc., vedúcemu tejto práce, za trpezlivosť, čas, cenné pripomienky a rady týkajúce sa spracovania diplomovej práce. Ďalej by som tiež chcel poďakovať pánovi Igorovi Vlhovi, majiteľovi firmy Kovo Vlha s.r.o, za ústretový a nápomocný prístup a rodine za podporu pri štúdiu.

OBSAH

Zadanie

Abstrakt

Bibliografická citácia

Čestné prehlásenie

Pod'akovanie

Obsah

ÚVOD	10
1 UPICHOVANIE A ZAPICHOVANIE	11
1.1 Teória upichovania	11
1.2 Tvorba zápichov	12
1.3 Poloha nástroja voči obrobku	13
1.4 Parametre ovplyvňujúce rezný proces	13
1.4.1 Kinematika obrábacieho procesu	14
1.4.2 Trieska pri upichovaní a zapichovaní	15
1.4.3 Rezné sily	17
1.4.4 Práca, rezný výkon a celkové vzniknuté teplo.....	18
2 KONŠTRUKČNÁ CHARAKTERISTIKA REZNÝCH NÁSTROJOV PRE UPICHOVANIE A ZAPICHOVANIE.....	20
2.1 Geometria britu nástroja	20
2.2 Tvar ostria a špičky nástroja	22
2.3 Utvárač triesky	24
2.4 Uchytenie nástrojov.....	24
3 SÚČASTNÉ MATERIÁLY REZNÝCH NÁSTROJOV, ICH OPOTREBOVANIE A TRVANLIVOSŤ	26
3.1 Nástrojové oceli	27
3.2 Spekaný karbid.....	28
3.3 Rezná keramika	32
3.4 Cermety.....	33
3.5 Supertvrde rezné materiály	34

3.6	Opotrebovanie rezných materiálov	35
3.6.1	Opotrebenie z fyzikálneho hľadiska	35
3.6.2	Typy opotrebovania	36
3.7	Trvanlivosť rezných nástrojov	39
4	ANALÝZA SILOVÉHO ZAŤAŽENIA PRI VÝROBE ZÁPICHOV	41
4.1	Návrh postupu merania.....	41
4.1.1	Materiál obrobku a použitý nástroj	41
4.1.2	Strojové zabezpečenie.....	42
4.1.3	Meracie ústrojenstvo	43
4.1.4	Parametre obrábacieho procesu	43
4.2	Postup merania	44
4.3	Výsledky merania.....	45
4.4	Analýza merania.....	51
4.5	Vyhodnotenie merania	57
5	ZÁVERY	58
	Zoznam použitých zdrojov	
	Zoznam použitých symbolov a skratiek	

ÚVOD

Prvé spracovávanie a tvarovanie kovov sa datuje už od roku 6000 pred našim letopočtom. Počas tohto obdobia sa celá práca s kovom vyvinula do takého štádia, že dnes je z kovu možné vytvárať predmety akéhokoľvek tvaru, hoci sa základné princípy opracovania kovov v priamej podstate vôbec nezmenili, iba im ľudstvo za tie roky dokázalo lepšie porozumieť. [1]

Napriek tomu, že neexistujú žiadne poznatky o tom kto, v akom období, za akých podmienok a okolností bol nútený vymyslieť a skonštruovať prvý sústruh, v dnešnej dobe je sústruženie neodmysliteľnou súčasťou strojárenskej výroby pričom patrí k najviac zastúpeným technológiám v sektore strojového obrábania materiálu. Sústruženie ako triesková metóda obrábania je postavená na silovom pôsobení nástroja v tvare britu na obrábaný materiál, pričom dochádza k oddeľovaniu časti materiálu vo forme triesky.

Okrem iných operácií obrábania rotačných dielov pri sústružení, neoddeliteľnou súčasťou sú technológie upichovania a zapichovania, predovšetkým ktorým je venovaná značná časť tejto práce. Pri oboch procesoch sa sústružnícky nôž posúva radiálne smerom do stredu obrobku, pričom hlavný pohyb je vykonávaný rotujúcim materiálom obrobku uchyteným vo vretene stroja. Proces upichovania je charakteristický oddeľovaním materiálu, a tak vznikáním menších samostatných dielov. Zapichovanie sa naopak využíva predovšetkým k oddeľovaniu významných konštrukčných plôch, výbehov závitov, plôch určených pre osadenie ložísk či poistných krúžkov k čelnému zapichovaniu a iným.

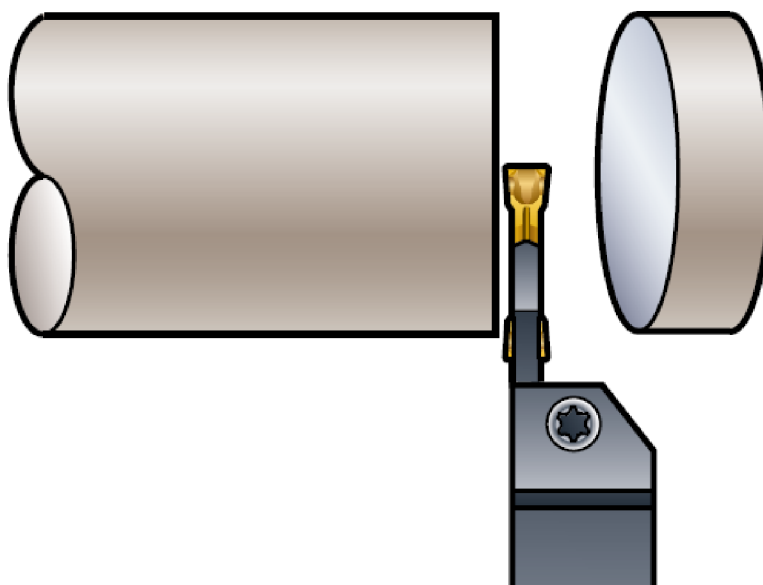
Obrovské množstvo nástrojov na súčasnom trhu je podmienené nevyhnutnou, čo najvyššou trvanlivosťou za súčasného minimálneho opotrebovania rezného nástroja. Cestou k vyvinutiu takéhoto rezného nástroja je práve jeho pred produkčné testovanie, pričom jeho rozborom a analýzou silového zaťaženia vyvíjaného rezného nástroja je možné dospieť k požadovaným výsledkom. Za pomoci analýzy dôležitých získaných dát, je možné určiť optimálne rezné parametre pre dosiahnutie najvyššej trvanlivosti rezného nástroja.

1 UPICHOVANIE A ZAPICHOVANIE

Cieľom sústružníckych procesov upichovania a zapichovania je tak ako pri všetkých operáciách vykonávaných na sústruhu, dosiahnutie požadovaného tvaru obrábaného dielu, tak ako aj maximalizovať produktivitu výrobného procesu a v neposlednom rade splniť všetky špecifikované presnosti obrobku a zabezpečiť tak jeho plnú funkčnosť. Samotný výrobný proces či už zapichovací alebo upichovací kombinuje vedľajší radiálny pohyb nástroja smerom do stredu obrobku a hlavný pohyb vykonávaný obrobkom vo vretene stroja. Výsledný pohyb na obrobku má potom tvar Archimedovej špirály. V prípade upichovania a zapichovania sa jedná o ortogonálne obrábanie.

1.1 Teória upichovania

Upichovanie je proces sústruženia, pri ktorom dochádza, a ktorý sa používa na delenie materiálu za pomoci sústruhu. Ide pritom predovšetkým o oddelovanie obrobku od polotovaru za pomoci úzkeho nástroja. Špecifickosť tejto operácie spočíva v zmene reznej rýchlosti počas samotného procesu. Od obvodu obrobku, kde je táto rýchlosť najvyššia sa mení na nulovú, prislúchajúcu stredu obrobku t. j. jeho osi. Preukázalo sa, že so znižujúcou sa reznou rýchlosťou, sa u reznej oceli zvyšuje jej trvanlivosť, naopak však u spekaných karbidov s nízkou reznou rýchlosťou aj trvanlivosť nástroja klesá. [2] Schéma upichovania je vyobrazená na Obr. 1.1.

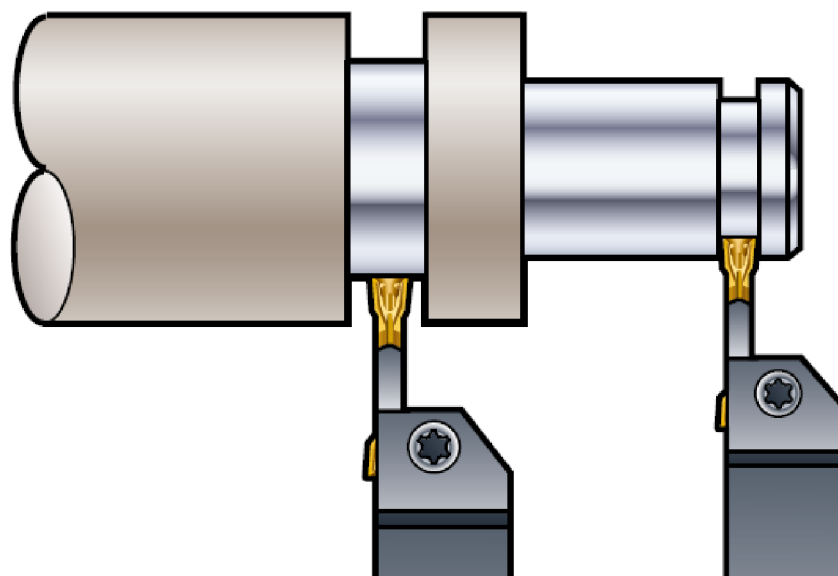


Obr. 1.1 Schéma upichovania [5]

Používajú sa nože o čo najmenšej hrúbke z dôvodu čo najmenšej straty materiálu pri spracovaní. Úzka štrbina, ktorá vzniká pri zábere ostria noža do materiálu kladie vysoké nároky na odvod triesky. A teda limitujúci priestor do značnej miery obmedzuje schopnosť lámania triesky. [3]

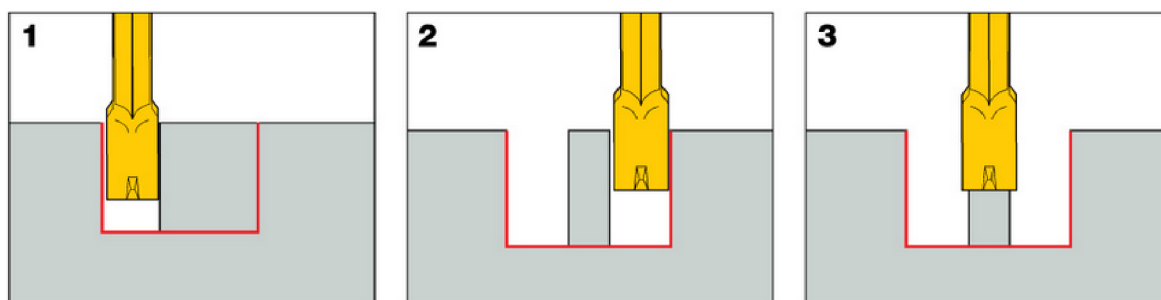
1.2 Tvorba zápichov

Zapichovaním rozumieme proces vytvárania drážok rôzneho tvaru a rozmerov, na použitie najčastejšie tesnení, poistných krúžkov či výbehov závitov. Podľa strany obrobku na ktorej zápich vytvárame, môžeme zapichovanie rozdeliť na zapichovanie na vonkajších plochách (vonkajšie zapichovanie) alebo na plochách vnútorných (vnútorné zapichovanie). Výroba zápichov je sama o sebe z technického hľadiska menej náročná, hoci jej princíp je totožný s upichovaním. Odlišnosťou je hĺbka rezu, kde v prípade zapichovania rez nie je až tak hlboký ako pri upichovaní, a teda nevedie až do stredu obrobku, ale iba do požadovanej hĺbky. Na druhej strane sú pri zapichovaní častokrát kladené vyššie nároky na presnosť, tvar a dosahovanú kvalitu povrchu. [3] Schéma upichovania je zobrazená na Obr. 1.2.



Obr. 1.2 Schéma zapichovania [5]

Zápichy malých širok sú sústružené jedným záberom ostria noža, a síce prísuvom kolmým na os obrobku. Pri tvorbe širších drážok sa zapichuje na niekoľko záberov až na požadovanú šírku zápichu. Šírka ostria noža sa volí tak, aby sa jednotlivé zábery prekrývali. Pri každom zo záberov sa však ponecháva prídavok na priemere od 0,5 až do 1 mm, ktorý je neskôr odobratý posledným pozdĺžnym posuvom na jeden krát tak, aby vytvoril súvislú kvalitu obrábaného povrchu. Podobne sa sústružia všetky širšie zápichy vonkajších plôch. Znázornený postup je na Obr. 1.3. [4]



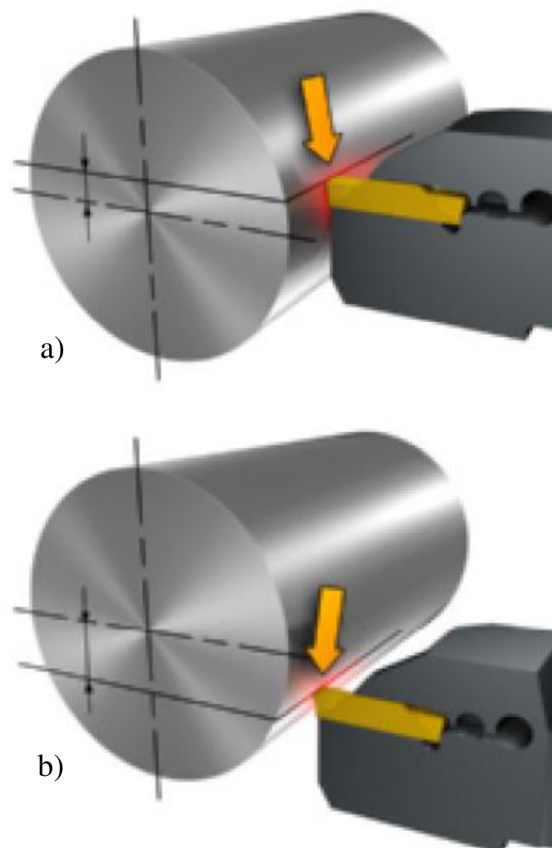
Obr. 1.3 Sústruženie širších zápichov [25]

1.3 Poloha nástroja voči obrobku

Jednoduché a spoľahlivé upnutie nástrojov je pri sústružení kľúčové. Sústružnícke nože sa najčastejšie upínajú do otočných nožových hláv, používaných na väčšine univerzálnych hrotových sústruhov, pričom je možné do nich upnúť až štyri nože súčasne. Upínanie nástrojov v špeciálnych otočných revolverových hlavách sa uplatňuje v strojoch ako revolverové sústruhy, automatické sústruhy či sústruhy zvislé. V obrábacích centrách automatických a poloautomatických CNC sústruhoch sa využíva upnutie do špeciálnych držiakov. Do týchto držiakov je obsluhou vkladáný už zostavený nástroj mimo prostredia stroja v zastavovacom prístroji. Takto predpripravený nástroj je potom zo zásobníku nástrojov v stroji používaný v automatickom cykle výrobného procesu. [5]

Z dôvodu stability nástroja je dôležité, aby vysunutie noža z nožovej hlavy nepresahovalo desať násobok šírky reznej plochy. Je dôležité, aby stredová výška hrotu noža bola v tolerancii $\pm 0,1$ mm čím bude zaručený lepší rezný výkon. Z tohto dôvodu je nevyhnutné, aby bolo možné nôž jednoducho a rýchlo výškovo prestaviť. V prípade vyššieho umiestnenia noža (viď Obr. 1.4) mimo stanovenú toleranciu by dochádzalo k vyššiemu opotrebeniu chrbta reznej časti, poprípade k lomu britovej doštičky. Naopak, v prípade uloženia noža pod os rotácie obrobku (viď Obr. 1.4), by došlo k zväčšeniu stredového výčnelku, respektíve opäť k lomu britovej doštičky. Tieto opotrebenia by viedli k značnému zníženiu trvanlivosti nástroja. Navýšenie výšky hrotu je prípustné iba pri potrebe dlhšieho vysunutia nástroja. Navýšením výšky hrotu sa teda kompenzuje ohyb nástroja zapríčinený pri jeho radiálnom zaťažení. [6]

Aby sa zabránilo poruche a následným poškodeniam, je potrebné zabezpečiť, aby rezný nástroj neprekročil os obrobku. Priblížením sa, resp. zastavením nástroja vo vzdialenosti 0,5 mm od stredu otáčania materiálu, sa obrobok vzhľadom k svojej hmotnosti oddelí od polotovaru. V prípade obojstranného uchytenia obrobku, prichádza do úvahy aj možnosť prechodu nástroja cez stredovú os. [2]



Obr. 1.4 Vyššie (a) a nižšie (b) umiestnenie noža voči osi obrobku [5]

1.4 Parametre ovplyvňujúce rezný proces

Pre hodnotenie a optimalizáciu rezného procesu z hľadiska výkonnostného, kvalitatívneho a ekonomického je nevyhnutné poznať veľkosť, smer, zmysel rezných síl a celkovú zmenu všetkých týchto rezných parametrov v čase. Rezné sily sú dôležitým ukazovateľom priebehu rezania, napomáhajú porozumieť obrábacím procesom

a jednotlivým technologickým postupom. K základným charakteristikám patria kinematické veličiny, prierez triesky či silové veličiny pri obrábacom procese. Ďalej je potrebné sledovať aj rezný výkon, teplo a teplotu rezania materiálu a celkové kmitanie obrábacieho ústrojenstva. Pochopenie a znalosť zákonov rezného procesu z pohľadu rezných síl umožňuje nie len úspešne optimalizovať jednotlivé parametre procesu, ale aj predchádzať kritickým situáciám z oblasti bezpečnosti a práce. [7] [8]

1.4.1 Kinematika obrábacieho procesu

Rotačný pohyb obrobku pri technológii upichovania a zapichovania, tak ako aj pri akomkoľvek druhu sústruženia, vykonáva obrobok. Tento pohyb je klasifikovaný ako hlavný pohyb všetkých sústružníckych operácií pričom jeho rýchlosť charakterizuje rezná rýchlosť v_c vyjadrená závislosťou (1.1). [5] [7] [9]

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad (1.1)$$

kde:	D	[mm]	priemer obrobku
	n	[min ⁻¹]	otáčky obrobku
	v_c	[m.min ⁻¹]	rezná rýchlosť
	π	[-]	Ludolfovo číslo

Vedľajším obrábacím pohybom sa rozumie pohyb sústružníckeho noža, buďto v smere osi obrobku pri tvorbe širších zápichov, jej posuvová rýchlosť v_f vyobrazená na Obr. 1.5, alebo kolmo na os obrobku ako vektor posuvovej rýchlosti v_f opäť z Obr. 1.5. V strojníckej praxi označovaní tiež ako posuvový pohyb charakterizovaný posuvovou rýchlosťou v_f popísanú rovnicou (1.2). [5] [7]

$$v_f = \frac{f \cdot n}{1000} \quad (1.2)$$

kde:	f	[mm]	posuv nástroja na otáčku obrobku
	n	[min ⁻¹]	otáčky obrobku
	v_f	[m.min ⁻¹]	posuvová rýchlosť

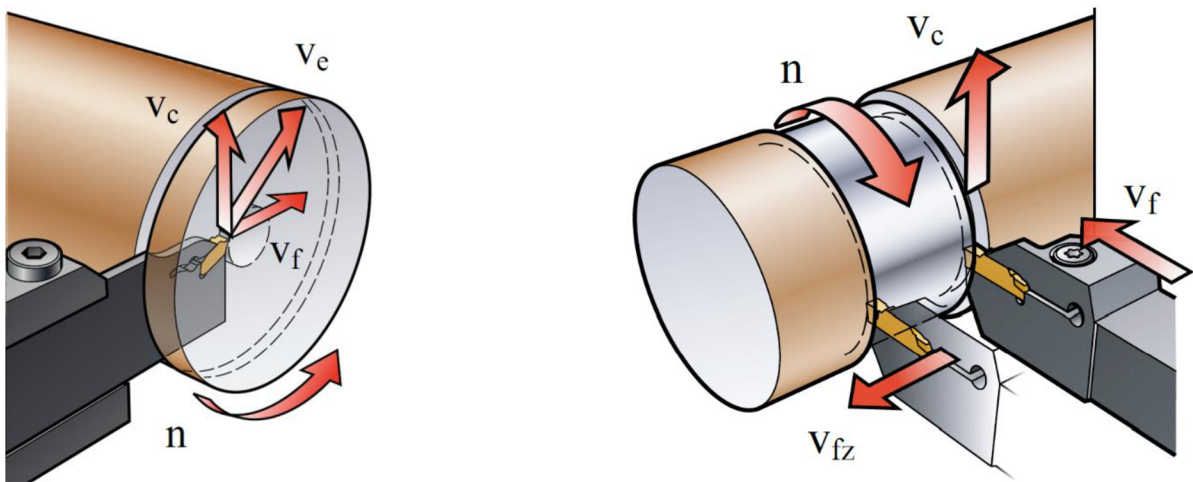
Výslednicu týchto rýchlostí tvorí efektívny výsledný rezný pohyb, ktorý je vektorovým súčtom dvoch predtým spomínaných pohybov. Tento pohyb je vyjadrený celkovou reznou rýchlosťou v_e a príslušným vzťahom (1.3). [7] [9]

$$v_e = \sqrt{v_c^2 + v_f^2} \quad (1.3)$$

kde:	v_c	[m.min ⁻¹]	rezná rýchlosť
	v_e	[m.min ⁻¹]	celková rezná rýchlosť
	v_f	[m.min ⁻¹]	posuvová rýchlosť

Pri štandardných podmienkach sústruženia platí všeobecné pravidlo: [5]

$$v_f \ll v_c \text{ a } f \ll \pi D \Rightarrow v_e \cong v_c$$



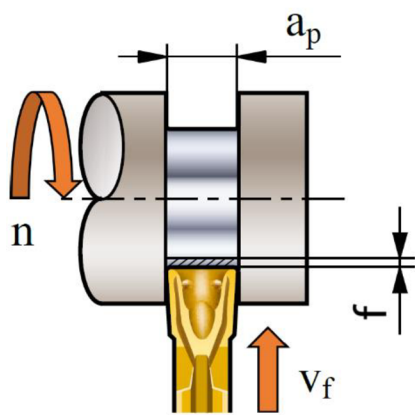
Obr. 1.5 Schéma vektorov kinematických veličín pri upichovaní a širšom zapichovaní [5]

1.4.2 Trieska pri upichovaní a zapichovaní

Prierez triesky pri obrábání vzniká pôsobením rezného nástroja na obrobok za účelom odobrania vrstvy materiálu. Prierez, tiež nazývaný ako plocha rezu či plocha prierezu triesky, je značený ako A_D a je určená šírkou záberu ostria noža a_p a posuvom nástroja na otáčku obrobku f podľa vzťahu (1.4). [7]

$$A_D = a_p \cdot f \cdot \sin \varphi \quad (1.4)$$

kde:	A_D	[mm ²]	prierez triesky
	a_p	[mm]	šírka záberu ostria noža
	f	[mm]	posuv nástroja na otáčku obrobku
	φ	[°]	uhol nastavenia hlavného ostria nástroja na smer pohybu



Pri upichovaní, respektíve zapichovaní, na valcovej ploche obrobku s nástrojom, ktorého uhol nastavenia hlavného ostria nástroja zodpovedá $\varphi = 90^\circ$, bude vzťah pre výpočet prierezu triesky vyzerat' nasledovne vid'. (1.5). [7]

Obr. 1.6 Tvorba triesky pri upichovaní a zapichovaní [5]

$$A_D = a_p \cdot f \quad (1.5)$$

V takomto prípade, kde je uhol nastavenia hlavného ostria nástroja $\varphi = 90^\circ$, bude ovplyvnená aj samotná stredná hodnota šírky triesky b_D tak, ako aj jej stredná hodnota hrúbky h_D , na ktoré by za prítomnosti skoseného ostria nástroja mal vplyv uhol φ , tak ako znázorňujú nasledujúce dve rovnice. [7] [9]

$$b_D = \frac{a_p}{\sin \varphi} \quad (1.6)$$

$$h_D = \frac{A_D}{b_D} = \frac{a_p \cdot f}{\frac{a_p}{\sin \varphi}} = f \cdot \sin \varphi \quad (1.7)$$

kde:	A_D [mm ²]	prierez triesky
	a_p [mm]	šírka záberu ostria noža
	b_D [mm]	šírka triesky (skutočná dĺžka ostria v zábere)
	f [mm]	posuv nástroja na otáčku obrobku
	h_D [mm]	hrúbka triesky
	φ [°]	uhol nastavenia hlavného ostria nástroja na smer pohybu

Úberom materiálu rozumieme vrstvu materiálu odobranú z obrobku pri jednom priechode rezného nástroja plochou počas jednej otočky obrobku. Je určená plochou prierezu jedného úberu A_T , čo zodpovedá skutočnej ploche prierezu premietnutej do kolmej roviny v smere reznej rýchlosti. Následný vzťah (1.8) popisuje výpočet pre sústruženie valcovej plochy o priemere D . [7]

$$A_T = \pi \cdot a_p (D - a_p) \quad (1.8)$$

kde:	a_p [mm]	šírka záberu ostria noža
	A_T [mm ²]	plocha prierezu jedného úberu nástroja
	D [mm]	priemer obrobku
	π [-]	Ludolfovo číslo

Následne z plochy prierezu jedného úberu vieme určiť celkovú výkonnosť obrábania Q , ktorá vyjadruje celkový objem materiálu odobratý nástrojom za jednotku času. V prípade, že uvažujeme túto výkonnosť pre sústruženie valcovej plochy s využitím vzťahov (1.8) a (1.2), výsledná rovnica bude mať podobu ako v (1.10). [7]

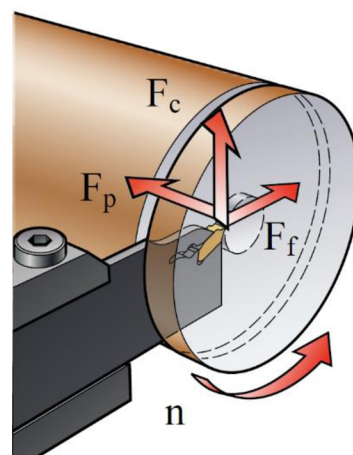
$$Q = A_T \cdot v_f \quad (1.9)$$

$$Q = \frac{\pi \cdot a_p \cdot f \cdot n(D - a_p)}{1000} \quad (1.10)$$

kde:	a_p [mm]	šírka záberu ostria noža
	A_T [mm ²]	plocha prierezu jedného úberu nástroja
	D [mm]	priemer obrobku
	f [mm]	posuv nástroja na otáčku obrobku
	n [min ⁻¹]	otáčky obrobku
	Q [cm ³ .min ⁻¹]	výkonnosť obrábania
	v_f [m.min ⁻¹]	posuvová rýchlosť
	π [-]	Ludolfovo číslo

1.4.3 Rezné sily

Proces sústruženia je výsledkom pôsobenia silovej sústavy medzi obrábaným materiálom a nástrojom, vyobrazenej na Obr. 1.7. Pričom celková sila pôsobiaca na sústavu pozostáva zo zložiek síl F_c , F_f a F_p poprípade je možné ju určiť aj za pomoci merného rezného odporu k_c , a označujeme ju ako výslednú silu F . V samotnom výrobnom procese je tieto sily možné priamo vo výrobnom stroji za chodu odmerať. K veľmi presnému určeniu síl pôsobiacich na sústavu sa používajú dynamometre. V súčasnej praxi hovoríme práve o piezoelektrických dynamometroch, ktoré fungujú na princípoch zmeny elektrického náboja vplyvom deformácie kryštálov SiO₂. Následne potom na základe získaných nameraných hodnôt zložiek síl sa určí výsledná sila podľa vzťahu (1.14). [7] [9]



Obr. 1.7 Sústava síl pri upichovaní a zapichovaní [5]

$$F_c = C_{F_c} \cdot a_p^{x_{F_c}} \cdot f^{y_{F_c}} \quad (1.11)$$

$$F_f = C_{F_f} \cdot a_p^{x_{F_f}} \cdot f^{y_{F_f}} \quad (1.12)$$

$$F_p = C_{F_p} \cdot a_p^{x_{F_p}} \cdot f^{y_{F_p}} \quad (1.13)$$

$$F = \sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2} \quad (1.14)$$

kde:	a_p	[mm]	šírka záberu ostria noža
	$C_{F_c}, C_{F_f}, C_{F_p}$	[-]	materiálové konštanty
	f	[mm]	posuv nástroja na otáčku obrobku
	F	[N]	výsledná rezná sila
	F_c, F_f, F_p	[N]	rezná, posuvová a pasívna sila
	$x_{F_c}, x_{F_f}, x_{F_p}$	[-]	exponenty vplyvu šírky záberu ostria a_p
	$y_{F_c}, y_{F_f}, y_{F_p}$	[-]	exponenty vplyvu posuvu f

Už spomenutý spôsob určenia reznej sily pomocou merného rezného odporu je učený rovnicou (1.15). Je definovaný silou v smere hlavného rezného pohybu závislou na priereze triesky o veľkosti 1 mm^2 a určuje veľkosť mernej sily potrebnej na prekonanie súdržnosti materiálu účinkom rezného procesu. Veľkosť rezného odporu je určená predovšetkým fyzikálnymi vlastnosťami materiálu ako tvrdosť a pevnosť, veľkosťou prierezu triesky a jej hrúbkou, geometriou nástroja a rezným prostredím. [9]

$$F_c = k_c \cdot A_D \quad (1.15)$$

kde:	A_D	[mm ²]	prierez triesky
	F_c	[N]	rezná sila
	k_c	[MPa]	merná rezná sila

1.4.4 Práca, rezný výkon a celkové vzniknuté teplo

Teplo produkované počas obrábacieho procesu úzko súvisí s prácou rezného procesu. Do práce rezného procesu je zahrnutá práca plastických aj pružných deformácií v oblasti tvorenia triesky. Ďalej zahrňuje prácu trenia triesky po čele nástroja, prácu trenia chrbta nástroja po obrábanej ploche a prácu potrebnú k vytvoreniu nových povrchov. Práca rezného procesu E_c zodpovedá súčtu práce rezania (práce hlavného pohybu stroja) E_c a práce posuvu (práce vedľajšieho pohybu stroja) E_r , vid'. rovnica (1.18). Pre sústruženie valcovej plochy potom po úprave platí vzťah (1.19). [7]

$$E_c = F_c \cdot v_c \cdot t_p \quad (1.16)$$

$$E_f = F_f \cdot v_f \cdot t_p \quad (1.17)$$

$$E_e = E_c + E_f \quad (1.18)$$

$$E_e = t_p(F_c \cdot v_c + F_f \cdot v_f) \quad (1.19)$$

kde:	E_c, E_e, E_f	[J]	práca rezania, rezného procesu a posuvu
	F_c, F_f	[N]	rezná a posuvná sila
	t_p	[min]	čas rezného procesu
	v_c, v_f	[m.min ⁻¹]	rezná a posuvná rýchlosť

Rezný výkon P_c potrebný pri výbere správneho obrábacieho stroja pre výrobu zadanej súčiastky, je určený súčinom reznej sily F_c a reznej rýchlosti v_c pôsobiacej za daný čas.

$$P_c = \frac{F_c \cdot v_c}{60 \cdot 10^4} \quad (1.20)$$

kde:	F_c	[N]	rezná sila
	P_c	[kW]	rezný výkon
	v_c	[m.min ⁻¹]	rezná rýchlosť

V priebehu obrábacieho procesu je takmer všetka vykonaná práca transformovaná na teplo. Teplo Q vzniká pri odobratí už minimálneho množstva materiálu, pričom jeho hodnota je veľmi podobná hodnote reznej práce E_e .

$$Q_e = \frac{F_c \cdot v_c \cdot t_p}{10^3} \quad (1.21)$$

kde:	F_c	[N]	rezná sila
	t_p	[min]	čas rezného procesu
	v_c	[m.min ⁻¹]	rezná rýchlosť
	Q_e	[kJ]	celkové množstvo vzniknutého tepla

2 KONŠTRUKČNÁ CHARAKTERISTIKA REZNÝCH NÁSTROJOV PRE UPICHOVANIE A ZAPICHOVANIE

Geometriu sústružníckych nožov je možné charakterizovať za pomoci nástrojovej a pracovnej súradnicovej sústavy, v ktorej sa dané roviny nachádzajú. Potom je rezný nástroj z geometrického hľadiska definovaný svojimi prvkami, ako telo noža, rezná časť, špička a podobne. Ďalej je geometria noža určená jeho nástrojovými plochami, ostriami, rozmermi ostria a tvarom nástroja. [5]

- 1 utvárač triesky
- 2 vedľajšie ostrie S'
- 3 čelo A_γ
- 4 hlavné ostrie S
- 5 hlavný chrbát A_α
- 6 vedľajší chrbát $A_{\alpha'}$



Obr. 2.1 Ostrie a plochy VBD pre upichovanie a zapichovanie [24]

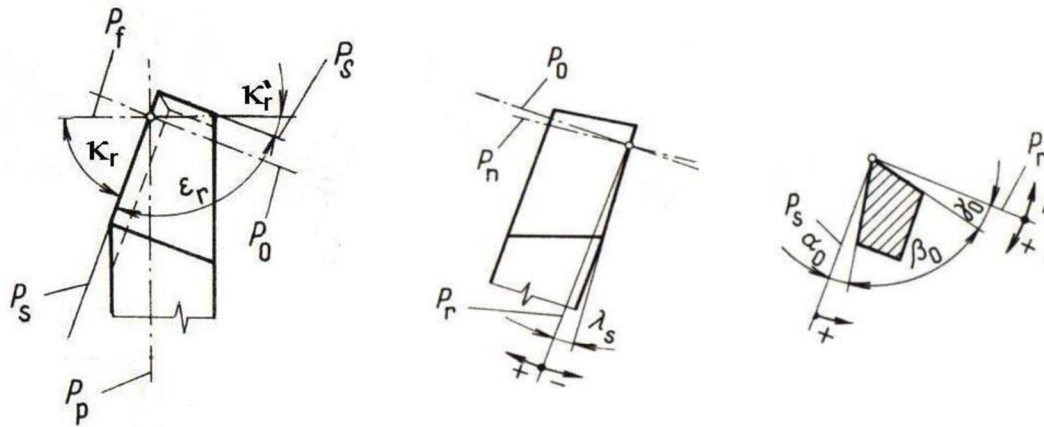
kde:	hlavný chrbát	A_α	plocha styčná s hlavnou obrábanou plochou obrobku
	vedľajší chrbát	$A_{\alpha'}$	plocha styčná s hlavnou obrábanou plochou obrobku
	čelo nástroja	A_γ	rezná plocha nástroja, po ktorej je odvádzaná trieska
	hlavné ostrie	S	rezná hrana tvoriaca šírku triesky
	vedľajšie ostrie	S'	vedľajšia rezná hrana tvoriaca povrch obrobku
	utvárač triesky		plocha pre tvorbu požadovaného tvaru triesky

2.1 Geometria britu nástroja

Nedokonalá geometria britu nástroja môže mať negatívny vplyv na celý obrábací proces. Pri tejto skutočnosti môže dochádzať k zvýšeniu teploty rezania, k nestabilite rezného procesu, k zvyšovaniu reznej sily či k výraznému znižovaniu trvanlivosti nástroja. Samotnú geometriu britu definuje súhrn uhlových parametrov určujúcich tvar britu. [4]

- Nástrojové roviny

V súradnicovom systéme je možné jednoducho popísať geometriu nástroja za pomoci nástrojových rovín vyobrazených na Obr. 2.2. Značenie ortogonálnej roviny je P_o , základnej roviny P_r a normálovej P_n (rovina kolmá na čelnú plochu nástroja). Pri konštrukcii, výrobe či následnej údržbe a ostrení nástroja sa ďalej využíva bočná nástrojová rovina P_f , rovina ostria P_s a zadná rovina P_p . [5]



Obr. 2.2 Nástrojové uhly v rovinách [4]

- Nástrojové uhly

Definícia nástrojových uhlov je viazaná na nástrojovú súradnicovú sústavu pričom jednotlivé uhly prislúchajú príslušnej nástrojovej rovine. Presná veľkosť nástrojových uhlov má pomerne veľký vplyv na veľkosť rezných síl, teplotu rezného procesu, správnu tvorbu triesky a vlastnosti obrábaného povrchu materiálu.

Uhly nastavenia hlavného κ_r a vedľajšieho ostria κ_r' bližšie určujú hlavné ostrie nástroja. Uhol κ_r , ktorý sa bežne pohybuje v rozsahu od 0° do 90° , významne ovplyvňuje tvorbu a tvar triesky a taktiež veľkosti pasívnej a posuvovej zložky síl pri sústružení. Uhol κ_r' a jeho veľkosť je priamo závislá na veľkosti uhlu vedľajšieho ostria κ_r a uhlu špičky ostria nástroja ϵ_r . Uhol nastavenia vedľajšieho ostria má väčší vplyv na štruktúru obrábaného povrchu obrobku. Pre uhly κ_r , κ_r' a ϵ_r potom platí vzťah (2.1). [5]

$$\kappa_r + \kappa_r' + \epsilon_r = 180^\circ \quad (2.1)$$

Nástrojové ortogonálne uhly čela γ_0 , chrbita α_0 a britu β_0 vyobrazené na Obr. 2.2, presne popisujú tvar ostria nástroja. Pri malom uhle γ_0 vplyvom intenzívnejšieho stláčania triesky počas obrábania vznikajú veľké sily. Tento uhol sa bežne pohybuje od -8° do 8° , pričom výrazne vplýva na tvorbu triesky a jej odvádzanie z miesta rezu. Vyššie hodnoty uhlu α_0 prispievajú k lepšiemu obrábaniu pevných materiálov a to aj pri nízkych posuvných rýchlostiach, vysokých rezných rýchlostiach a širšom zábere ostria. Uhol α_0 sa bežne pohybuje v rozmedzí od 8° do 12° . Najväčším uhlom ležiacim medzi už spomínanými uhlami je uhol β_0 . Veľkosť tohto uhlu ovplyvňuje tuhosť britu. V závislosti od pevnosti materiálu sa volí aj veľkosť uhla britu a to čím vyššia pevnosť materiálu, tým vyššia hodnota uhla britu a naopak čím nižšia pevnosť materiálu, tým menší uhol britu. Súčet veľkostí nástrojových ortogonálnych uhlov popisuje vzťah (2.2). [5]

$$\alpha_0 + \beta_0 + \gamma_0 = 90^\circ \quad (2.2)$$

Nástrojový uhol sklonu hlavného ostria λ_s vplýva na zaťaženie a tuhosť špičky nástroja, tak ako aj na správnu tvorbu triesky. Trieska odchádza smerom od obrobku v prípade jeho kladnej hodnoty, naopak pri jeho zápornej hodnote je trieska odvádzaná smerom do obrobku, čo máva dopad na horší povrch obrábaného materiálu. Záporný uhol však napomáha k zvýšeniu trvanlivosti nástroja. Pre hrubovanie a prerušovaný rez s väčším úberom materiálu sa spravidla používajú nástroje so záporným uhlom sklonu ostria (-4° až -8°). Dokončovacie procesy potom vyžadujú kladný, respektíve nulový sklon hlavného ostria nástroja. [5]

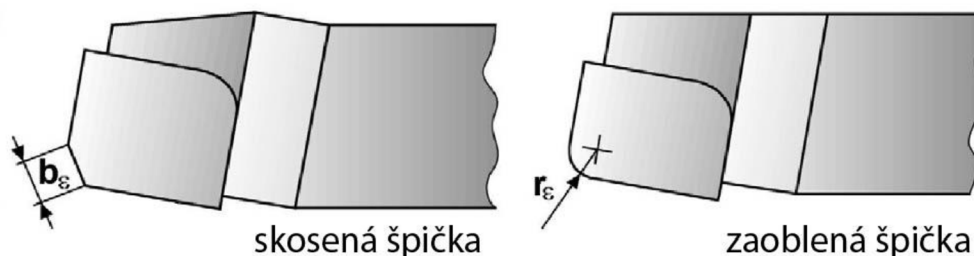
2.2 Tvar ostria a špičky nástroja

Tvar ostria rezného nástroja je definovaný krivkou vytvorenou z ortogonálneho nástrojového priemeru hlavného ostria S do nástrojovej základnej roviny P_r . Tvar ostria nástroja výrazne ovplyvňuje funkčné vlastnosti nástroja a odpovedá špecifickým požiadavkám kladeným na ostrie nástroja pri obrábacích procesoch. [5]

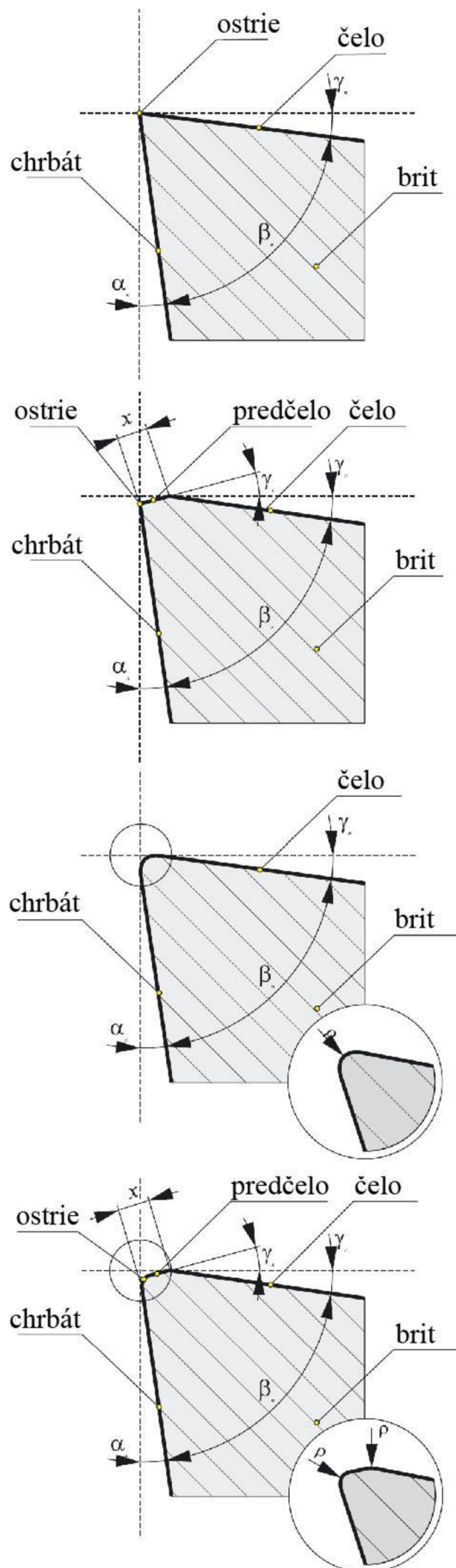
Súčasťou ostria nástroja je aj špička nástroja. Samotná špička spája hlavné ostrie s vedľajším, a tak ako aj celé ostrie je kľúčovým faktorom pri sústružení. Veľkosť zaoblenia, poprípade skosenia špičky, vid'. Obr. 2.3, má významný vplyv na povrch obrábaného materiálu, pevnosť rezného nástroja a taktiež lámavosť triesky. Pri malom rádiuse špičky určenom predovšetkým pre malú šírku záberu ostria a teda skôr dokončovacie operácie, pozorujeme nízku mieru vibrácií. Väčšie polomery špičky dovoľujú väčšie zábery nástroja, tak ako aj vyššie posuvné rýchlosti. Priemerné zaoblenie špičky nástrojov sa pohybuje v intervale od 0,1 mm až po 2,4 mm. Pri týchto zaobleniach je možné jednoducho určiť očakávanú hodnotu maximálnej hĺbky drsnosti povrchu Ra_{max} za pomoci vzťahu (2.3). [3]

$$Ra_{max} = \frac{f^2}{8 \cdot r_\varepsilon} \cdot 10^3 \quad (2.3)$$

kde:	f	[mm]	posuv nástroja na otáčku obrobku
	r_ε	[mm]	polomer zaoblenia špičky
	Ra_{max}	[μ m]	maximálnej hĺbky drsnosti povrchu



Obr. 2.3 Varianty špičky nástroja [4]



Prvou z variant tvaru ostria rezného nástroja je ostrý brit. Ostrý tvar britu umožňuje dosiahnutie minimálnej deformácie odrezávanej vrstvy, pri obrábaní nevzniká takmer žiadny nárostok na špičke britu a taktiež sa znižuje úroveň rezných síl. Tieto prednosti predurčujú dané ostrie pre obrábanie mäkkých zliatin, predovšetkým hliníkových, pre ktoré nie je potrebná vysoká pevnosť ostria rezného nástroja, nakoľko v porovnaní s ostatnými tvarmi je pevnosť ostria nižšia. [10]

Brit s fazetkou je v porovnaní s ostrým britom odolnejší proti mechanickému zaťaženiu a teda odolnosť britu proti krehkému porušeniu alebo lomu a následnému celému odlomeniu britu rastie. Túto skutočnosť zabezpečuje väčší uhol britu, a tým pádom aj väčšia plocha ostria v zábere pri obrábaní materiálu. Jeho neskôr vyvinutou, ale o to využívanjšou variantou je rektifikovaný tvar britu. [10]

Zaoblením ostria nástroja vzniká brit s rektifikovaným ostrím. Jedná sa o mierne zaoblené ostrie, ktorého primárnym cieľom je zníženie mikronerovností reznej hrany. Zaoblenie ostria pod veľmi malým polomerom, v zvýšenej miere prispieva k odolnosti britu proti mechanickému porušeniu čiže krehkému lomu mikrovydrolením. V súčasnosti táto úprava britu našla uplatnenie u všetkých VBD bez fazetky a tak úplne nahrádza variantu ostrého britu. Takéto doštičky sú určené k obrábaniu najrozličnejších materiálov na súčasnom trhu obrábania. [10]

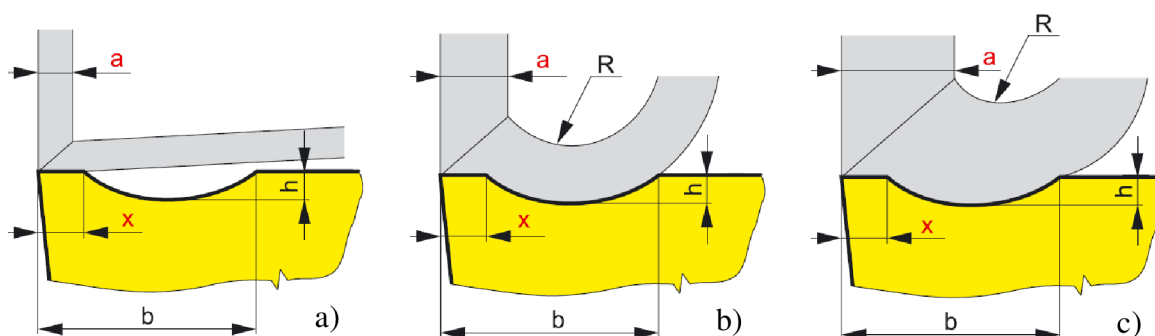
Spomenutý rektifikovaný brit s fazetkou spája výhody rektifikovaného ostria s výhodami britu s fazetkou a teda jedná sa o jeho zaoblenú variantu. Toto ostrie je zaoblené a plus samotné zaoblenie je ďalej spevnené fazetkou. Jedná sa preto o najpevnejšiu a najodolnejšiu variantu zo všetkých spomínaných tvarov ostria rezného nástroja. [10]

Obr. 2.4 Varianty tvarov ostria [9]

2.3 Utvárač triesky

Schopnosť lámania triesky počas procesu upichovania či zapichovania je výrazne limitovaná úzkou šírkou drážky vyrezanej nástrojom do materiálu obrobku. Pri tomto procese vznikajú obrábané plochy po oboch stranách nástroja pozdĺž smeru posuvu limitujúce šírku tvorby triesky. Z tohto dôvodu je nevyhnutné, aby utvárač triesky mal taký tvar a tvoril triesku o menšej šírke než je šírka vytvárajúcej drážky. V prípade, že by tomu tak nebolo, dochádzalo by k nežiaducemu kontaktu triesky so stenami obrobku, čo by viedlo k poškodzovaniu už opracovaných povrchov stien materiálu. Pri procese upichovania a zapichovania je tvorba triesky charakterizovaná v dvoch rovinách. Špeciálny tvar utvárača je navrhnutý a skonštruovaný tak, aby sa trieska po jeho povrchu kĺzala a súčasne sa v pozdĺžnej rovine skrúcala do špirály. V závislosti od tvaru utvárača, rezných podmienok a materiálu obrobku sa trieska láme. V priečnom priereze triesku utvárač čiastočne prehýna a tak zaručuje jej šírku menšiu ako vytvorená drážka, čo predchádza zasekávaniu a hromadeniu triesky v priestore okolo nástroja. [3]

Konkrétne typy utváračov lámu triesku iba v určitom intervale rýchlosti posuvu a iba pri určitej šírke záberu ostria nástroja. Minimálny posuv, ktorý zabezpečuje funkčnosť utvárača triesky je často krát závislý od šírky stabilizačnej fazetky a jej uhla nastavenia ostria. V prípade, že šírka záberu ostria neprekračuje šírku fazetky, trieska do utvárača nezabieha a teda nijak nie je pretváraná, vid'. Obr. 2.5 a). Vznikajú tak veľmi dlhé a tenké triesky. Tak isto aj maximálne hodnoty utvárača sú limitujúce a po prekročení objemu materiálu, ktorý je lámač schopný utvárať, ostáva tvar triesky nezmenený, Obr. 2.5 c). Ideálne zabíhanie materiálu do lámača triesky vyobrazuje Obr. 2.5 b). [10]



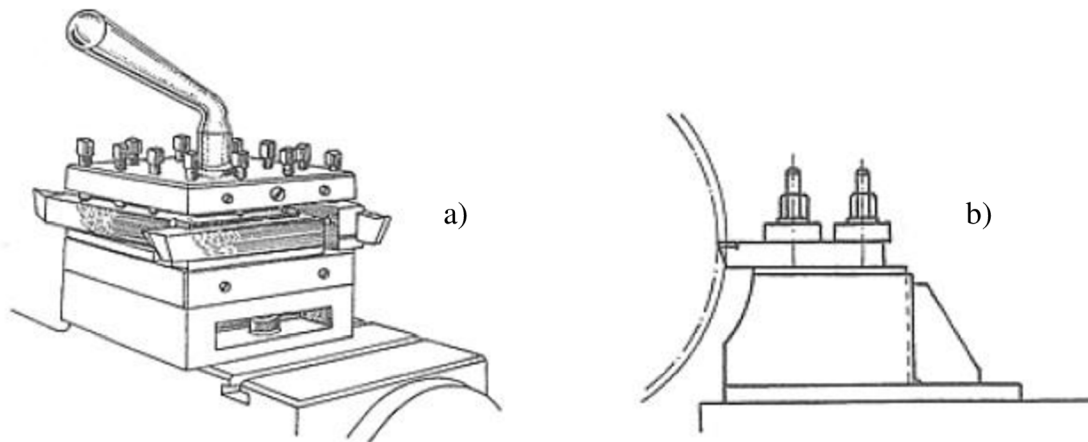
Obr. 2.5 Funkčnosť utvárača triesky pri rôznych šírkach záberu ostria nástroja [9]

Tvarom a multifunkčnosťou VBD sa snaží každá firma predčiť tie ostatné, a preto vznikajú najrôznejšie tvary lámačov triesky. Pochopiteľne každá firma má vlastný tvar a geometriu utváračov triesky.

2.4 Uchytenie nástrojov

Pri sústružení na rezný nástroj pôsobia pomerne veľké sily, ktoré je potrebné, aby upínacie prípravky a telá nástrojov bezpečne prenášali na konštrukciu stroja. Keďže je rezný nástroj najviac namáhaný na ohyb, z tohto dôvodu je potrebné ho upínať na krátko. V prípade, že by prečnieval viac, bol by viac náchylný na ohyb, pričom by mohlo dochádzať až k rozvibrovaniu celej sústavy stroja a nástroj by tak vytváral nedokonalý povrch s príliš veľkou drsnosťou povrchu obrobku. V extrémnom prípade by mohlo hroziť až únavové odlomenie časti rezného nástroja. [11]

Najčastejším spôsobom upínania rezných nástrojov pre malé a stredné univerzálne hrotové sústruhy je za pomoci nožovej hlavy. Nožová hlava je z pravidla otočná, ktorá umožňuje súčasné upnutie až 4 nástrojov, pričom počas obrábacieho procesu je možné ich jednoducho otočením vymieňať. Ďalej je potrebné rezné nástroje upínať vždy tak, aby ostrie noža sa vždy nachádzalo v osi rotácie obrobku. Pre väčšie sústruhy je upínanie rezných nástrojov zabezpečované pomocou takzvaných upíniek, vid'. Obr. 2.6. [5] [11]



Obr. 2.6 Upnutie nožov za pomoci nožovej hlavy (a) a upínikou (b) [10]

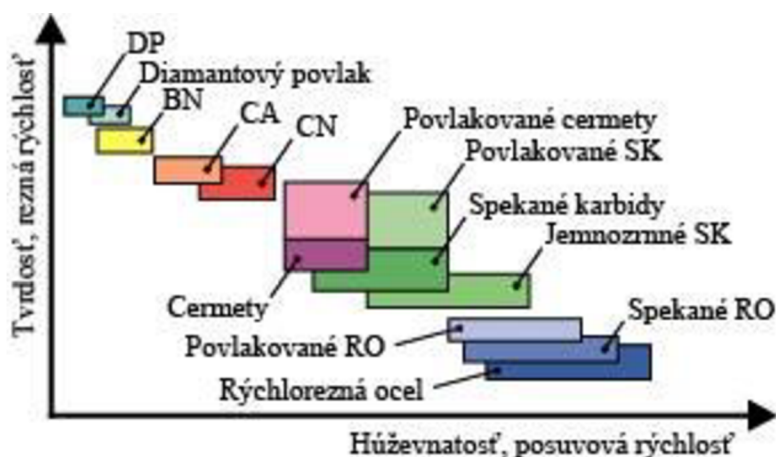
Nástroje určené pre obrábanie na CNC sústruhoch sú upínané do špeciálnych držiakov, napríklad pomocou tepelných, hydraulických alebo klieštínových upínačov. Tieto upínače sú ďalej spolu s nástrojom vždy skalibrované mimo samotný obrábací stroj v kalibračnom prístroji. Takto pripravené nástroje sú potom do CNC obrábacieho centra vkladané do zásobníka nástrojov, z ktorého si stroj v automatickom cykle sám nástroje vymieňa. V sústružníckych centrách sa najčastejšie používajú rotačné revolverové hlavy, vid'. Obr. 2.7, určené pre uskladnenie väčšieho množstva nástrojov. Do revolverovej hlavy je možné umiestňovať aj poháňané rotačné nástroje najčastejšie určené pre frézovanie.



Obr. 2.7 Revolverová hlava [5]

3 SÚČASNÉ MATERIÁLY REZNÝCH NÁSTROJOV, ICH OPOTREBOVANIE A TRVANLIVOSŤ

Súčasnú reznú nástroje pre strojné obrábanie sú vyrábané z rôznych materiálov, od nástrojových predovšetkým rýchlorezných ocelí, cez spekaný karbid, cermety, reznú keramiku, až po supertvrde materiály reprezentované syntetickým diamantom a kubickým nitridom bóru. V praxi najpočetnejšie využívanú skupinu rezných nástrojov pri upichovaní či zapichovaní však tvoria



Obr. 3.1 Vplyv mechanických vlastností rezných materiálov na pracovné podmienky [4]

povlakované vymeniteľné britové doštičky vyrábané zo spekaného karbidu, ktorý je ideálnym kompromisom optimálnej húževnatosti materiálu a jeho tvrdosti. Danú závislosť jednotlivých materiálov vyobrazuje obrázok Obr. 3.1, pričom značenie jednotlivých nástrojových materiálov je uvedené v tabuľke Tab. 3.1. [5]

Tab. 3.1 Značenie nástrojových materiálov podľa normy ISO 513 [12]

Materiál rezného nástroja	Symbol	
Rýchlorezná ocel'	RO	
Nepovlakované spekané karbidy s obsahom primárneho WC	Zrnnosť $\geq 1\mu\text{m}$	HW
	Zrnnosť $< 1\mu\text{m}$	HF
Nepovlakované cermety s obsahom TiC, TiN alebo obidvoch	HT	
Povlakované spekané karbidy (SK) a cermety	HC	
Rezná keramika (RK)	Oxidová RK s obsahom primárneho Al_2O_3	CA
	Zmiešaná RK na bázy Al_2O_3 s neoxidovanými prísadami	CM
	Neoxidová RK s obsahom primárneho Si_3N_4	CN
	Povlakovaná RK	CC
Supertvrde materiály	Polykryštalický diamant	DP
	Polykryštalický kubický nitrid bóru	CBN

3.1 Nástrojové ocele

Ocele určené na výrobu rezných nástrojov, ktorých obsah uhlíku neprekračuje 1,5%. Pre ich finálnu podobu sa vyžaduje kalenie a následné popúšťanie, pre zaručenie požadovanej tvrdosti a pevnosti. Nástrojové ocele je možné rozlišovať podľa použitia či spôsobu výroby, vid'. Tab. 3.2. Na základe chemického zloženia ich vieme rozdeliť nasledovne:

- Nelegované (uhlíkové) nástrojové ocele

Využívanie nástrojov vyrobených z uhlíkových ocelí sa datuje od počiatku priemyselnej revolúcie z roku 1860, a teda ako najstarší novodobí obrábací prostriedok v priemysle. Používané ocele triedy devätnásť vznikajú pri vysokej rýchlosti kalenia materiálu do vody či oleja, čo zaručuje ich vysokú tvrdosť a pevnosť v ťahu neporovnateľnú oproti ich prírodnému stavu. Nevýhodou týchto nástrojových materiálov však stále je ich náchylnosť k zhrubnutiu zrna, a tak k ich nízkej pevnosti. Taktiež sú náchylné na oduhličovanie a oxidáciu povrchových vrstiev materiálu, čo vedie k ich nízkej životnosti. Nízka prekaliteľnosť materiálu robí materiál náchylný na tvorbu kaliacích trhlín a následné praskanie a deformáciu materiálu pri kalení do vody. Aj tieto nedostatky spôsobujú to, že pri ich požití na obrábanie ocele či zliatiny je potrebné používať malé rezné rýchlosti čo robí uhlíkové nástrojové ocele v strojovej výrobe a obrábaní kovových materiálov všeobecne neefektívnymi a iba zriedka používanými. [5] [9]

- Legované nástrojové ocele

Vznik legovaných nástrojových ocelí je podmienený predovšetkým nedostatkami ich nelegovaných predchodcov. Hlavný zmysel pridávania legúr do ocele pozostáva v následnom dosiahnutí vyššej prekaliteľnosti nástrojových ocelí a znížení intenzity ochladzovania, tak aby bol daný materiál schopný sa zakaliť do hĺbky v rádoch až 130 – 150 mm (na rozdiel od nelegovaných ocelí, ktoré majú schopnosť prekaliteľnosti do 8 – 50 mm), a to iba samovoľne na vzduchu, prípadne v jeho prúde. Tento legovaný materiál je výrazne používaný napríklad pri výrobe foriem, tvarových nástrojov či strihadiel strojov. [9]

- Vysokolegované (rýchlorezné) nástrojové ocele

Rýchlorezné nástrojové ocele sú charakteristické vplyvom veľkého obsahu legujúcich prvkov na výslednú štruktúru materiálu. Hoci hodnota obsahu uhlíku v materiáli sa pohybuje medzi 0,7 až 1,3%, čo je podobný obsah uhlíku ako pri menej legovaných oceliach, percento prísadových prvkov obsahovaných v materiáli je až 30% z celkového objemu materiálu. Legovanie rýchlorezných ocelí pozostáva z pridávania legúr do materiálu, kde hovoríme o prvkoch ako kobalt, chróm, molybdén, vanád a volfrám. Rôzne percentuálne zastúpenie týchto prvkov v oceli mení charakter materiálu a pripisuje mu potrebné požiadavky pevnosti, tvrdosti, húževnatosti či hĺbky prekaliteľnosti podľa konkrétneho použitia materiálu. Naopak množstvo zastúpeného uhlíku v materiáli popisuje oteru odolnosť. K ďalšej odolnosti rýchlorezných nástrojov dokáže značne prispievať ich povrchové spracovanie. Nitridovaním, boridovaním či povlakovaním povrchov rýchlorezných nástrojov dokážeme značne zvýšiť tvrdosť ostria nástroja, jeho odolnosť proti vysokým teplotám pri obrábaní, čo značne prispieva k zvýšeniu rezných podmienok pri obrábaní, respektíve minimálne k predĺženiu trvanlivosti nástroja. [9] [13]

Tab. 3.2 Prehľad nástrojových ocelí [5]

Nástrojové ocele	Nelegované	Legované	Vysokolegované
Označenie ČSN	19 0xx – 19 2xx	19 3xx – 19 7xx	19 8xx
Obsah uhlíku [%]	0,5 – 1,5	0,8 – 1,2	0,7 – 1,3
Obsah legúr [%]	do 1%	10 – 15%	viac ako 30%
Legujúce prvky	Mn, Si, Cr	Cr, W, Mo, V, Mn, Si, Ni	W, Mo, Cr, V, Co
Kaliace prostredie	voda	olej	vzduch
Tvrdosť po kalení [HRC]	62 - 64	66	64 - 68
Použitie	ručné náradie (čepele, sekáče, pilníky, pílkys na kov...)	strojné náradie pre nízke hodnoty v_c (preťahovacie trny...)	strojné nástroje (nože, frézy, vrtáky, výstružníky...)

3.2 Spekaný karbid

Zloženie spekaných karbidov, tak ako napovedá samotný názov, pozostáva za tepla a vysokého tlaku spojenej základnej zliučiny uhlíku s ťažko tavitelnými kovmi nazývanými karbidy. Pre výrobu spekaných karbidov sa najčastejšie radí karbid volfrámu WC, ktorý má vysokú tvrdosť, odolnosť voči opotrebeniu a chemickú stálosť. Karbid titanu TiC, ktorý je stálejší za vysokých teplôt, a však za prítomnosti vyššej krehkosti. Za dosiahnutím vyššieho opotrebenia a zjemnením štruktúry sa používa karbidu tantalu TaC. Menej často používaným je karbid niobu NbC. Veľkosť týchto veľmi tvrdých častíc karbidu je udávaná od 1 do 10 μm , pričom ony samotné tvoria až 90% celého objemu rezného materiálu. Dokonalé spojenie karbidu s uhlíkovou zliučinou zaisťuje práškové spojivo, najčastejšie v podobe práškového kobaltu, ktorého vyšší obsah spôsobuje nižšiu tvrdosť, naopak však vyššiu húževnatosť a pevnosť. [12] [1]

Princípom samotného spekania jednotlivých elementov pre vytvorenie britovej doštičky prebieha procesom práškovej metalurgie. Vyvinutie tohto technologického procesu v 20-tych rokoch 20-teho storočia bolo kľúčové k tomu, aby bolo možné spojiť do jedného celku takéto veľké množstvo tvrdých častíc karbidu. Výsledkom po spekaní pri teplote blízkej teplote tavenia spojiva, vznikajú britové doštičky s vysokou tvrdosťou a pomerne dobrou pevnosťou. Sú charakteristické aj dobrou formovateľnosťou do zložitých tvarov, ktorú tiež umožňuje prášková metalurgia. Vynikajú aj pri obrábaní vysokými posuvovými rýchlosťami a to aj pri prerušovanom reze. Nie sú však vhodné pre použitie pri vysokých rezných rýchlostiach z dôsledku ich nízkej termochemickej stability.

Obr. 3.2 Zastúpenie rezných materiálov na svetovom trhu [14]



Aj tieto vlastnosti im doposiaľ celé storočie zaručujú prvenstvo v objeme používania medzi reznými nástrojmi. V súčasnosti z celosvetového zastúpenia používaných rezných nástrojov však začínajú byť spekané karbidy mierne na ústupe a to na úkor prevažne supertvrdých materiálov, čo vyobrazuje aj Obr. 3.2. Dôvodom vyššej žiadanosti iných materiálov na trhu s reznými nástrojmi je fakt, že vo výrobných dochádza k zmenám používaných materiálov pre výrobu produktov a tým pádom aj k zmenám ich rezných parametrov. [12] [14]

Rozdelenie rezných materiálov do šiestich hlavných aplikačných skupín je určené normou ISO 513, podľa ktorej sa skupiny ďalej delia na aplikačné skupiny nižšieho rádu. Hlavné aplikačné skupiny sa delia podľa materiálu, na ktorého obrábanie sú určené, pričom sú označované príslušným veľkým písmenom (P, M, K, N, S, H) a jeho špecifickou farbou, vid'. Tab. 3.3. Každá ďalšia aplikačná podskupina sa následne označuje už spomínaným písmenom hlavnej skupiny a klasifikačným číslom vyjadrujúcim obsah spojovacieho kovu. [12] Aplikačné skupiny sú charakterizované nasledovne:



Skupina P (modrá)

Popisuje nástroje pre obrábanie materiálov, ktoré vytvárajú dlhú triesku. Jedná sa predovšetkým o uhlíkové ocele, ocele na odliatky a temperovanie feriticko-korozivzdorné ocele. Prísada karbidu titanu TiC dokáže zvýšiť odolnosť materiálu proti vzniku výmoľov na čele nástroja zapríčinenú difúziou pri vysokých teplotách. Karbid titanu je tiež charakteristický tým, že pri obrábaní ocele s tvorbou dlhej triesky sa vyznačuje omnoho vyššou tvrdosťou pri zvýšených teplotách, než je tomu u prísady karbidu volfrámu WC. Naopak, jeho nevýhodou v porovnaní s WC je jeho krehkosť a nižšia abrazívna odolnosť. Aj napriek dobrej vlastnosti TiC odolávať difúzii pri vysokých teplotách, predovšetkým z dôvodu veľkých rezných síl býva najčastejšie VBD opotrebovaná na čele. Obrániteľnosť materiálu najviac záleží na jeho tvrdosti a obsahu uhlíku. [12] [1]



Skupina M (žltá)

Jedná sa o materiály zliatin s ich prísadou najmenej 12% podielom chrómu, niklu či molybdénu. Má veľmi univerzálne použitie predovšetkým pri hrubovaní dokonca aj ťažkom hrubovaní s prerušovaným rezom triesky. Charakter triesky je možné popísať ako dlhý až stredne dlhý, pričom stále môže dochádzať k veľkým rezným silám a najčastejšie porušeniu VBD v oblasti ostria jeho vydrobením. [6]



Skupina K (červená)

Nástroje označené touto skupinou sú určené na obrábanie materiálov s tvorbou krátkej a drobivej triesky. Jedná sa preto o materiály liatin železných aj neželezných a taktiež liatin nekovových materiálov. Obsah spojiva a teda kobaltu býva od 4 do 12%, častokrát o štruktúre veľmi malých zŕn až 0,2 μm . Táto jemnosť zrna zaručuje vyššiu húževnatosť SK, vyššiu odolnosť ku krehkému porušeniu štruktúry, naopak však vyžaduje vyšší obsah spojiva z dôvodu väčšej plochy hraníc zŕn. Jedinou používanou tvrdou zložkou týchto spekaných karbidov je karbid volfrámu WC. Pri izbovej teplote má porovnateľnú tvrdosť ako karbid titanu, avšak s rastúcou teplotou pri obrábaní stráca tvrdosť rýchlejšie ako pri väčšine iných karbidov. Pri obrábaní liatin, ktorých tvorba triesky je malá, a teda čas kontaktu triesky o vysokej teplote s čelom VBD je tiež krátky, nedochádza k tepelnému zaťažovaniu čela nástroja. [9] [12]

N Skupina N (zelená)

Nástroje pre obrábanie neželezných kovov sú označované zelenou farbou a písmenom N. Hovoríme pritom prevažne o obrábani hliníku, ale aj medi či mosadzi. Taktiež sú vhodné na obrábanie plastov, kompozitov a dreva. Pri obrábani hliníku s vyšším obsahom kremíku Si (13%), dochádza k zvýšenému abrazívnemu efektu na chrbte nástroja. U nástrojov s ostrými hranami vo všeobecnosti prevláda aj pri vysokých rezných rýchlostiach dlhá životnosť nástroja. [6]

S Skupina S (hnedá)

Je skupina určená na obrábanie tepelne odolných zliatin na báze železa, niklu či kobaltu, titanu a titánových ťažko obrobiteľných zliatin. V modernom obrábani tiež nazývané ako super zliatiny. Sú charakteristické svojou lepiacou schopnosťou a tvorbe nárazku na ostrí nástroja. Charakterovo podobné skupine M, avšak oveľa náročnejšie na obrábanie, čo vedie k skracovaniu životnosti nástroja. [6]

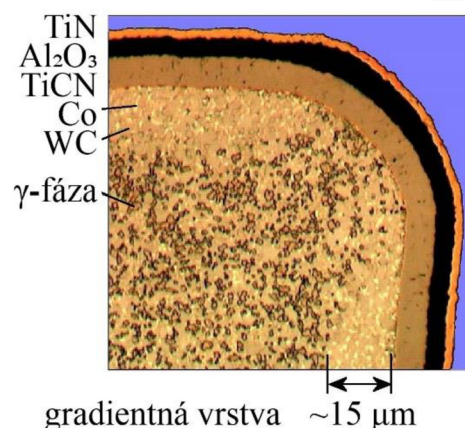
H Skupina H (sivá)

Touto skupinou nástrojov sa obrábajú zušľachtené a kalené ocele a zliatiny s vysokými tvrdosťami 45 až 65 HRC. Ich tvrdosť ich robí veľmi náročnými na obrábanie, čo generuje obrovské množstvo tepla a súčasne značne opotrebováva ostrie nástroja. [6]

Tab. 3.3 Rozdelenie spekaných karbidov podľa ISO 513 [9]

P	nelegované (uhlíkové) ocele tried 10, 11, 12 legované ocele tried 13, 14, 15, 16, 17 nástrojové ocele nelegované tried 191xx, 192xx, 193xx nástrojové ocele legované tried 193xx, 198xx uhlíkové oceľoliatiny skupiny ČSN 42 26xx nízko a stredne legované oceľoliatiny skupiny ČSN 42 27xx
M	austenitické a feriticko-austenitické ocele korozivzdorné, žiaruvzdorné a žiarupevné nemagnetické a oteruvzdorné ocele
K	tvárna liatina skupiny ČSN 42 23xx šedá liatina nelegovaná i legovaná skupiny ČSN 42 24xx temperovaná liatina skupiny ČSN 42 25xx
N	neželezné kovy, zliatiny hliníku a medi, kompozitné materiáli
S	špeciálne žiarupevné liatiny na báze Ni, Co, Fe a Ti (super zliatiny)
H	zušľachtené ocele s pevnosťou nad 1500 MPa, tvrdosťou 45 – 65 HRC

Pomocou práškovej metalurgie je možné vytvárať aj takzvané funkčne gradientné materiáli FGM. Sú to také materiáli, ktorých štruktúra sa v jeho reze mení v závislosti od potrebných vlastností materiálu. Gradientný materiál a jeho štruktúru môžeme členiť do troch základných oblastí viditeľných aj na Obr. 3.3. Prvá vonkajšia štruktúra so zvýšeným obsahom spojiva a minimálnym obsahom kubických karbidov. Pod ňou ležiaca druhá vrstva, označovaná aj ako medzivrstva, so zníženým obsahom spojiva obohatená o kubické karbidy. Jadro nástroja potom tvorí tretia vrstva, ktorej zmes je presne definovaná podielom všetkých troch potrebných fáz (zrna kubického karbidu WC/TiC, zrna hexagonálneho karbidu WC a spojiva kobaltu Co). Zloženie jednotlivých oblastí musí byť optimalizované podľa požiadaviek na povlakovanie. Pri nesprávnych pomeroch jednotlivých fáz by mohlo dôjsť ku krehkej štruktúre a následne k vzniku a šíreniu trhlín, a tak nepriamo aj k zníženiu rezného výkonu nástroja. [12]



Obr. 3.3 Gradientne usporiadaný roh povlakovanej VBD zo SK [11]

Medzi najdôležitejšie vývojové stupne spekaných karbidov v priemyselnej výrobe môžeme určite zaradiť príchod povlakovaných vymeniteľných britových doštičiek v roku 1969 od firmy Sandvik Coromant. Išlo pri tom o veľmi tenkú a tvrdú vrstvu s vynikajúcou odolnosťou voči opotrebeniu. Prvým typom povlaku bol povlak TiC dosiahnutý metódou CVD, neskôr prišli na rad aj povlaky TiN, TiCN a ako posledné aj Al₂O₃. Ďalej potom prebiehal vývoj kombináciou vlastností týchto povlakov a nástroje sa začali povlakovať viacnásobne niekoľkými rôznymi vrstvami cez seba, pričom vznikli povlaky ako napríklad TiC-Al₂O₃, TiC-TiN, TiC-TiCN-TiN, TiC-Al₂O₃-TiN, TiCN-Al₂O₃-TiN. Účel povlakovania od počiatku pozostával predovšetkým z ochrany nástroja pred opotrebovaním zapríčineným abráziou a adhéziou. So vzrastajúcimi vyššími rýchlosťami pri obrábaní a s tým spojenými aj vysokými teplotami pôsobiacimi na nástroj, vznikla potreba nástroj chrániť proti oxidácií a vytvoriť difúziu bariéru medzi nástrojom a obrobkom. Nanášanie povlakov spočíva v nanášaní plynnej fázy na povrch spekaného karbidu. V súčasnosti sa používajú dve metódy a to metóda CVD (chemické naparovanie) a PVD (fyzikálne naparovanie), obidve podrobnejšie popísané na nasledujúcej strane. Charakteristiky jednotlivých tvrdých povlakov sú uvedené v Tab. 3.4. [4] [5] [14]

Tab. 3.4 Charakteristiky vybraných povlakov [14]

Hodnotenie	Chemická stabilita	Oxidačná stabilita	Tvrdosť	Tvrdosť za tepla
++ (pozitívne)	Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	TiC	Al ₂ O ₃
+	TiAlN	TiAlN	TiCN	TiAlN
0 (neutrálne)	TiN	TiN	Al ₂ O ₃	TiN
-	TiCN	TiCN	TiAlN	TiCN
-- (negatívne)	TiC	TiC	TiN	TiC

- CVD povlakovanie

Metóda chemického naparovania spočíva z nanášania povlaku z plynnej fázy počas tepelne aktivovaného procesu pri vysokých teplotách viac ako 1000°C. Takto vysoká teplota zaručuje vysokú adhéziu povlaku na nanášaný materiál. Veľkosť nanášanej častice z plynného prostredia je veľmi malá a pohybuje sa v rozmedzí od 0,5 do 1 μm. Pre dosahovanie hladších a dokonalejších povrchov povlakov, predovšetkým povlaku Al₂O₃, sa používa modifikovaný proces CVD nanášania za stredných teplôt MTCVD, kde teplota nepresahuje 900°C. Avšak v dôsledku všeobecne malých častíc, takto nanášané povlaky poskytujú o niečo nižšiu kvalitu mechanických a tepelných vlastností. [14]

- PVD povlakovanie

Metódy fyzického naparovania zabezpečuje nanášanie celej rady metastabilných ternárnych nitridov zo systému ZkAlN, kde Zk reprezentuje žiaruvzdorné kovy Ti, Zr, Hf, V, Ta a Cr. Najdôležitejším povlakom vyrábaným danou technológiou je povlak TiAlN, ktorého výhodou je, že pri nanášaní tepelne neovplyvňuje materiál nástroja, keďže samotný proces prebieha pri teplotách do 500°C. Celý povlakovací proces PVD prebieha za zníženého tlaku, za pomoci koncentrovania častíc uvoľňovaných zo zdroja fyzikálnymi metódami rozprašovaním v elektromagnetickom poli alebo odparovaním za pomoci nízkonapäťového oblúku, laseru či elektrónového lúču. Práve týmto procesom je možné nanášať povlak aj na ostré hrany rezných nástrojov. [14] [15]



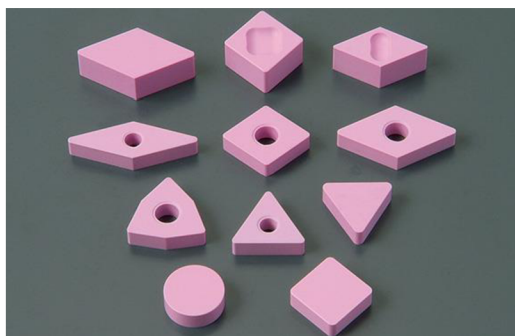
Obr. 3.4 Vyobrazenie vybraných povlakových materiálov [23]

3.3 Rezná keramika

Keramické rezné materiáli tvoria skupinu materiálu, ktoré spájajú zlúčeninu kovu s kremíkom, dusíkom, bórom, kyslíkom a nekovovými látkami. K vzniku keramických nástrojov prispelo predovšetkým zníženie zrnitosti keramického materiálu Al₂O₃, od nepamäti používaného pre výrobu brúsnych kotúčov. Potrebná veľkosť zrna dosiahla rozmerov menších než 5 μm a bolo potrebné znížiť aj pórovitosť materiálu na maximálne 2%. K základným vlastnostiam keramiky patria nízka merná hmotnosť, vysoká tvrdosť a nízka húževnatosť. Na rozdiel od spekaných karbidov či rýchloreznej ocele disponujú vysokou tvrdosťou aj pri vysokých teplotách rezania. [4] Reznú keramiku je možné rozdeliť do dvoch základných skupín:

- Oxidická keramika

Je založená na veľmi čistej a jemnozrnej surovine oxide hlinitom Al_2O_3 , ku ktorému je možné pridávať malé množstvá pomocných látok a tak pretvárať čistú keramiku.. Spolu s pomocnými látkami vznikajú polzmesná ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{ZrO}_2$, $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{ZrO}_2 + \text{CoO}$) a zmesná ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$, $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{ZrO}_2 + \text{TiC}$, $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC} + \text{TiN}$) keramika, vid'. Obr. 3.5. pre uľahčenie procesu spekania a zabezpečenie stabilnej veľkosti zrna materiálu. Tieto zrná po spečení vytvárajú pevné kryštály spájané iónovou a kovalentnou väzbou umožňujúcou iba minimálny pohyb atómov. Výsledkom je materiál s vysokou tvrdosťou, odolnosťou proti deformáciám a vysokou termochemickou stabilitou aj pri vysokých teplotách, materiál veľmi vhodný pre obrábanie vysokou reznou rýchlosťou a nízkou posuvovou rýchlosťou. [12] [16]



Obr. 3.5 Keramika na báze Al_2O_3 [16]

- Nitridová keramika

Keramika založená na bázy nitridu kremíku Si_3N_4 a jeho α a β kryštálových štruktúrnych modifikáciách. Vyznačujú sa rovnakou tvrdosťou ako spekané karbidy v rozsahu od 1550 do 1700 HV. V porovnaní s čistou keramikou na báze Al_2O_3 sa vyznačuje vyššou húževnatosťou. Taktiež je možné ňou obrábať za použitia vyššej posuvovej rýchlosti. Nakoľko pri obrábaní tvárnej liatiny vykazuje rýchle opotrebenie a krátku životnosť, je vhodné nitridovou keramikou obrábať predovšetkým šedé liatiny. Podobne ako aj oxidická keramika, za prítomnosti pomocných látok tvorí zmesnú (Si_3N_4 , $\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{Y}_2\text{O}_3$, $\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{TiN}$) keramiku, vid'. Obr. 3.6. [9] [16]



Obr. 3.6 Keramika na báze Si_3N_4 [16]

3.4 Cermety

Samotný názov vznikol spojením základov slov ich hlavných komponentov, a síce slov „CERamics“ (keramika) a „METal“ (kov), ktorých výhodou je, že spájajú vlastnosti týchto dvoch materiálov. Cermety sú spekané materiály podobné reznej keramike na báze karbidu titanu TiC , nitridu titanu TiN alebo karbonitridu titanu TiCN , prevažne ktorými je vo veľkej miere nahradený práve karbid volfrámu WC . Ako spájadlo sa používa tradičný kobalt Co alebo nikel Ni . Vlastnosťou cermetov je predovšetkým nízka merná hmotnosť. Veľmi dobre odolávajú difúznemu a oxidačnému opotrebeniu, majú vysokú chemickú stabilitu a za tepla si udržiavajú vysokú tvrdosť a odolnosť. Vyznačujú sa tiež vysokou mierou oteru schopnosti chrbtovej časti nástroja a odolnosťou voči tvorbe výmoľov na jeho čele. Najväčšou prekážkou pri ich používaní je ich nízka húževnatosť, ktorá aj napriek neustálemu vývoju stále nedosahuje hodnoty zrovnateľné so spekanými karbidmi. Za pomoci cermetov je možné dlhodobo dosahovať presnosti výrobkov a vysokú akosť ich obrábaných povrchov.

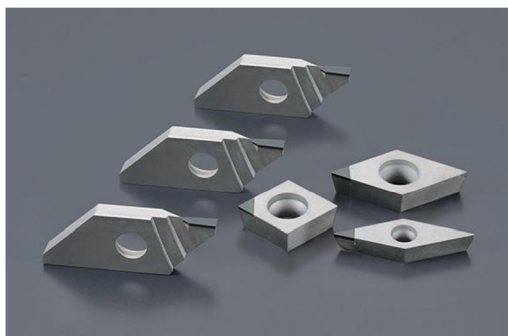
Cermety sú taktiež veľmi vhodné na jemné a dokončovacie operácie pri opracovávaní uhlíkových, legovaných, kalených aj popúšťaných ocelí, neprerušovaným rezom pri vysokých rezných otáčkach a súčasných malých hĺbkach rezu. [4] [9]

3.5 Supertvrde rezné materiály

Skupina supertvrdých rezných materiálov je predovšetkým charakterizovaná dvojicou materiálov, a síce kubickým nitridom bóru (CBN) a polykryštalickým diamantom (DP). Obidva materiáli disponujú vysokou pevnosťou v tlaku a taktiež neopomenuteľnou tvrdosťou, čo predurčuje tieto rezné materiáli na použitie pri špeciálnych operáciách. [5]

- Polykryštalický diamant

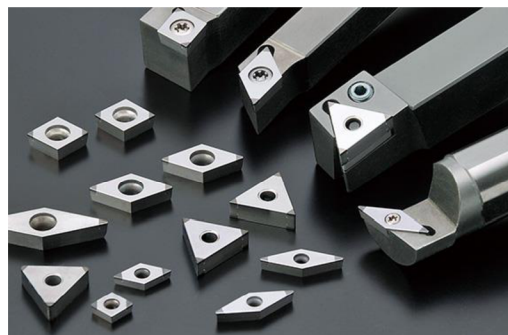
Diamant je čistý prvok uhlíku a súčasne je aj najtvrdším prírodným materiálom s jeho teplotou tavenia prevyšujúcou 4000°C. Je extrémne chemicky inertný, to jest nie je možné ho akokoľvek ovplyvniť žiadnymi kyselinami ani inými chemikáliami, azda okrem tých, reagujúcich za vysokých teplôt. Jeho vysoká tvrdosť pramení z jeho chemickej štruktúry, a síce z jeho kovalentne navzájom viazaných piatich atómov uhlíka. Jeho tvrdosť zodpovedá hodnote od 6000 do 10 000 HV. Napriek jeho vysokej tvrdosti, diamant má pomerne nízku teplotnú stálosť a už pri teplote vyššej než 800°C dochádza k jeho premene na grafit. Pri obrábaní ocelí a liatin by preto dochádzalo k difúzií medzi nástrojom a obrobkom a tým k veľmi rýchlemu opotrebeniu najmä čela nástroja. [5] [9]



Obr. 3.7 VBD s DP špičkou [16]

- Kubický nitrid bóru

Vysoká tvrdosť kubického nitridu bóru ho zaraďuje do tejto skupiny a radí ho medzi veľmi tvrdé materiáli aj napriek tomu, že sa prirodzene v prírode osamotene vôbec nevyskytuje. Bór ako stavebná jednotka CBN, patrí medzi polokovové prvky s vysokým bodom tavenia a varu. Jeho tvrdosť zabezpečuje skladba kovalentných a iónových väzieb medzi susednými atómami. Oproti kryštalickému diamantu dokáže odolávať vysokej teplote pri obrábaní železných materiálov a to za pomerne vysokých rezných a posuvových rýchlostí. Taktiež, narozdiel od diamantu, umožňuje obrábanie kalených ocelí až do tvrdosti 68 HRC, pričom vytvára veľmi kvalitné povrchy a obrobené plochy nie je ďalej potrebné brúsiť. Na rezných nástrojoch sa vyskytuje v dvoch formách a to, buď ako tenká vrstva o hrúbke iba 5 μm nanosená na povrchu spekaného karbidu alebo tvorí špičku ostria VBD, kde v niektorých prípadoch býva aj vymeniteľná. [9] [12]

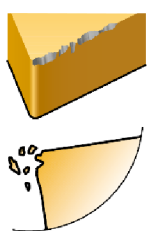


Obr. 3.8 VBD s CBN špičkou [16]

3.6 Opatrebovanie rezných materiálov

K opotrebeniu nástrojov dochádza predovšetkým z dôvodu, že pri obrábacom procese je nevyhnutnosť nástroja vytvárať kontakt s obrobkom a súčasne sa pohybovať. Nakoľko väčšina obrábaných materiálov obsahuje tvrdé častice rôzneho druhu, kde pri tomto nevyhnutnom kontakte, častice svojou tvrdosťou podobné tvrdosti britu, majú na brit nepriaznivý abrazívny či adhézny efekt. Pri tomto vzájomnom kontakte je nezamedziteľný vznik vysokých teplôt a tlakov medzi dotýkajúcimi sa materiálmi. Čistý povrch kovu má preto veľmi pozitívny sklon k chemickým difúznym procesom a tepelnému namáhaniu materiálu britu. Za týmito procesmi stoja základné faktory adhézia, abrázia, chemické, tepelné a mechanické vplyvy, pri ktorých dochádza k narúšaniu ostria britu nástroja a teda neželanému opotrebovaniu. [7] [17]

3.6.1 Opatrebenie z fyzikálneho hľadiska

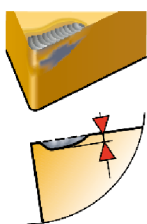
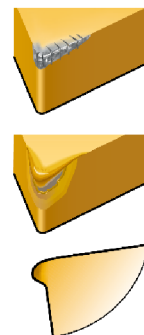


Mechanické opotrebenie

Napätie v ostrí britu nástroja najčastejšie spôsobuje mechanický lom materiálu. Lom má často mechanické príčiny vzniku. Kolísaním teploty súčasne pri mechanickom zaťažení reznými silami nemá priaznivý dopad na rezný materiál. Príčinami vzniku lomu sú najčastejšie nadmerné mechanické zaťaženie britu, homogenita obrábaného materiálu či prerušovaný rez. [3]

Oxidačné opotrebenie

Vzniká v súvislosti s vysokými teplotami pri reznom procese, ktoré v spolupráci s všade prítomným kyslíkom vo vzdušnom prostredí majú za následok oxidáciu nástrojového materiálu. Niektoré rezné materiály sú v porovnaní s inými náchylnejšie k oxidácii. Špeciálne vo vzdialenosti od špičky nástroja, kde končí šírka záberu ostria nástroja, má vzduch prístup do rezného procesu a práve v tomto mieste vznikajú typické oxidačné žliabky. Na ich prevenciu tiež nepridávajú prudké zmeny teploty pri obrábaní. Dôsledkom vysokých teplôt v kombinácii s mechanickým zaťažením na ostrí britu vzniká plastická deformácia, takzvané lavínové opotrebenie. [5] [7] [17]

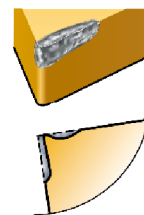


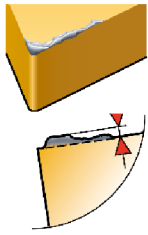
Difúzne opotrebenie

Charakteristické chemickou reakciou a vzájomnou výmenou uhlíku medzi obrábaným a nástrojovým materiálom. Afinita spekaného karbidu a ocele vedie k opotrebeniu, ktorého dôsledkom je vznik žliabku na čele britu. Keďže toto opotrebenie úzko súvisí s teplotou, vytvára sa preto pri vysokých rezných rýchlostiach najväčší žliabok. Vplyv tvrdosti materiálu pri tomto opotrebení nemá takmer žiadny nežiaduci vplyv na materiál nástroja. [3] [7]

Abrazívne opotrebenie

Je sprevádzané tvrdými mikročasticami uvoľnenými z nástroja, ktoré sa následne dostávajú medzi obrobok a nástroj, kde pôsobia ako abrazivo a obrusujú povrchy materiálov. Vplyvom mechanického zaťaženia tak na chrbte britu vzniká obrúsená rovinná plocha. Schopnosť odolávať abrazívnemu opotrebeniu je predovšetkým závislá na tvrdosti nástrojového materiálu, ktorý v prípade jeho hustej štruktúry tvrdých častíc bude tomuto opotrebeniu úspešnejšie odolávať. [3]





Adhézne opotrebenie

Vyskytuje sa predovšetkým pri nízkych teplotách obrábania na čele nástroja. Adhézny oter je spôsobovaný vytrhávaním častíc britu v dôsledku adhézných spojov medzi nástrojom a obrobkom. Je typický pre nízke rezné rýchlosti, kde vzniká bodový styk medzi trieskou a nástrojom. Tento jav je častokrát sprevádzaný vznikom nárustku, ktorý je navarovaný a vytvrdzovaný k povrchu britu. Nárustok môže ďalej rásť, až do rozmerov kedy môže poškodiť, vylomiť či vydrobiť hrot britu. [7]

3.6.2 Typy opotrebovania

Kombináciou mechanických, chemických, tepelných a abrazívnych faktorov dochádza k zaťažovaniu britu nástroja, ktoré sa následne prejavuje jeho opotrebovaním. Pre dosiahnutie čo najvyššej produktivity z hľadiska životnosti nástroja, kvality výrobku a optimalizácie rezných parametrov je stav britu dôležité starostlivo sledovať. V závislosti od technologických podmienok rezného procesu sa uvádzajú rôzne formy jeho opotrebovania. [3] [7]

Opotrebovanie chrbta

Jedná sa o jednu z abrazívnych foriem opotrebovania, ktorá sa prejavuje na chrbtovej ploche britu. Je to obvyklý typ opotrebovania, pričom rovnomerne sa zväčšujúce opotrebovanie chrbta sa považuje za ideálne. Pri príliš veľkom opotrebovaní vzniká zmena geometrie britu, ktorá má za následok zhoršenie akosti obrábaného povrchu, nepresnosť rozmerov a zvýšenie trenia. [3] [6] Príčiny tohto druhu opotrebovania sú nasledovné:

- príliš vysoká rezná rýchlosť
- príliš mäkká nástrojová trieda
- nedostatok reznej kvapaliny



Obr. 3.9 Opotrebovanie chrbta [5]

Opotrebovanie chrbta v tvare vrubu

Opotrebovanie v tvare vrubu na hlavnom chrbte britu je typické adhézne opotrebovanie, ktoré však môže tak isto súvisieť s javom oxidačného opotrebovania. Vruby vznikajú v mieste kontaktu britu s bokom triesky. Tento typ opotrebovania sa obmedzuje presne na miesto prieniku vzduchu do oblasti obrábania. Opotrebovanie v tvare vrubu na vedľajšom chrbte britu je spôsobené mechanickými príčinami, ktorých pôvodcami sú tvrdé častice materiálu obrobku. Mimoriadne veľké opotrebovania ovplyvňuje utváranie triesky a môže viesť k lomu doštičky. Tento typ opotrebovania sa vyskytuje hlavne u korozivzdorných austenitických oceliach. [3] Príčiny tohto druhu opotrebovania sú nasledovné:



Obr. 3.10 Vrubové opotrebenie [5]

- oxidácia britu vo vzdialenosti rovnajúcej sa hĺbke rezu
- príliš vysoká teplota britu
- príliš vysoká rezná rýchlosť

Opotrebovanie čela v tvare žliabku

Tento typ opotrebovania vzniká dôsledkom pôsobenia mechanizmov difúzneho opotrebovania a abrázie. Žliabok z časti vzniká úberom rezného nástrojového materiálu, vyvolaným brúsiacim pochodom, ktorý spôsobujú tvrdé častice obsiahnuté v materiály obrobku. Hlavne však vzniká difúziou v mieste britu s najvyššou teplotou, to znamená, v mieste kontaktu medzi trieskou a materiálom britu. Opotrebovanie britu na čele je možné nájsť na viacerých typoch doštičiek, najvýraznejšie sa ale prejavuje u rezných nástrojov s rovným čelom. Tvrdosť za tepla a malá afinita medzi materiálmi obrobku a britu nástroja znižujú tendenciu k vzniku tohto typu opotrebovania. Pri obrábaní mäkkých materiálov vzniká výmol širší a plytší, u tvrdých materiálov naopak výmol úzky a hlboký. [7] Príčiny tohto druhu opotrebovania sú nasledovné:

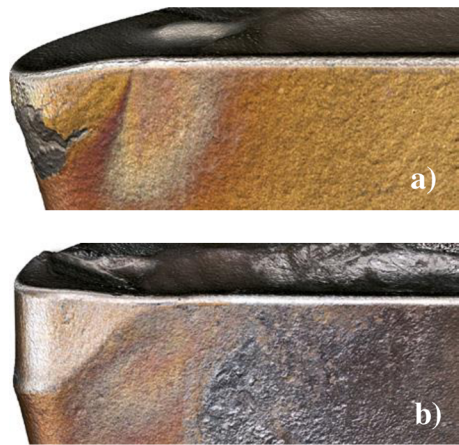


Obr. 3.11 Opotrebovanie čela [28]

- | | |
|---------------------------------|----------------------------------|
| • príliš vysoká rezná rýchlosť | • príliš mäkká nástrojová trieda |
| • príliš vysoká rýchlosť posuvu | • nedostatok reznej kvapaliny |

Plastická deformácia britu

Pri tomto type opotrebovania zohráva najväčšiu rolu kombinácia vysokej teploty a rezných tlakov na brit, vznik ktorých vyvoláva hlavne vysoká rezná rýchlosť a posuv, ako aj tvrdosť materiálu obrobku. Vyskytuje sa pri obrábaní všetkými nástrojovými materiálmi po dosiahnutí limitnej teploty v niektorom mieste stykových plôch medzi nástrojom a obrobkom. Pri dosiahnutí tejto teploty dochádza k prudkému poklesu tvrdosti rezného materiálu v dôsledku štruktúrnych zmien. Tvrdosť za tepla je teda rozhodujúcim faktorom pri výbere rezného nástrojového materiálu, ktorý takýmto zaťažением odoláva. Typická deformácia britu ešte viac zvyšuje teplotu a má za následok zmenu geometrie britu a zmeny v odoberaní triesky. [3] [7] Príčiny tohto druhu opotrebovania sú nasledovné:

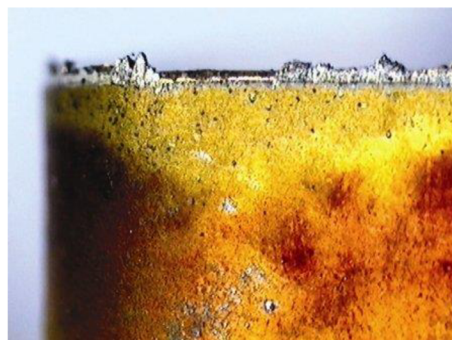


Obr. 3.12 Ostrie britu stlačené (a) a nadvihnuté (b) [5]

- príliš vysoká teplota v oblasti rezu
- príliš mäkká nástrojová trieda
- nedostatok reznej kvapaliny

Tvorba nárastku na brite

V prevažnej väčšine prípadov sa jedná o fenomén vzťahujúci sa k teplotám a rezným rýchlostiam. Spôsobený však môže byť aj odlupovaním vrstiev v mieste britu alebo inými formami opotrebovania. Toto vedie nielen k zmene geometrie britu, ale môže spôsobiť aj odlomenie častíc materiálu spolu s navareným nárastkom, ktorý je tvorený časticami materiálu obrobku. Afinita britu k materiálu hrá v tomto prípade rozhodujúcu úlohu. Nízke teploty a vysoké tlaky pritom vyvolávajú medzi materiálom triesky a čelom nástroja efekt zvarovania. V dnešnej dobe prebieha veľká časť spôsobov obrábania nad oblasťou tvorby nárastkov a mnohé moderné rezné materiály nemajú pri správnom použití k tejto forme opotrebovania sklony. Nadmerná tvorba nárastkov môže viesť dokonca aj k lomu britovej doštičky. [3] [6] Príčiny tohto druhu opotrebovania sú nasledovné:



Obr. 3.13 Nárastok na brite [28]

- príliš nízka teplota britu
- negatívna geometria britu
- nízka rezná rýchlosť
- prítomnosť silne lepiivých materiálov

Hrebeňovité trhliny na ostrí nástroja

Vznik takýchto trhlín je formou únavového opotrebovania, ktoré vzniká tepelnými šokmi. Obzvlášť zmena teplôt pri obrábaní často vedie k tomuto druhu opotrebovania. Trhliny sa tvoria kolmo na ostrie, pritom sa môžu častice rezného nástrojového materiálu medzi jednotlivými trhlinami vylamovať a vyvolať tak náhly lom britu. Použitie chladiacich kvapalín sa neodporúča z dôvodu ešte väčšieho zvýšenia teplotných rozdielov pri zábere britu do materiálu obrobku a pri výstupe z neho. [3] Príčiny opotrebovania sú nasledovné:

- obrábanie s prerušovaným rezom
- nestabilná teplota rezu



Obr. 3.14 Hrebeňovité trhliny na ostrí nástroja [5]

Únavový lom

Táto forma opotrebovania je typickým následkom mimoriadne veľkých zmien veľkosti rezných síl. Vzniká vplyvom súčtu neustále sa meniacich rôznych zaťažení, kedy pôsobenie jednotlivých druhov zaťaženia nie je samo o sebe dosť veľké, aby malo za následok krehký lom. Lomové plochy pritom prebiehajú hlavne paralelne s ostrím. [7] Príčiny tohto druhu opotrebovania sú nasledovné:

-
- nadmerné kolísavé zaťaženie britu
 - nepriaznivý prístup britu do materiálu obrobku alebo vibrácie
 - príliš vysoký posuv

Vydrolovanie ostria

Jedná sa o formu opotrebovania, pri ktorej sa brit namiesto rovnomerného opotrebovania vydroluje. To je spôsobené špičkami zaťaženia a vedie k tomu, že sa drobné častice rezného materiálu oddávajú z povrchu britu. Za najčastejšiu príčinu tohto typu opotrebovania sa považuje obrábanie prerušovaným rezom. Ďalšie z faktorov spôsobujúcich tento typ opotrebovania môžu byť nevhodná voľba rezného materiálu, ostria alebo príliš vysoké hodnoty rezných parametrov. Pri starostlivom sledovaní britu je možné vopred určiť najpravdepodobnejšie miesto vydrolovania. [6] [7] Príčiny opotrebenia sú nasledovné:

- prílišná krehkosť materiálu rezného nástroja
- príliš pozitívna geometria britu
- nárastok

Lom britu

Predstavuje náhlu poruchu a osudný koniec technického života každého britu. Totálny lom britu je veľmi nebezpečný a malo by sa mu zabrániť za každých okolností. Lom britu nástroja je potrebné za každých okolností považovať za ukončenie trvanlivosti. Krehký lom môže byť spôsobený napríklad nízkou húževnatosťou zvoleného materiálu. [3] Príčiny tohto druhu opotrebenia sú nasledovné:

- príliš tvrdá nástrojová trieda
- málo odolná geometria britu pre vysoké rezné rýchlosti
- príliš vysoké hodnoty rezných parametrov

3.7 Trvanlivosť rezných nástrojov

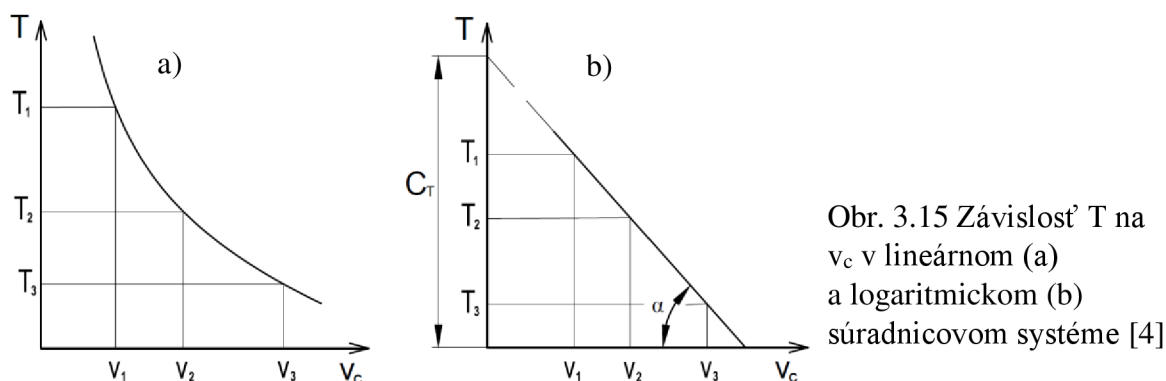
Trvanlivosť rezných nástrojov je možné vyobrazit' jednoducho, a síce ako dlho je nástroj za daných podmienok možné používať. V okamihu, keď nástroj už nie je schopný vykonávať akékoľvek ďalšie obrábanie či už z hľadiska poškodenia, opotrebovania alebo zničenia, je jeho trvanlivosť na konci. Takáto skutočnosť je pomerne jednoducho rozpoznateľná aj na akosti obrábaného povrchu, presnosti rozmerov, ale častokrát aj na schopnosti britu odvádzať triesku. Najneprijateľnejším javom a preukázateľným prekročením trvanlivosti nástroja je lom britu. Takýmto okolnostiam je však potrebné predchádzať a aj z tohto dôvodu je trvanlivosť nástroja možné predikovať a určovať dopredu práve za pomoci Taylorovho vzťahu (3.1). Teoretické stanovenie trvanlivosti britu je veľmi dôležité z pohľadu presnosti obrábania. Trvanlivosť nástroja sa preto vzťahuje na opotrebenie britu, v žiadnom prípade nie lom nástroja, kedy je nástroj už zničený. V prípade, že je nástroj už opotrebený, za jeho pomoci je nemožné dosahovať už spomínaných potrebných akostí povrchov a požadovaných rozmerových tolerancií vyrábaných súčastí. [3] [17]

$$T = \frac{C_T}{v_c^m} \quad (3.1)$$

kde:	C_T	[-]	materiálová konštanta
	m	[-]	materiálový exponent
	T	[min]	trvanlivosť nástroja
	v_c	[m.min ⁻¹]	rezná rýchlosť

Materiálová konštanta C_T zohľadňuje vlastnosti materiálov obrobku a aj nástroja, pričom naberá hodnôt v rozsahu od 10^8 do 10^{12} . Hodnoty exponentu m zas ovplyvňujú predovšetkým vlastnosti rezného nástroja, pričom sa pohybuje v hodnotách pre nástrojové ocele od 8 do 10, až po reznú keramiku, ktorá predstavuje najnižšie hodnoty od 1,5 po 2,5. Tieto konštanty je možné pomerne jednoducho určiť odčítaním z grafu závislosti trvanlivosti na reznej rýchlosti, viď, Obr. 3.15. Pre exponent m potom platí rovnosť (3.2). [7]

$$m = \tan \alpha \quad (3.2)$$



Obr. 3.15 Závislosť T na v_c v lineárnom (a) a logaritmickom (b) súradnicovom systéme [4]

Trvanlivosť rezného nástroja, podobne ako opotrebenie nástroja, je závislé predovšetkým na vlastnostiach obrábacieho procesu. Ďalej na materiály nástroja a v neposlednom rade na rezných parametroch. Najdôležitejšiu rolu v trvanlivosti, ako popisuje aj Taylorov vzťah, hrá rezná rýchlosť, posuvová rýchlosť, šírka záberu ostria a celkové prostredie výrobného procesu. K dosiahnutiu čo najlepšej trvanlivosti nástroja sa využíva úprava rezných podmienok tak, aby bolo nástroj možné využiť čo najdlhšie. Najznačnejší vplyv má už spomínaná rezná rýchlosť v_c . Znížením reznej rýchlosti sa zníži aj množstvo tepla vznikajúceho pri reznom procese, čo má pozitívny vplyv na trvanlivosť nástroja. Táto rýchlosť však naďalej musí byť dostatočne vysoká na to, aby na brite nástroja nedochádzalo k vzniku nárazu a tým aj k z níženiu jeho trvanlivosti. Zvýšiť trvanlivosť nástroja je možné aj skrátením doby, ktorú je nástroj v reze. K tomuto dôjde zvýšením posuvu nástroja na otáčku f a taktiež zvýšením šírky záberu ostria a_p , čo v celkovom hľadisku zníži koncový počet rezov nástroja v celom procese obrábania. [5] [6]

4 ANALÝZA SILOVÉHO ZAŤAŽENIA PRI VÝROBE ZÁPICHOV

Je nevyhnutné aby samotnej analýze predchádzal zber dát a experimentálne meranie. Bolo preto vykonané meranie zamerané na silové zaťaženie upichovacieho rezného nástroja pri procese sústruženia. V meraní je použitý upichovací nôž od firmy Pramet, pričom dosiahnuté výsledky boli následne dôkladne analyzované. Vyhodnocované boli najideálnejšie vstupné parametre pre daný nástroj v závislosti k silovým zaťaženiám nástroja. Samotný priebeh merania je podrobne popísaný v nasledujúcich podkapitolách.

4.1 Návrh postupu merania

Experiment bude prebiehať v priestoroch a dielňach FSI VUT v Brně, na Ústave strojírenské technologie v budove C2, areálu FSI. Na počiatku bude dôležitá správna voľba obrábaného materiálu z hľadiska k vybranému reznému nástroju. V meraní sa bude jednať o získanie údajov a dát silového zaťaženia rezného nástroja pri technológii upichovania materiálu na univerzálnom hrotovom sústruhu. Dáta budú zhromažďované za pomoci veľmi citlivého snímača pripevneného priamo na samotný sústruh a následne spracovávané v počítači vybavenom špeciálnym softwarom. Ďalej za pomoci výpočetnej techniky budú dáta roztriedené a rozanalyzované. V kombinácii spolu so všeobecne platnými matematicky určenými vzťahmi a rovnicami v oblasti obrábania dôjde k ich vyhodnoteniu, pričom sa bude klásť dôraz na maximálnu efektívnosť a ekonomickosť obrábacieho procesu. Výsledky budú navzájom porovnávané a bude vyjadrené stanovisko a navrhnuté odporúčanie pre najlepšie vstupné rezné parametre, ktoré boli použité pri experimente.

4.1.1 Materiál obrobku a použitý nástroj

Ako skúšobná vzorka pre experiment bol zvolený polotovár materiálu normalizačne žihanej ocele 12 050.1 značenej tiež EN 1.1191. Polotovár bol zvolený za tepla valcovaná tyč o priemere $D = 40$ mm a dĺžke 420 mm. Hovoríme o nízko legovanej uhlíkovej oceli s obsahom uhlíku do 0,5%, určenej na hriadele strojov, pre ozubené kolesá, ojnice, vretená či čapy a skrutky. Jej presne normou špecifikované mechanické vlastnosti a chemické zloženie sú uvedené v Tab. 4.1 a Tab. 4.2. [18]

Tab. 4.1 Mechanické vlastnosti oceli 12 050.1 [19]

Popis	Skratka	Hodnota	Jednotka
Medza klzu	$R_{p0,2}$	min. 325	[MPa]
Medza pevnosti	R_m	min. 540	[MPa]
Ťažnosť	A_5	min. 17	[%]
Tvrdosť	[-]	max. 225	[HB]
Modul pružnosti v ťahu	E	221	[GPa]
Modul pružnosti v šmyku	G	79	[GPa]

Tab. 4.2 Limitné chemické zloženie oceli 12 050.1 v % [19]

Oceľ 12 050.1	C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	P	S
Podľa ČSN	0,42 0,50	0,50 0,80	0,17 0,37	0,25	0,30	0,30	0,040	0,040
V súčasnosti	0,51	0,69	0,25	0,15	0,00	0,12	0,023	0,017

Nástroj pre experimentálne meranie bol zvolený od firmy Dormer Pramet, firmou označovaný a patriaci do skupiny LFMX. Tieto nástroje spolu so skupinou LCMF sa v súčasnosti radia medzi popredné univerzálne zapichovacie, upichovacie a kopírovacie nástrojové VBD. Taktiež sa dostáva do popredia nový materiál VBD, a síce T8330 s PVD povlakovaním, výrobcom označovaný ako UP!GRADE. V meraní bola použitá jeho staršia osvedčená náhrada materiálu VBD 8030. Konkrétnou použitou VBD v experimente bola doštička s označením LFMX 3.10 – 0.20 SN – F2; 8030, klasifikovaná ako základná a univerzálna VBD určená pre najrôznejšie obrábané materiály. [20]

4.1.2 Strojové zabezpečenie

Stroj sprostretkujúci meranie silového zaťaženia rezného nástroja bol univerzálny hrotový sústruh SU50A-SP vyrobený spoločnosťou TOS Kuřim a.s. Ako jeden z najuniverzálnejších, najrobustnejších a najpresnejších sústruhov vyrábaných v bývalom Československu bol produkovaný v troch dĺžkových variantách (1000, 1500 a 2000 mm). Jeho robustnosť ho predurčuje na kusovú či malosériovú výrobu, pričom dokáže odoberať materiál pri hrubovaní aj pri pomerne veľkej šírke záberu ostria rezného nástroja. Vreteno uložené v presných a navzájom od seba odsadených valivých ložiskách, je možné poháňať až dvoma elektromotormi o celkome výkone až 11 kW. Pohonné ústrojenstvo ďalej tvorí prevodovka, spojená s vretenom za pomoci unášacej spojky. Spúšťanie, zastavovanie a kontrolovanie smeru otáčania vretena zabezpečujú elektrické spínače. Dôležité technické parametre stroja sú uvedené v Tab. 4.3. [21] [22]



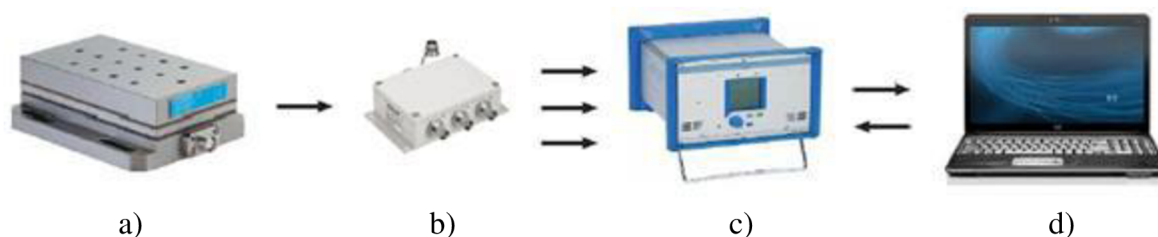
Obr. 4.1 Univerzálny hrotový sústruh SU50A-SP TOS Kuřim a.s. [27]

Tab. 4.3 Technické parametre sústruhu SU50A-SP [21]

Popis	Hodnota	Jednotka
Obežný priemer nad lôžkom	500	[mm]
Obežný priemer nad suportom	250	[mm]
Maximálna hmotnosť obrobku	850	[kg]
Šírka lôžka	420	[mm]
Vzdialenosť hrotov	1500	[mm]
Otáčky vretena	12,1 - 1400	[min ⁻¹]
Výkon motorov	11	[kW]

4.1.3 Meracie ústrojenstvo

Meranie silového zaťaženia rezného nástroja a získané hodnoty použité v praktickej časti práce, boli nadobudnuté za pomoci trojzložkového piezoelektrického dynamometra od firmy Kistler 9257B, ktorým disponuje náš Ústav Strojárske Technológie. Celá meracia aparátúra teda pozostávala z dynamometru, distribučného boxu s BNC konektormi, z viackanálového zosilňovača signálov typu 5070A a nakoniec z vyhodnocovacieho zariadenia v podobe laptopu vybaveného softwarom DynoWare 2852 A-02-2. Takto zapojená a za pomoci káblov pospájaná aparátúra je predurčená k trojosému meraniu zložiek silového zaťaženia rezného nástroja, pričom samotný dynamometer je vhodný aj pre meranie momentového zaťaženia nástroja. Schéma zapojenia sústavy je vyobrazená na Obr. 4.2.



Obr. 4.2 Schéma zapojenia meracieho ústrojenstva Kistler [26]

a) dynamometer, b) distribučný box signálov, c) zosilňovač signálov, d) laptop a software

4.1.4 Parametre obrábacieho procesu

Pre experiment je pred jeho zahájením dôležité určiť rezné podmienky, za akých bude rezný proces prebiehať. Pre daný experiment je na základe šírky ostria zvoleného nástroja šírka záberu ostria $a_p = 3$ mm. Ďalšie stanovené rezné parametre sú popísané v Tab. 3.1. Pre stanovenie otáčok vretena bol použitý výpočtový vzťah (1.1) a následne upravený pre výpočet otáčok n , vid'. rovnica (4.1). Nakoľko cieľom práce je zistiť a pomenovať závislosti na veľkostiach síl počas obrábania, a tak určiť optimálne rezné podmienky, parametre rezného procesu boli v procese merania menené, vid'. Tab. 4.5.

Tab. 4.4 Parametre rezného procesu

Popis	Skratka	Hodnota	Jednotka
Posuv nástroja na otáčku vretena	f	10, 15, 20, 25	[mm]
Rezná rýchlosť	v_c	15, 20, 25, 30, 35	[m.min ⁻¹]
Šírka záberu ostria nástroja	a_p	3	[mm]
Vonkajší priemer obrobku	D	40	[mm]

$$n = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot D} \quad (4.1)$$

$$n = \frac{15 \cdot 1000}{\pi \cdot 40} = 119,37 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$$

kde:	D	[mm]	priemer obrobku
	n	[min ⁻¹]	otáčky obrobku
	v_c	[m.min ⁻¹]	rezná rýchlosť
	π	[-]	Ludolfovo číslo

Tab. 4.5 Závislosť otáčok vretena na reznej rýchlosti

Popis	Skratka	Hodnota					Jednotka
Rezná rýchlosť	v_c	15	20	25	30	35	[m.min ⁻¹]
Ootáčky vretena	n	119	159	199	239	279	[min ⁻¹]

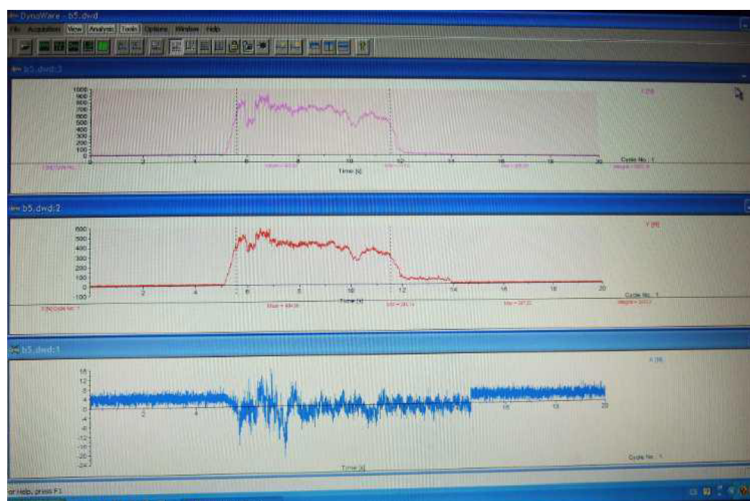
4.2 Postup merania

Po správnej voľbe materiálu obrobku a rezného nástroja nasledovala voľba rezných parametrov pre celý obrábací proces. Nasledovalo správne zapojenie meracej sústavy, kde hneď potom bol na hrotový sústruh SU50A-SP medzi nožovou hlavu a pozdĺžny suport upnutý piezoelektrický dynamometer Kistler 9257B. Na dynamometer a nožovú hlavu bol umiestnený držiak s planžetou pre upnutie reznej doštičky. Rezná doštička bola následne nasadená do držiaka skrz pružný element preto, aby sa zamedzilo vykláznutiu a poškodeniu doštičky. Pri skúškach boli uskutočnené merania priebehu silového zaťaženia nástroja.

Následne prebehla kalibrácia meracej sústavy, z dôvodu, aby boli vylúčené chyby pri nastavení meracej aparatury. Keď bola celá aparatura pripravená, na sústruhu bola nastavená prvá hodnota otáčok vretena podľa tabuľky Tab. 4.5 s príslušnou hodnotou **n** rovnou 119 min⁻¹. Stroj bol následne spustený a rezný nástroj bol posunom uvedený do záberu. Hodnota posuvu **f** bola 0,10 mm. Meranie prebiehalo po dobu nasledujúcich 20 s, pričom dynamometer zaznamenával všetky silové zaťaženia naň pôsobiace, vyobrazené na Obr. 4.4 až Obr. 4.8. Z dát sú vždy smerodajné iba hodnoty, počas ktorých nástroj vykonával reznú operáciu, a teda nie sú nulové. Pri experimente bol meraný priebeh silového zaťaženia

rezného nástroja v troch osách x, y a z, teda reznej, posuvovej a pasívnej sily, všetky vznikajúce pri rezaní zápichu a celý čas počas obrábania pôsobiace na brit rezného nástroja.

Po ukončení daného merania bol stroj aj meracia aparatúra zastavená a v priebehu niekoľko sekúnd software DynoWare vyhodnotil veľkosti zložiek silového zaťaženia vo všetkých troch súradnicových osiach, vid'. užívateľské prostredie softwaru na Obr. 4.3. Namerané hodnoty boli následne uložené do textového súboru a pripravené na ďalšiu analýzu. Po ukončení prvého merania bol stroj prestavený podľa ďalších rezných parametrov a meranie sa za rovnakých podmienok opakovalo pre kombináciu všetkých rezných a posuvových rýchlostí.



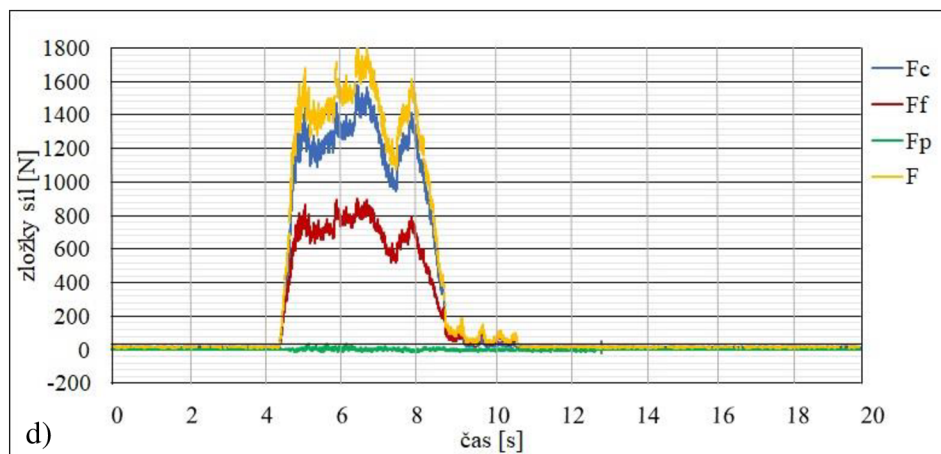
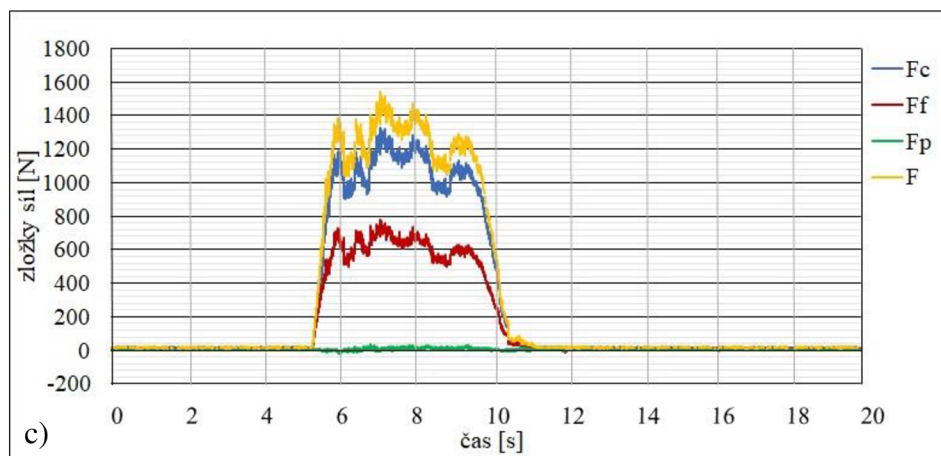
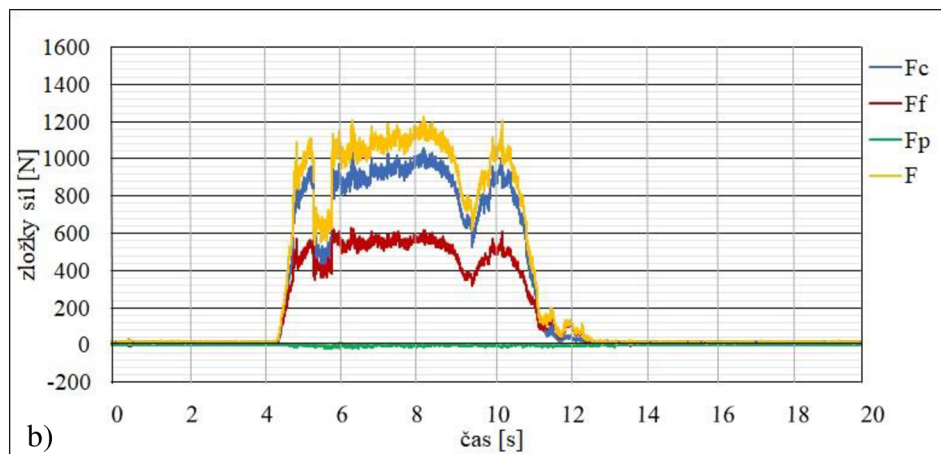
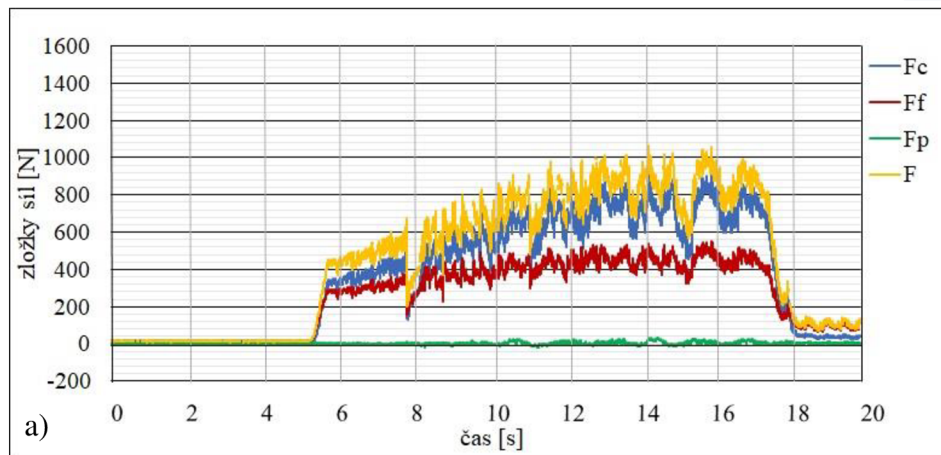
Obr. 4.3 Užívateľské prostredie softwaru DynoWare [26]

Ukončením experimentu bol získaný súbor informácií o silových zaťaženiach pôsobiacich na brit rezného nástroja v závislosti na čase a zmene rezných a posuvných podmienok pri zapichovaní daným rezným nástrojom. Všetky hodnoty boli následne upravené, prenesené do grafov a vyhodnotené.

4.3 Výsledky merania

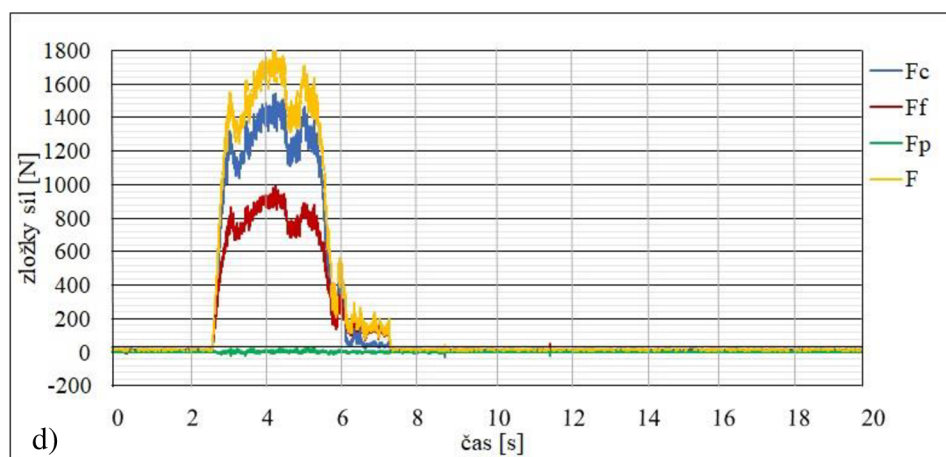
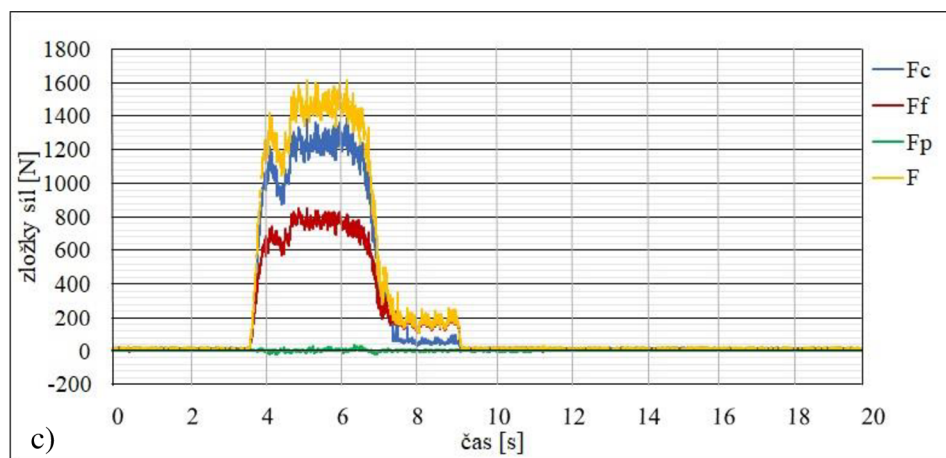
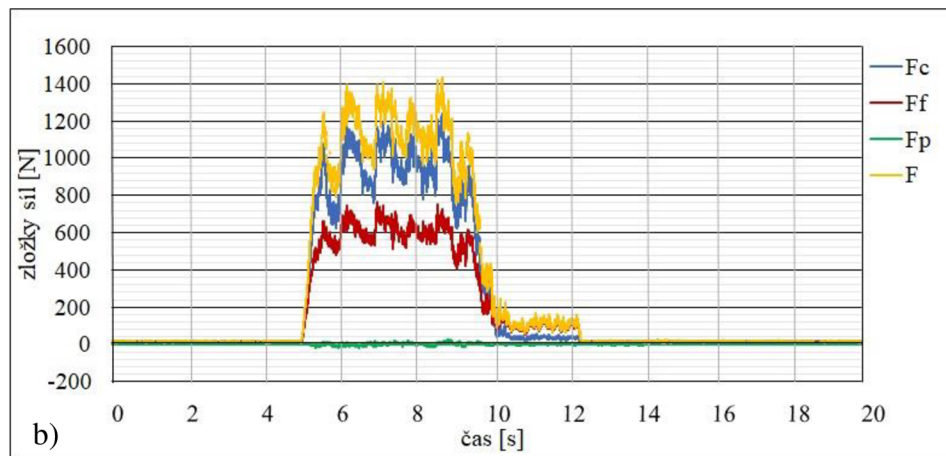
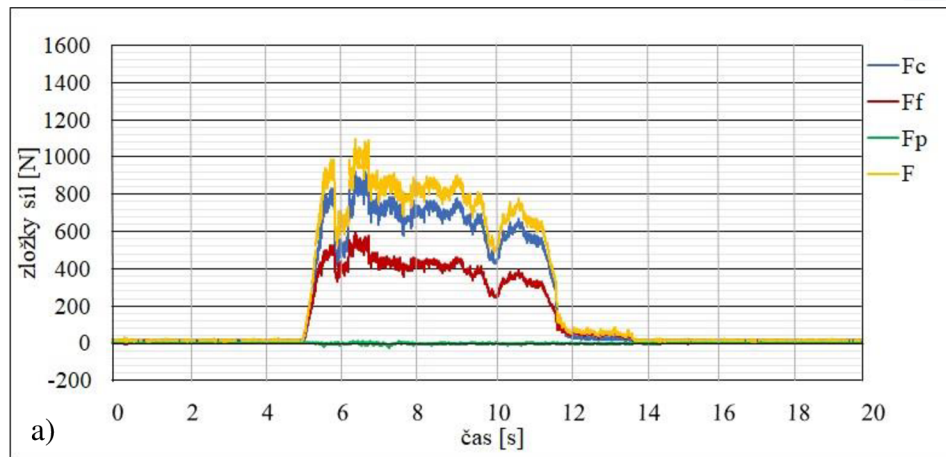
Vygenerované výsledky softwarom DynoWare celkovo reprezentujú až dvadsať meraní silového zaťaženia rezného nástroja. Každé z meraní prebehlo za individuálnych špecifických okolností, a síce pred každým meraním boli upravené parametre na sústruhu na základe vopred zvolených rezných podmienok z podkapitoly 4.1.4. Po prvom meraní postupne prebehli všetky ostatné, pričom výsledkom boli textové súbory obsahujúce dáta o zaťažení. Dáta boli po komplexnom spracovaní vyhodnotené do závislostí silového pôsobenia na čase obrábania $t_p = 20$ s, všetky vyobrazené na Obr. 4.4 až Obr. 4.8.

Grafy sú usporiadané podľa spoločnej reznej rýchlosti a ďalej podľa posuvu nástroja na otáčku f . V prípade, že si odmyslíme nábehové a výbehové časy nástroja, ktoré sa prejavujú hodnotami blížiacimi sa nule, je z nich okamžite patrná priamoúmerná závislosť veľkosti silového zaťaženia nástroja na veľkosti reznej rýchlosti. Ďalej tiež pri zvyšujúcej sa reznej rýchlosti môžeme pozorovať značné skrátenie aktívnych rezných časov nástroja v zábere. Hodnoty klesli z takmer 13 s iba na hodnotu necelých 2 s, pričom však patrične narástlo nie úplne žiadané zaťaženie nástroja. Aj analýzam takéhoto druhu je venovaná práve celá nasledujúca podkapitola 4.4 spolu s grafovým vyhodnotením merania.



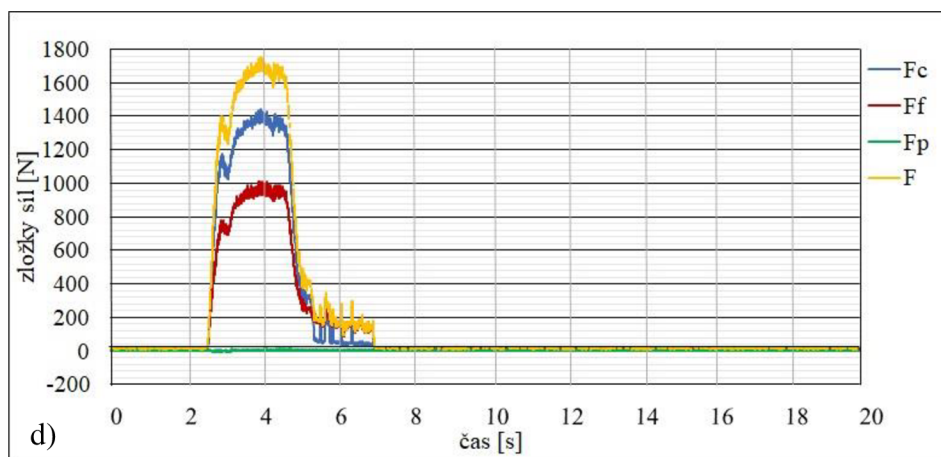
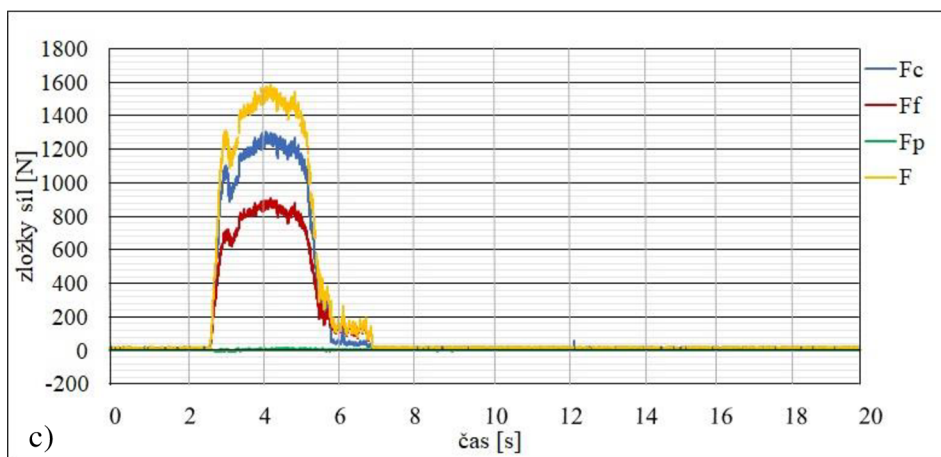
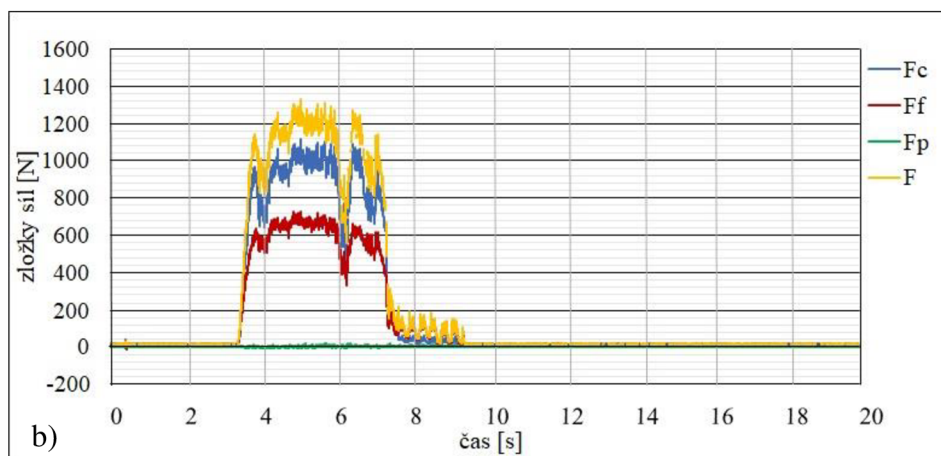
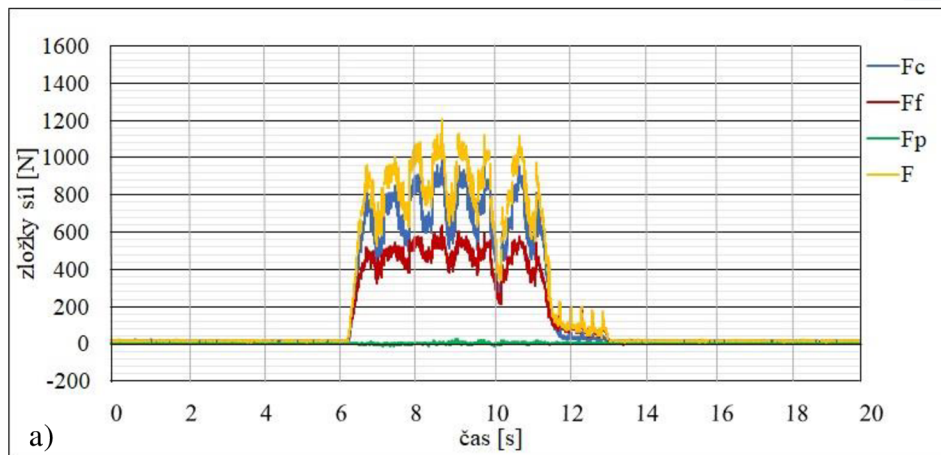
Obr. 4.4 Priebeh silových zložiek $v_c = 15 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

- a) $f = 10 \text{ mm}$
- b) $f = 15 \text{ mm}$
- c) $f = 20 \text{ mm}$
- d) $f = 25 \text{ mm}$



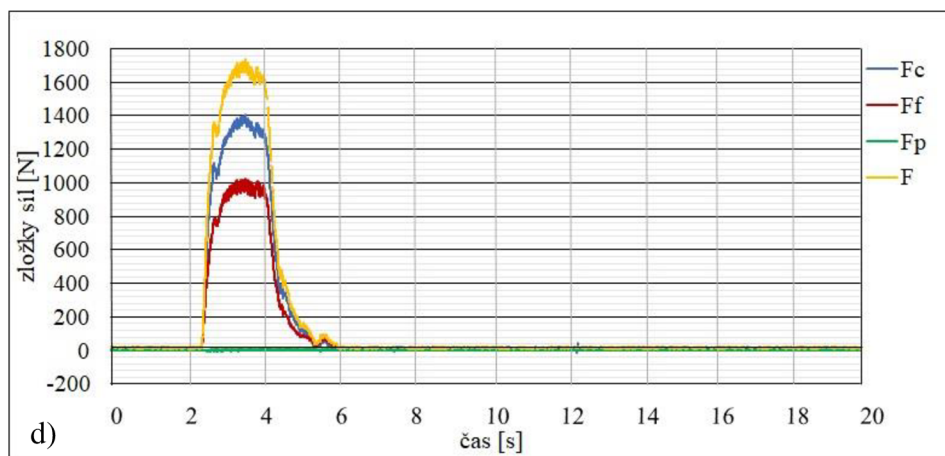
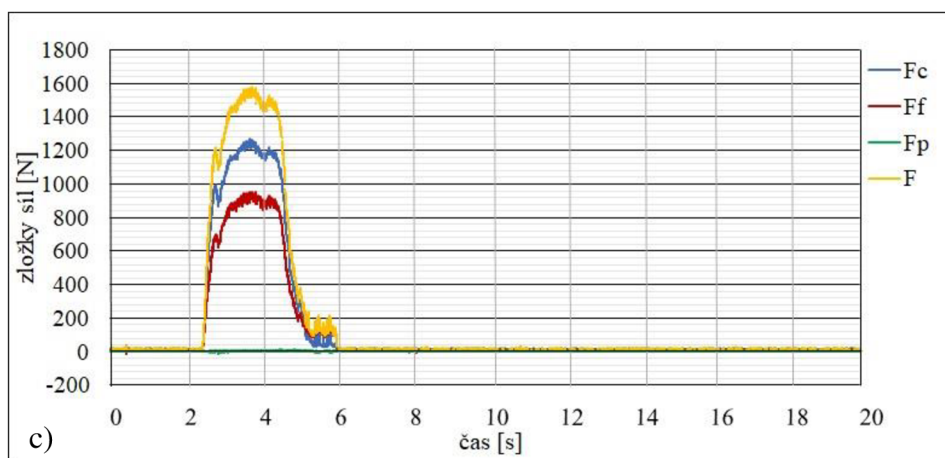
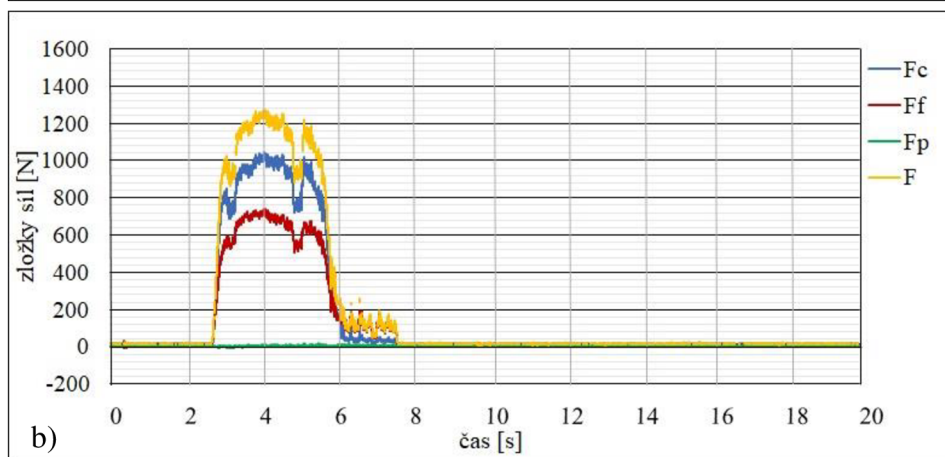
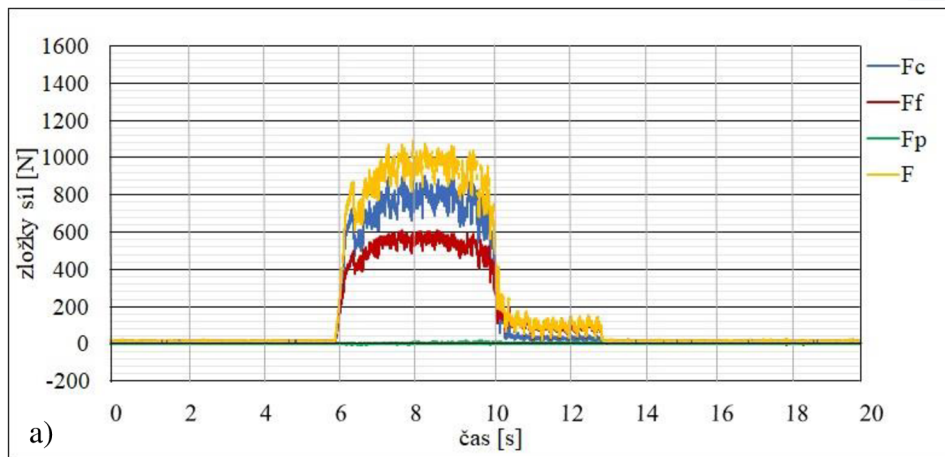
Obr. 4.5 Priebeh silových zložiek $v_c = 20 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$

- a) $f = 10 \text{ mm}$
- b) $f = 15 \text{ mm}$
- c) $f = 20 \text{ mm}$
- d) $f = 25 \text{ mm}$



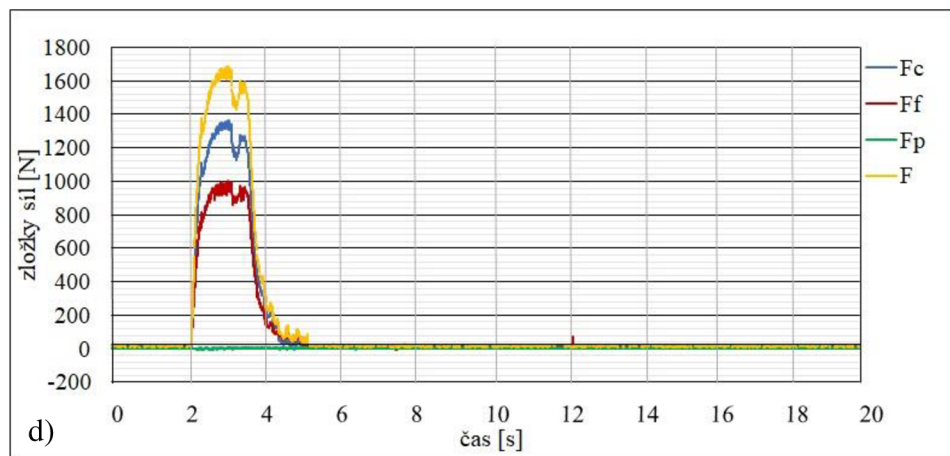
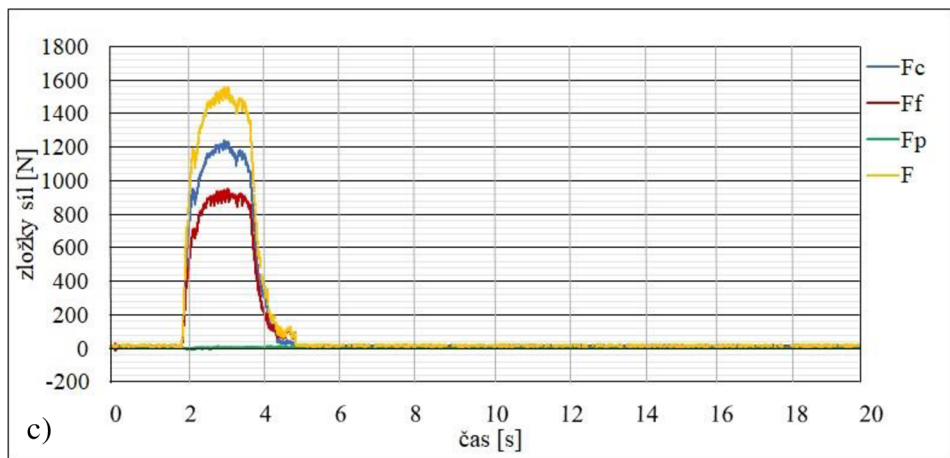
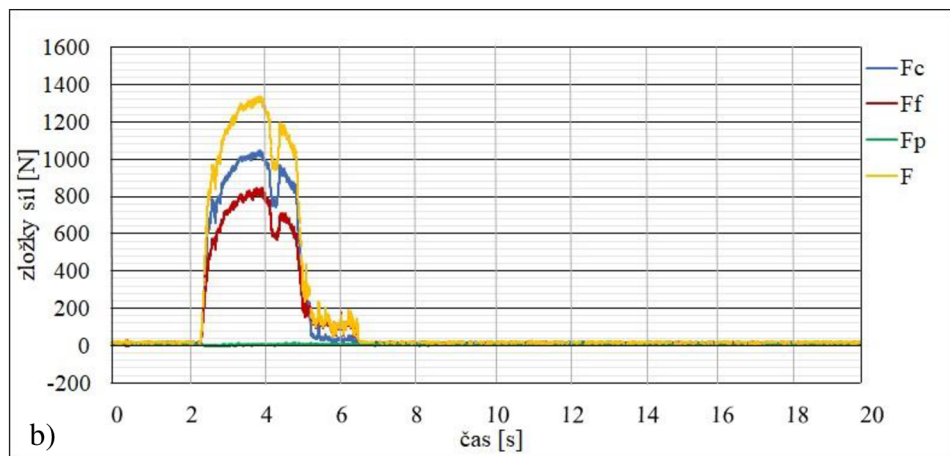
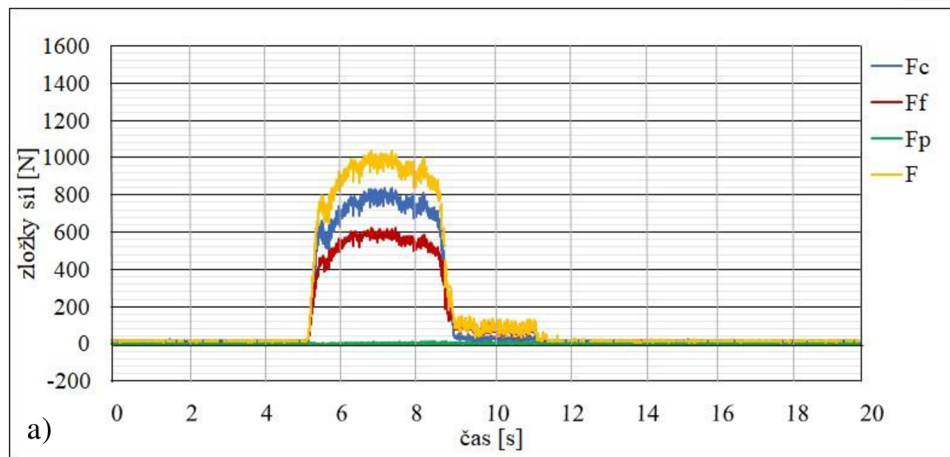
Obr. 4.6 Priebek silových zložiek $v_c = 25 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$

- a) $f = 10 \text{ mm}$
- b) $f = 15 \text{ mm}$
- c) $f = 20 \text{ mm}$
- d) $f = 25 \text{ mm}$



Obr. 4.7 Priebch silových zložiek $v_c = 30 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$

- a) $f = 10 \text{ mm}$
- b) $f = 15 \text{ mm}$
- c) $f = 20 \text{ mm}$
- d) $f = 25 \text{ mm}$



Obr. 4.8 Priebek silových zložiek $v_c = 35 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$

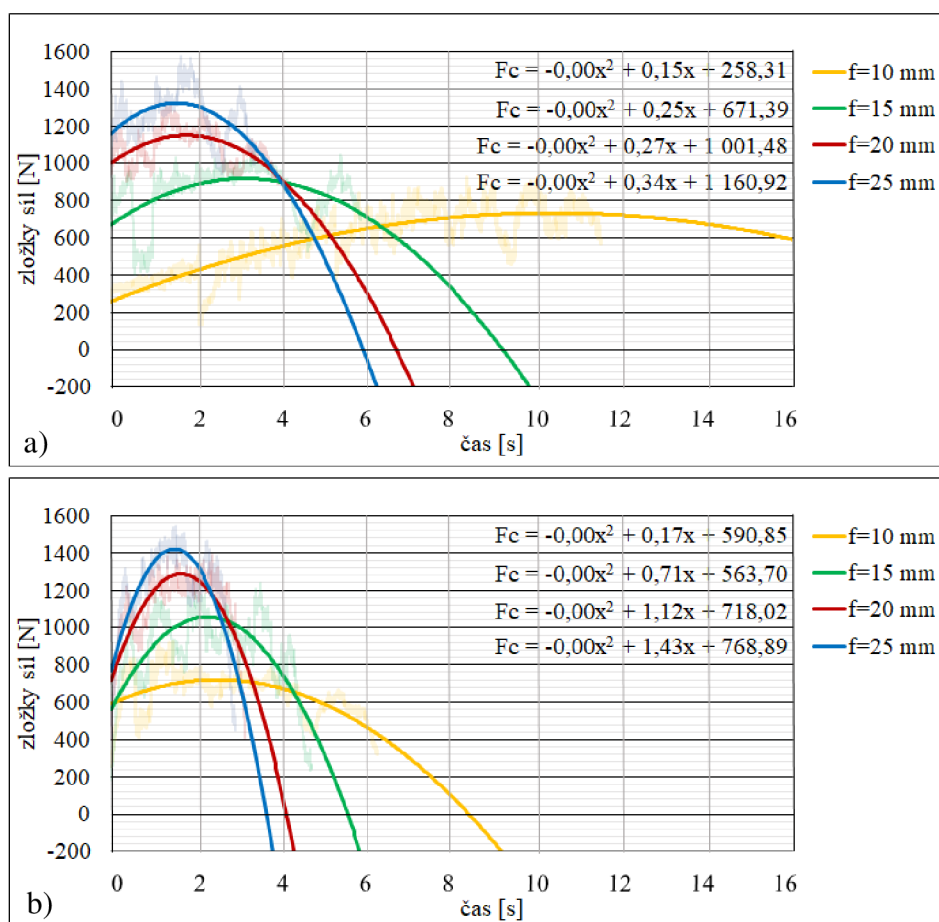
- a) $f = 10 \text{ mm}$
- b) $f = 15 \text{ mm}$
- c) $f = 20 \text{ mm}$
- d) $f = 25 \text{ mm}$

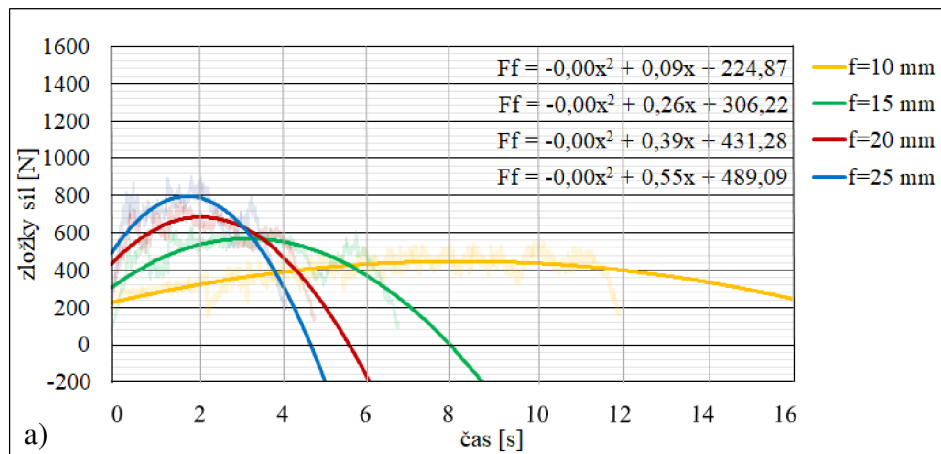
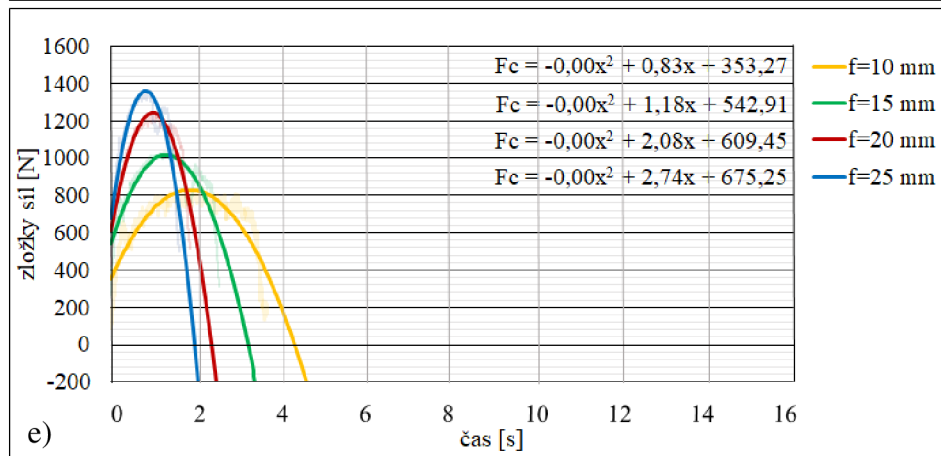
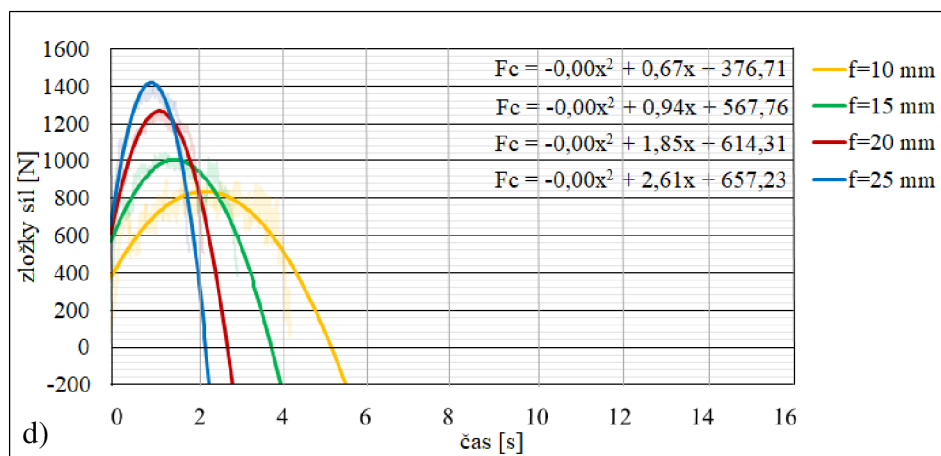
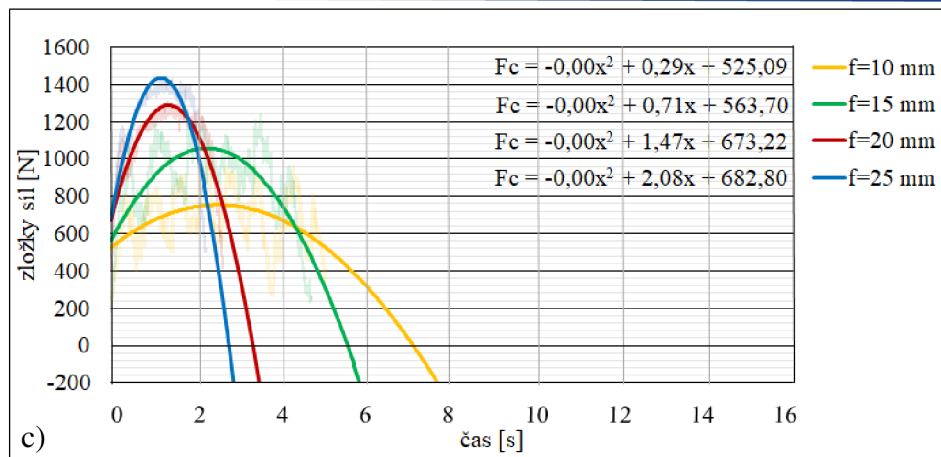
4.4 Analýza merania

Meranie a zber dát zabezpečili ideálne predpoklady k ich následnému dôkladnému štatistickému spracovaniu. Spoločné dáta využité aj pri tvorbe závislostí z podkapitoly 4.3 boli rozanalyzované za pomoci softwaru Microsoft Excel, pomocou ktorého boli následne vykreslené do grafov.

V procese analýzy boli všetky dáta upravené tak, aby bolo možné použiť na vykreslenie grafov iba hodnoty namerané pri vlastnom procese zapichovania bez nepotrebných a nič nepopisujúcich údajov zhromaždených počas nábehu a výbehu nástroja z materiálu obrobku. Pre analýzu boli z nameraných hodnôt vyčlenené a ďalej nespracovávané dáta reprezentujúce pasívnu reznú silu F_p , z dôvodu patrného už z výsledkov merania. Všetky jej namerané hodnoty sú veľmi podobné nule, z čoho je možné usúdiť, že na nástroj počas procesu zapichovania v danom axiálnom smere vretena, nepôsobia žiadne sily. Nízke hodnoty môžu predstavovať malé výchylky vznikajúce pri trení vedľajšieho chrbta nástroja po materiály, poprípade za následok ich môžu mať aj vibrácie stroja, či jeho nízka tuhosť.

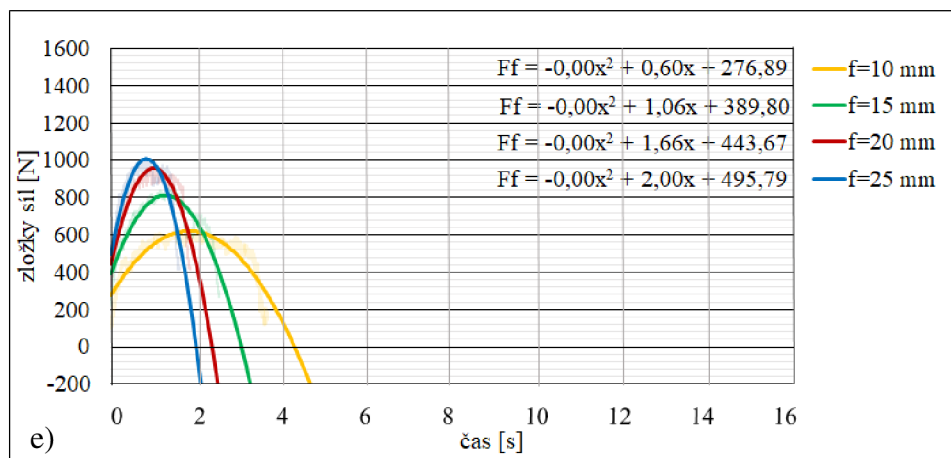
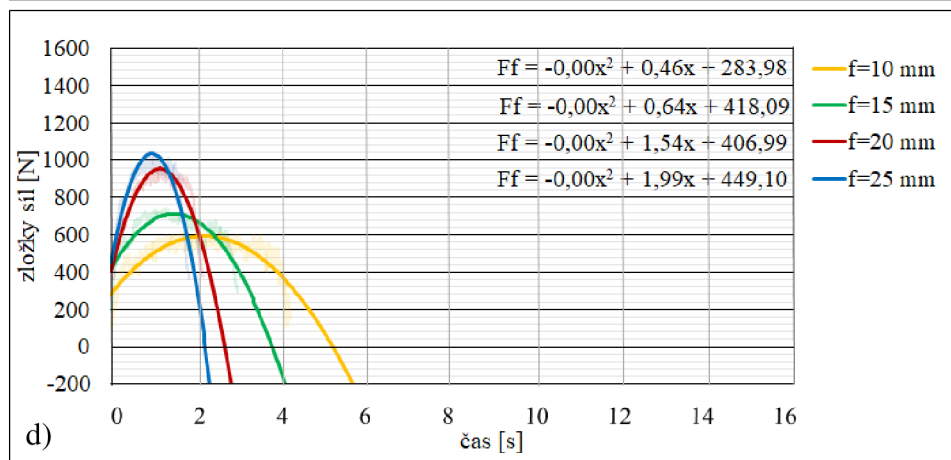
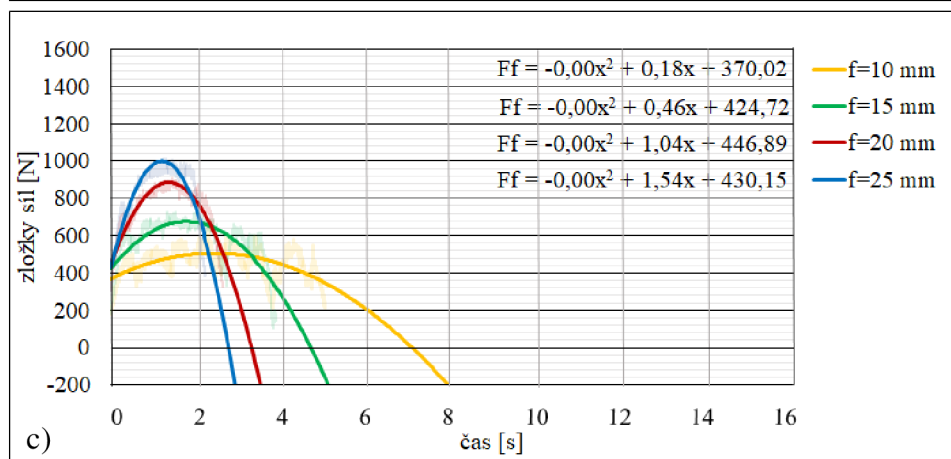
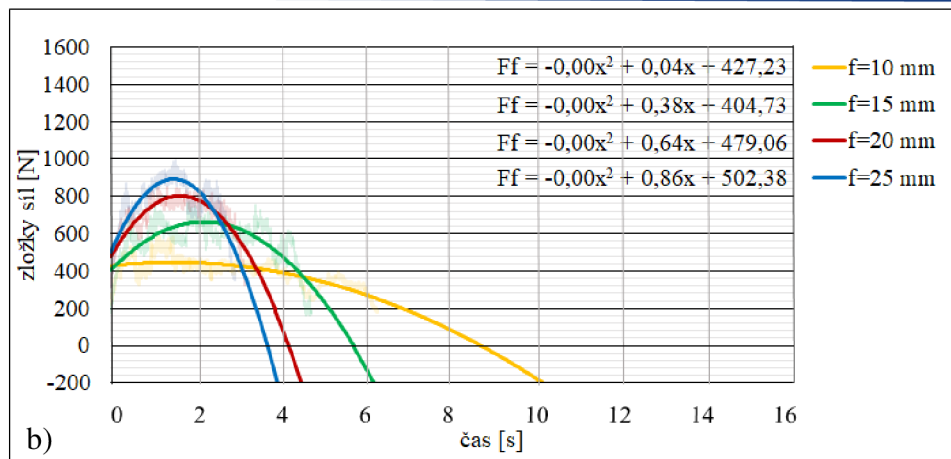
Následne boli dáta rozdelené a ďalej spoločne spracovávané vzhľadom k príslušnej reznej silovej zložke F_c alebo F_f . Dáta s príslušnou reznou silou v_c boli usporiadané do spoločného grafu pre všetky hodnoty posuvu na otáčku f , prislúchajúce do danej reznej rýchlosti, vid'. Obr. 4.9 a Obr. 4.10. Takto spracované závislosti boli preložené trendovou spojnicou druhého polynomického rádu, matematicky popisujúcou závislosť silového zaťaženia v čase. Pre preložené krivky boli následne vygenerované rovnice síl F_c a F_f , na základe ktorých je jednoduchšie pomenovať vplyv rezných podmienok na silové zaťaženie nástroja.





Obr. 4.9
Pribeh trendov
zložiek síl F_c

- a) $v_c=15 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$
- b) $v_c=20 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$
- c) $v_c=25 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$
- d) $v_c=30 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$
- e) $v_c=35 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$



Obr. 4.10
Priebeh trendov
zložiek síl F_f

- a) $v_c=15 \text{ m.min}^{-1}$
- b) $v_c=20 \text{ m.min}^{-1}$
- c) $v_c=25 \text{ m.min}^{-1}$
- d) $v_c=30 \text{ m.min}^{-1}$
- e) $v_c=35 \text{ m.min}^{-1}$

Rovnaké vyfiltrované dáta, ktoré boli použité pre vytvorenie silových závislostí na Obr. 4.9 a Obr. 4.10, boli použité aj pre určenie nasledujúcich hodnôt v Tab. 4.6 a Tab. 4.7. Všetky priemerné, maximálne, minimálne hodnoty aj smerodajná odchýlka boli určené z množstva dát za pomoci výpočtov v software Excel. Prvá tabuľka vyobrazuje hodnoty popisujúce rezné silové zaťaženie F_c , pričom v druhej sú uvedené hodnoty silového zaťaženia posuvovej sily F_f .

Tab. 4.6 Vybrané hodnoty zložiek síl F_c [N]

v_c [m.min ⁻¹]	Popis	f [mm]			
		10	15	20	25
15	Stredná hodnota	580,67	780,88	1001,68	1146,07
	Maximálna hodnota	922,85	1060,79	1330,26	1577,45
	Minimálna hodnota	119,93	187,65	233,77	300,29
	Smerodajná odchýlka	170,20	223,04	221,55	277,24
20	Stredná hodnota	645,00	875,86	1114,60	1210,67
	Maximálna hodnota	926,82	1238,10	1391,91	1541,75
	Minimálna hodnota	256,96	183,11	400,09	402,53
	Smerodajná odchýlka	116,81	212,17	188,10	224,88
25	Stredná hodnota	677,58	853,73	1097,36	1205,56
	Maximálna hodnota	1025,09	1113,59	1306,15	1440,73
	Minimálna hodnota	213,01	119,32	399,78	401,00
	Smerodajná odchýlka	156,15	199,70	192,15	230,72
30	Stredná hodnota	695,22	862,58	1070,30	1173,99
	Maximálna hodnota	918,88	1044,62	1269,53	1408,39
	Minimálna hodnota	97,04	205,99	348,82	423,89
	Smerodajná odchýlka	157,89	153,56	192,42	232,71
35	Stredná hodnota	675,00	867,27	1052,85	1136,60
	Maximálna hodnota	837,71	1049,50	1237,79	1361,39
	Minimálna hodnota	87,59	268,86	420,53	400,70
	Smerodajná odchýlka	159,60	156,76	183,10	217,91

Tab. 4.7 Vybrané hodnoty zložiek síl F_f [N]

v_c [m.min ⁻¹]	Popis	f [mm]			
		10	15	20	25
15	Stredná hodnota	391,71	472,20	572,57	654,61
	Maximálna hodnota	549,93	633,09	780,03	905,00
	Minimálna hodnota	153,20	109,39	133,21	188,60
	Smerodajná odchýlka	77,36	113,51	124,27	157,60
20	Stredná hodnota	395,33	560,84	701,59	764,18
	Maximálna hodnota	597,23	769,20	851,75	995,18
	Minimálna hodnota	180,36	160,68	309,45	310,52
	Smerodajná odchýlka	74,07	117,54	102,71	133,43
25	Stredná hodnota	456,82	574,63	750,04	832,32
	Maximálna hodnota	637,51	730,44	911,56	1011,66
	Minimálna hodnota	177,77	104,22	305,33	304,26
	Smerodajná odchýlka	81,66	120,24	131,29	166,85
30	Stredná hodnota	497,18	614,17	792,06	850,18
	Maximálna hodnota	612,03	740,81	950,17	1024,63
	Minimálna hodnota	105,72	182,50	263,21	315,86
	Smerodajná odchýlka	100,61	105,09	158,45	176,83
35	Stredná hodnota	506,22	671,65	808,41	846,02
	Maximálna hodnota	625,00	847,78	951,08	1002,96
	Minimálna hodnota	100,56	220,34	323,33	303,96
	Smerodajná odchýlka	114,88	136,01	148,44	159,48

Tab. 4.8 Vybrané hodnoty výsledných síl F [N]

v_c [m.min ⁻¹]	Popis	f [mm]			
		10	15	20	25
15	Středná hodnota	708,97	948,18	1192,68	1388,74
	Maximální hodnota	1067,69	1226,85	1542,09	1818,63
	Minimální hodnota	203,52	328,68	484,44	542,36
	Smerodajná odchýlka	174,54	195,03	196,88	223,98
20	Středná hodnota	750,76	1085,45	1304,80	1425,83
	Maximální hodnota	1097,49	1437,31	1615,61	1821,54
	Minimální hodnota	275,17	495,43	428,57	482,07
	Smerodajná odchýlka	141,97	170,67	228,11	265,12
25	Středná hodnota	809,96	1057,52	1325,76	1433,53
	Maximální hodnota	1205,87	1331,79	1584,81	1752,25
	Minimální hodnota	195,80	389,68	450,48	436,47
	Smerodajná odchýlka	180,31	179,50	231,29	310,68
30	Středná hodnota	865,61	1069,99	1341,66	1456,53
	Maximální hodnota	1092,42	1274,70	1580,43	1741,68
	Minimální hodnota	178,95	491,12	582,55	655,85
	Smerodajná odchýlka	164,28	165,07	233,05	277,87
35	Středná hodnota	865,61	1078,35	1316,67	1431,06
	Maximální hodnota	1040,92	1340,13	1555,50	1690,97
	Minimální hodnota	256,01	234,41	536,84	654,85
	Smerodajná odchýlka	141,01	238,54	247,47	245,79

4.5 Vyhodnotenie merania

Na základe vykreslených závislostí v grafoch z Obr. 4.9 a Obr. 4.10, tak ako aj z určených hodnôt v Tab. 4.6 a Tab. 4.7, je možné určiť za akých rezných podmienok budú hodnoty reznej a posuvovej sily nadobúdať maximálne a minimálne hodnoty. Rezná sila F_c a jej maximálna hodnota 1577,45 N je dosiahnutá pri najnižšej testovanej reznej rýchlosti $v_c = 15 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ a najväčšej možnej hodnote posuvu $f = 25 \text{ mm}$. Naopak najnižšia hodnota 87,59 N bola dosiahnutá za maximálnej reznej rýchlosti a minimálnej hodnoty posuvu. Pri zaťažení posuvovou silou F_f bola maximálna nameraná sila 1024,63 N taktiež dosiahnutá pri maximálnej hodnote posuvu, avšak pri reznej rýchlosti výrazne vyššej a to $v_c = 30 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$. Minimálna hodnota 100,56 N je nameraná za rovnakých rezných podmienok ako rezná sila.

Za pomoci aritmetického priemeru boli určené aj stredné hodnoty síl v jednotlivých meraniach. Pre zložky reznej sily F_c za daných rezných podmienok sa namerané stredné hodnoty pohybujú v rozmedzí od 580,67 N do 1210,67 N. Hodnoty posuvovej sily F_f sa pohybujú rádovo o 30 až 35% v nižších hodnotách ako stredné hodnoty rezných síl. Ich hodnoty sa pritom pohybujú v rozmedzí od 391,71 N do 850,18 N. Z dôvodu nižších hodnôt veľkosti posuvových síl, je preto z grafov patrná jej menšia tendencia nárastu F_f v súvislosti so zmenou posuvu f . Toto zistenie vypovedá o výrazne nižšom zaťažení chrbtovej reznej plochy nástroja v porovnaní s jeho čelom.

Porovnaním priebehov silových zaťažení zložiek síl vyobrazených v grafoch, je možné usudzovať a pomenovať z vybraných rezných podmienok tie, ktoré sú optimálne pre daný obrábaný materiál a použitý rezný nástroj. Z hľadiska optimalizácie rezného procesu a časovej úspory sa javia byť ideálnymi najvyššie hodnoty rezných podmienok, a teda $v_c = 35 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ a $f = 25 \text{ mm}$. Pri týchto rezných parametroch je však výrazne vysoké rezné zaťaženie nástroja, ktoré spolu s vyššou reznou rýchlosťou zvyšuje celkové množstvo vzniknutého tepla a prehrieva tak nástroj, obrobok a vznikajúcu triesku. Z tohto hľadiska je optimálne použitie hodnôt rezných parametrov niečo nižších, a síce $v_c = 30 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ a $f = 20 \text{ mm}$.

Vysoká rezná rýchlosť má za následok nízku lámavosť triesky pričom sa tvorí dlhá trieska. Naopak pri nízkych hodnotách je trieska príliš malá a neforemná. Dochádza tak k jej hromadeniu v mieste obrábania a znižovaniu kvality obrábaného povrchu. Pre zvolené rezné parametre sú preto z hľadiska tvorby ideálnej triesky optimálna rezná rýchlosť o hodnote $v_c = 30 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ a posuv s použitou veľkosťou $f = 20 \text{ mm}$.

5 ZÁVERY

Táto diplomová práca je zameraná na sústružnícke procesy upichovania a zapichovania a v praktickej časti analyzuje zložky silového zaťaženia testovaného rezného nástroja. Sústreďí sa na ciele práce, pričom podrobne pomenúva dôležité aspekty rezného procesu upichovania a zapichovania. Teoreticky vysvetľuje rezné podmienky pri sústružení, popisuje geometriu a tvar britu nástroja a vystihuje súčasné trendy v materiáloch rezných častí nástrojov. Ďalej sa zaoberá a analyzuje problematiku zložiek síl silového zaťaženia nástroja. V návrhu rezných skúšok je zvolený nástroj rady LFMX od firmy Dormer Pramet, ktorý bol testovaný za rôznych rezných parametrov počas celého experimentu. Namerané dáta boli následne analyzované a vyhodnotené v grafoch závislostí reznej sily na čase rezného procesu. Ukončením analýzy a zosumarizovaním výsledkov boli zistené nasledujúce závery a skutočnosti:

- z hľadiska veľmi malých hodnôt, blížiacich sa nule, boli hneď v prvopočiatku z analýzy vyňaté hodnoty pasívnej reznej sily a ďalej už v žiadnych grafoch či výpočtoch neboli zohľadňované,
- na základe stredných hodnôt reznej sily F_c a posuvovej sily F_f bol vyvodený 30 až 35% rozdiel v ich stredných hodnotách, kde nižšie hodnoty pochopiteľne nadobúdala práve posuvová sila,
- výsledná sila zaťaženia nástroja je aj z tohto dôvodu potom maximálne závislá na hodnote reznej zložky sily, pričom až 85% jej veľkosti tvorí práve zložka sily F_c , taktiež graf výslednej sily veľmi presne kopíruje trajektóriu spomínanej reznej zložky sily,
- porovnaním priebehov zložiek silového zaťaženia z hľadiska optimalizácie je obrábanie najefektívnejšie pri rezných parametroch $v_c = 35 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ a $f = 25 \text{ mm}$; vysoký posuv a rezná rýchlosť zabezpečujú krátky obrábací čas, avšak silové zaťaženie pôsobiace na brit nástroja v takejto situácii výrazne narastá, z tohto dôvodu je potrebné zvážiť do akej miery silové zaťaženie ovplyvní a skrúti životnosť nástroja,
- vysoké rezné rýchlosti v kombinácii s vysokým posuvom na základe literatúry nie sú ideálne z hľadiska tvorby optimálnej triesky, preto je odporúčané ako optimálne rezné parametre pre testovaný nástroj použiť hodnoty $v_c = 30 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ a $f = 20 \text{ mm}$.

ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

- [1] POKORNÝ, Václav. *Soustružnictví v kostce: zákl. příručka pro soustružníky i k polytechnické výchově*. 1. vyd. Praha: Práce, 1964. Technický výběr do kapsy.
- [2] KMEC, Ján a Karol VASILKO. *Delenie materiálu*. 1. vyd. Prešov: Datapress, 2003. ISBN 80-7099-703-9.
- [3] SANDVIK COROMANT AB, . *Příručka obrábění: kniha pro praktiky*. 1. vyd. Praha: Scientia, 1997. ISBN 91-972-2994-6.
- [4] KARAFIÁTOVÁ, Stanislava a Ivo LANGER. *Technologie soustružení*. 1. vyd. Havlíčkův Brod: Fragment, 1998. Učebnice pro odborné školy (Fragment). ISBN 80-720-0239-2.
- [5] HUMÁR, Anton. *Technologie I: Technologie obrábění – 1. část* [online]. In: . Brno: VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2003 [cit. 2017-04-05]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf
- [6] SANDVIK COROMANT AB, . *Soustružnická příručka Sandvic Coromant* [online]. ČR, 2018 [cit. 2020-05-22]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/downloads/pages/default.aspx#>
- [7] KOČMAN, Karel a Jaroslav PROKOP. *Technologie obrábění*. 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005. ISBN 80-214-3068-0.
- [8] SKOPEČEK, Tomáš. Vliv vybraných parametrů procesu na řezné síly při HSC. *MM PRŮMYSLOVÉ SPETRUM* [online]. 2002 [cit. 2020-05-22]. Dostupné z: <http://www.cnckonstrukce.cz/clanek-118/vliv-vybranych-parametru-procesu-na-rezne-sily-pri-hsc.html>
- [9] FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-2374-9.
- [10] PRAMET TOOLS, s.r.o. *Příručka obrábění Pramet* [online]. ČR, 2004 [cit. 2020-05-22]. Dostupné z: http://stachura.cz/novy/data/prirucka_obrabeni_pramet.pdf
- [11] *ELUC: Strojrenství* [online]. b.r. [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/ucebnice/23/lekce>
- [12] HUMÁR, Anton. *Materiály pro řezné nástroje*. 1. vyd. Praha: MM Publishing, 2008. ISBN 978-80-254-2250-2.
- [13] GARRISON, W.M. Steels: Classifications. *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*. Elsevier, 2001, , 8840-8843. DOI: 10.1016/B0-08-043152-6/01587-4. ISBN 9780080431529. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B0080431526015874>
- [14] BOBZIN, Kirsten. High-performance coatings for cutting tools. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2017, **18**, 1-9. DOI: 10.1016/j.cirpj.2016.11.004. ISSN 17555817. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1755581716300827>

-
- [15] DERFLINGER, V.H., A. SCHÜTZE a M. ANTE. Mechanical and structural properties of various alloyed TiAlN-based hard coatings. *Surface and Coatings Technology*. 2006, **200**(16-17), 4693-4700. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2005.02.065. ISSN 02578972. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0257897205002677>
- [16] *NTK Cutting Tools* [online]. b.r. [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: http://www.ntkcuttingtools.com/product/insert_ceramics_index.html
- [17] WANIGARATHNE, P.C., A.D. KARDEKAR, O.W. DILLON, G. POULACHON a I.S. JAWAHIR. Progressive tool-wear in machining with coated grooved tools and its correlation with cutting temperature. *Wear*. 2005, **259**(7-12), 1215-1224. DOI: 10.1016/j.wear.2005.01.046. ISSN 00431648. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0043164805000992>
- [18] *JKZ Bučovice a.s.* [online]. b.r. [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: <https://www.jkz.cz/cs/produkty/konstrukcni-oceli/>
- [19] *Ústav Strojirenské Technologie: Tvaření* [online]. b.r. [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/img/databaze/ocel_12050.3.pdf
- [20] *Dormer Pramet* [online]. b.r. [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: <https://www.dormerpramet.com/cs-cz/productssite/pages/turning.aspx>
- [21] *TumliKOVO* [online]. b.r. [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/download/>
- [22] *Portál Profesionálů Strojirenstvi.cz: Modely sústruhov TOS* [online]. 2016 [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: <https://forum.strojirenstvi.cz/viewtopic.php?t=19015>
- [23] *California Tool* [online]. b.r. [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: <https://www.caltoolgrind.com/coating-services>
- [24] *ISCAR LTD.* [online]. b.r. [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: <https://www.iscar.com/Products.aspx/CountryId/1/ProductId/5440>
- [25] *ISCAR LTD. Complete Machining Solutions - Groove Turn* [online]. 2019 [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: <https://www.iscar.com/Catalogs/flipview/nonrotating-tools-2019-groove-turn-tools/index.html>
- [26] *Kistler Eastern Europe* [online]. 2020 [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: <http://www.kistler.com/cz/en/products/Overview>.
- [27] *REPOZ s.r.o.* [online]. b.r. [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: <https://repoz.cz/soustruhy>
- [28] DE VOS, Patrick. Příručka pro technology - Opotřebení se nevyhneme!. In: *MM Spektrum* [online]. b.r. [cit. 2020-06-26].

ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK

Symbol	Popis	Jednotka
A_5	ťažnosť materiálu	[%]
A_D	prierez triesky	[mm ²]
a_p	šírka záberu ostria noža	[mm]
A_T	plocha prierezu jedného úberu nástroja	[mm ²]
b_D	šírka triesky	[mm]
C_{Fc}, C_{Ff}, C_{Fp}	materiálové konštanty	[-]
C_T	materiálová konštantá	[-]
D	priemer obrobku	[mm]
E	Modul pružnosti v ťahu	[GPa]
E_c	práca rezania	[J]
E_e	práca rezného procesu	[J]
E_f	práca posuvu	[J]
f	posuv nástroja na otáčku obrobku	[mm]
F	výsledná rezná sila	[N]
F_c	rezná sila	[N]
F_f	posuvová sila	[N]
F_p	pasívna sila	[N]
G	Modul pružnosti v šmyku	[GPa]
h_D	hrúbka triesky	[mm]
k_c	merná rezná sila	[MPa]
m	materiálový exponent	[-]
n	otáčky obrobku	[min ⁻¹]
P_c	rezný výkon	[kW]
Q	výkonnosť obrábania	[cm ³ . min ⁻¹]
Q_e	celkové množstvo vzniknutého tepla	[kJ]
r_ϵ	polomer zaoblenia špičky	[mm]
Ra_{max}	maximálnej hĺbky drsnosti povrchu	[μm]
R_m	Medza pevnosti	[MPa]
$Rp_{0,2}$	Medza klzu	[MPa]
T	trvanlivosť nástroja	[min]
t_p	čas rezného procesu	[min]
v_c	rezná rýchlosť	[m.min ⁻¹]
v_e	celková rezná rýchlosť	[m.min ⁻¹]
v_f	posuvová rýchlosť	[m.min ⁻¹]
X_{Fc}, X_{Ff}, X_{Fp}	exponenty vplyvu šírky záberu ostria a_p	[-]
Y_{Fc}, Y_{Ff}, Y_{Fp}	exponenty vplyvu posuvu f	[-]

Skratka	Popis	Jednotka
A_α	hlavný chrbát nástroja	[-]
$A_{\alpha'}$	vedľajší chrbát nástroja	[-]
A_γ	čelo nástroja	[-]
Al_2O_3	oxid hlinitý	[-]
CNC	Computer Numeric Control	[-]
CoO	oxid kobaltnatý	[-]
CVD	Chemical Vapour Deposition (chemické naparovanie)	[-]
FGM	funkčne gradientný materiál	[-]
MTCVD	Mean Temperature Chemical Vapour Deposition	[-]
NbC	karbid niobu	[-]
PVD	Physical Vapour Deposition (fyzické naparovanie)	[-]
RO	rýchlorezná oceľ	[-]
RK	rezná keramika	[-]
S	hlavné ostrie nástroja	[-]
S'	vedľajšie ostrie nástroja	[-]
SiO_2	oxid kremičitý	[-]
Si_3N_4	nitrid kremičitý	[-]
SK	spekaný karbid	[-]
TaC	karbid tantalu	[-]
TiAlN	nitrid hlinito-titaničitý	[-]
TiC	karbid titanu	[-]
TiCN	kyanid titánu	[-]
TiN	nitrid titanu	[-]
VBD	vymeniteľná britová doštička	[-]
WC	karbid volfrámu	[-]
ZrO_2	oxid zirkoničitý	[-]
α_o	nástrojový ortogonálny uhol chrbta	[°]
β_o	nástrojový ortogonálny uhol britu	[°]
γ_o	nástrojový ortogonálny uhol čela	[°]
ϵ_r	nástrojový uhol špičky	[°]
κ_r	nástrojový uhol nastavenia hlavného ostria	[°]
κ_r'	nástrojový uhol nastavenia vedľajšieho ostria	[°]
λ_s	nástrojový uhol sklonu hlavného ostria	[°]
π	Ludolfovo číslo	[-]
φ	uhol nastavenia hlavného ostria nástroja na smer pohybu	[°]