

Hodnocení efektivity chlazení při soustružení

Marek Opravil

Bakalářská práce

2024



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2023/2024

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Marek Opravil
Osobní číslo:	T210037
Studijní program:	B3909 Procesní inženýrství
Studijní obor:	Technologická zařízení
Forma studia:	Prezenční
Téma práce:	Hodnocení efektivity chlazení při soustružení

Zásady pro vypracování

- teoretická studie na dané téma
- příprava experimentu hodnotící funkci procesní kapaliny při soustružení
- měření výstupních parametrů, vyhodnocení a stanovení efektivity při soustružnických operacích

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

BENEDICTO, E.; CAROU, D.; RUBIO, E. M. Technical, economic and environmental review of the lubrication/cooling systems used in machining processes. *Procedia engineering*, 2017, 184: 99-116.

POHANISH, Richard P.; MCCAULEY, Christopher J. (ed.). *Machinery's Handbook Pocket Companion* (2 nd edition). Industrial Press Inc., 2020

BÍLEK, Ondřej a Imrich LUKOVICS. *Výrobní inženýrství a technologie*. Ve Zlíně: Univerzita Tomáše Bati, 2014, 173 s. ISBN 9788074544712.

MICHNA, Štefan, Jarmila TRPČEVSKÁ a Iva NOVÁ. *Strojírenská technologie*. Ústí nad Labem: Univerzita J.E. Purkyně v Ústí nad Labem, 2012, 337 s. ISBN 9788074145018.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Ondřej Bílek, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce: **2. dubna 2024**
Termín odevzdání bakalářské práce: **17. května 2024**

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D. v.r.
děkan

L.S.

doc. Ing. Martin Bednařík, Ph.D. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 6. května 2024

PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

- bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považuji se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně, dne:

Jméno a příjmení studenta:

Marek Opravil

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Bakalářská práce se věnuje hodnocení efektivity chlazení při soustružení. V teoretické části je obecný popis soustružení, způsoby chlazení při obrábění, vlastnosti a druhy kapalin. Dále jsou popsány jevy, které mohou při soustružení nastat. Praktická část se zabývá obráběním na CNC stroji, kontaktním měřením obrobené plochy, tvorbě třísky a opotřebení břitové destičky.

Klíčová slova: soustružení, chladící kapaliny, jakost povrchu, tvorba třísky.

ABSTRACT

The bachelor thesis is devoted to the evaluation of cooling efficiency in turning. In the theoretical part there is a general description of turning, methods of cooling during machining, properties and types of fluids. It also describes the phenomena that can occur during turning are described. The practical part deals with machining on a CNC machine, contact measurement of the machined surface, chip formation and insert wear.

Keywords: turning, coolants, surface finish, chip formation

Chtěl bych v první řadě poděkovat mému vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Ondřeji Bílkovi Ph.D. za cenné rady, trpělivost při konzultacích a vynaložený čas. Dále patří poděkování mé rodině, která mi byla oporou při psaní bakalářské práce.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD.....	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 TEORIE SOUSTRUŽENÍ.....	11
1.1 HISTORIE.....	11
1.2 DEFINICE SOUSTRUŽENÍ	11
1.3 DRUHY SOUSTRUŽNICKÝCH STROJŮ	12
1.3.1 Univerzální hrotový soustruh.....	13
1.3.2 Čelní soustruh.....	13
1.3.3 Karusel (vertikální soustruh).....	14
1.3.4 Revolverový soustruh (revolver).....	14
1.3.5 Ostatní soustruhy.....	14
1.4 NÁSTROJE	14
1.4.1 Vyměnitelné břitové destičky	14
1.4.2 Nástroje z rychlořezné oceli.....	15
1.4.3 Geometrie řezného klínu nástroje	15
1.5 MODERNÍ SOUSTRUŽENÍ – ČÍSLICOVĚ ŘÍZENÉ SOUSTRUHY	16
1.5.1 Výhody a nevýhody CNC strojů	17
2 ZÁKLADNÍ CHARAKTERISTIKY ŘEZNÝCH KAPALIN A CHLADICÍCH MEDIÍ	18
2.1 VLASTNOSTI A CHARAKTERISTIKY ŘEZNÝCH KAPALIN.....	18
2.2 ROZDĚLENÍ ŘEZNÝCH KAPALIN	21
2.2.1 Vodní roztoky.....	21
2.2.2 Emulzní kapaliny	21
2.2.3 Přímé oleje	21
2.2.4 Syntetické kapaliny	22
2.3 OSTATNÍ CHLADÍCÍ ZPŮSOBY.....	23
2.3.1 Stlačený vzduch	23
2.3.2 MQL – mikrolubrikace	23
2.3.3 Kryogenní chlazení	23
3 PŘÍVOD ŘEZNÝCH KAPALIN DO MÍSTA ŘEZU.....	24
3.1 PŘESNÝ PŘÍVOD.....	24
3.2 PŘÍVOD ZE SPODNÍ STRANY	24
3.3 VOLNÝ PŘÍVOD.....	24
3.4 VNITŘNÍ CHLAZENÍ.....	25
3.5 SPECIÁLNÍ SYSTÉMY PŘÍVODU	25
4 JEVY PŘI SOUSTRUŽENÍ.....	26
4.1 OPOTRĚBENÍ NÁSTROJE	26
4.1.1 Mechanismy opotřebení nástroje	26

4.1.2	Typy opotřebení nástroje.....	27
4.1.3	Měření opotřebení nástroje	32
4.2	JAKOST OBRÁBĚNÉHO MATERIÁLU	35
4.2.1	Jakost povrchu.....	35
4.2.2	Metody měření drsnosti.....	35
4.3	TVOŘENÍ TŘÍSKY	38
4.3.1	Objemový součinitel třísek	39
4.3.2	Příčný koeficient pěchované třísky	41
II	PRAKTICKÁ ČÁST.....	43
6	ZAŘÍZENÍ A MATERIÁLY POUŽITÉ PŘI MĚŘENÍ.....	44
6.1	CNC SOUSTRUH	44
6.2	BŘITOVÉ DESTIČKY	45
6.3	NŮŽ.....	45
6.4	PROFILOMETR	45
6.5	DIGITÁLNÍ POSUVNÉ MĚŘIDLO	46
6.6	OBRÁBĚNÝ VZOREK	46
6.7	CHLADÍCÍ KAPALINA	47
7	ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ.....	48
7.1	VÝSLEDKY BEZ CHLAZENÍ.....	49
7.2	VÝSLEDKY S CHLAZENÍM 10 BAR.....	50
7.3	VÝSLEDKY S CHLAZENÍM 20 BAR.....	51
7.4	VÝSLEDKY S CHLAZENÍM 30 BAR.....	52
7.5	VÝSLEDKY S CHLAZENÍM 40 BAR.....	53
7.6	VÝSLEDKY S CHLAZENÍM 50 BAR.....	54
7.7	VÝSLEDKY S CHLAZENÍM 60 BAR.....	55
7.8	VÝSLEDKY S CHLAZENÍM 70 BAR.....	56
8	DISKUZE VÝSLEDKŮ.....	57
8.1	DRSNOST POVRCHU V RA A RZ	57
8.2	TVAR A BARVA TŘÍSKY.....	59
8.3	OPOTŘEBENÍ VBD	60
	ZÁVĚR.....	61
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	62
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	66
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	68
	SEZNAM TABULEK.....	71

ÚVOD

Strojírenství je jedním z nejrozšířenějších odvětví spadající pod technický obor. Z velké většiny se díly vyrábí již pomocí číslicově řízených strojů, ale stále se lze setkat s klasickými stroji, na kterých se vyrábí většinou kusová výroba.

Hlavně z hlediska ekonomiky je v této době potřeba dosáhnout co nejefektivnějšího, nejkvalitnějšího a nejrychlejšího obrábění. Z toho důvodu, se vyhledávají ideální stroje, nástroje, materiály ale třeba i chladicí kapaliny, které splňují požadavky výroby, které si firma nastaví a pomáhají ji zvýšit efektivitu a zároveň ušetřit.

Chladicí medium je nedílnou součástí obrábění. Používá se skoro u každého způsobu třískového obrábění a jedním z jeho nejdůležitějších úkolů je odvod tepla z místa řezu. Vysoká teplota způsobuje opotřebení nástroje a také ovlivňuje kvalitu povrchu obráběného materiálu. Dalším důvodem použití kapaliny je odvod třísky z místa řezu. Při nedostatečném množství použité kapaliny by mohlo nastat hromadění třísky, kde poté hrozí namotání na obrobek a způsobení další škody na stroji.

V teoretické části bakalářské práci se věnuji stručnému popisu soustružení, základnímu rozdělení strojů, nástrojů a popisu moderního způsobu obrábění pomocí CNC strojů. Dále jsou zde podrobně popsány chladicí média, jejich vlastnosti a přívod. Závěrem teoretické části je rozsáhlá kapitola popisující jevy při soustružení.

V praktické části je zkoumána efektivita chlazení při soustružení. Zjišťuje se, zdali je výhodnější obrábění s chladicí kapalinou nebo bez ní, popř. jaký tlak je ideální při soustružení použít. Měření probíhalo pomocí přesných kontaktních měřících přístrojů. V závěrečné části, jsou výsledky zpracovány do tabulek a grafů, kde následně probíhá vyhodnocení a diskuze výsledků.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 TEORIE SOUSTRUŽENÍ

V této kapitole jsou popisovány principy soustružení, jeho historie s následným přechodem do současnosti. Uváděny jsou základní typy konvenčních soustruhů a nástroje, které se při soustružení používají. Následně jsou popsány principy současně nejpoužívanějšího CNC soustružení.

1.1 Historie

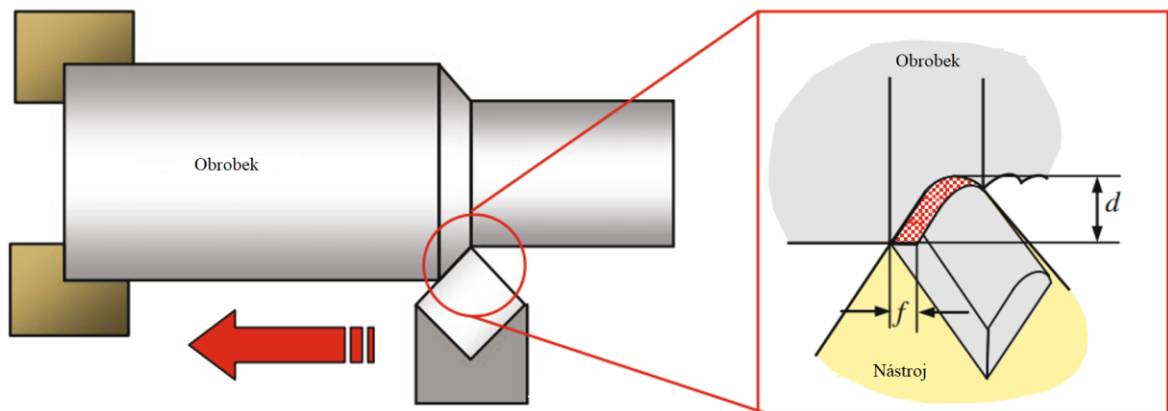
Soustruh je často považován za krále obráběcích strojů. Je možné na něm vyrábět velké spektrum strojních součástí, proto je brán jako jeden z nejuniverzálnějších strojů.

Henry Maudslay jako jeden z prvních, vyrobil před rokem 1800 šroubovací a kovoobráběcí soustruh (obr. 1), který opatřil odlitým kovovým ložem, vodícím šroubem a řazením pomocí ozubených kol. Tím bylo umožněno vyrábět vyměnitelné šroubové závity o různém stoupání, což následně způsobilo revoluci ve výrobě nejen obráběcích, ale i jiných strojů. V době, kdy byl stroj vyroben, byl poháněn lidskou silou nebo při větších výkonech pomocí vodní energie. Až po zdokonalení parních strojů, se začalo využívat motorů. [1]

1.2 Definice soustružení

Technologie soustružení, je jedna z nejrozšířenější v oboru obrábění. Ve strojírenství představuje až 30-40 % celkové pracnosti. V budoucnu lze předpokládat, že bude mírný pokles postavení této technologie zapříčiněno zásluhou přesných a dokončovacích metod tváření.

Soustružením se obrábí vnější a vnitřní plochy rotačních tvarů. Konkrétně se zde zahrnuje čelní obrábění, vyvrtávání, vrtání, drážkování, oddělování, řezání závitů a vroubkování. Hlavní pohyb vykonávající na soustruhu tvoří rotující obrobek, vedlejší poté vykonává nástroj (podélný posuv, rovnoběžný s osou otáčení obrobku a kolmý příčný posuv k ose obrobku). Pomocí podélného posuvu lze vytvořit válcovou plochu, naopak příčným posuvem se vyrobí plocha čelní (rovinná). Koná-li nástroj oba posuvy současně, vzniká tak obecná rotační plocha. [2,3,7]



Obrázek 1 Proces soustružení [7]

Na obrázku 1 je znázorněn typický proces soustružení, při kterém je nástroj veden v ose obrobku rychlostí posuvu f v hloubce řezu A_p . Když nástroj odebrá materiál o průměru D , je řezná rychlost v_c spojena s otáčkami vřetena n jako:

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

1.3 Druhy soustružnických strojů

Soustruhy jsou řazeny v odstupňované řadě velikostí, v závislosti na velikosti a druhu obráběného materiálu. Základní soustruhy lze rozdělit na:

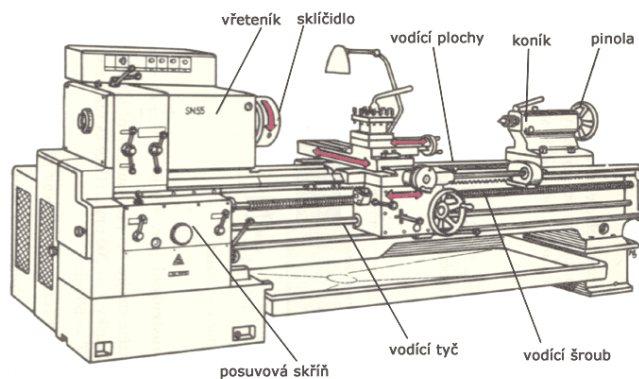
- a) hrotové soustruhy
- b) lícni a svislé soustruhy
- c) speciální soustruhy.

Podle stupně automatizace lze dělit na:

- a) soustruhy obyčejné
- b) revolverové soustruhy
- c) poloautomatické soustruhy
- d) automatické soustruhy. [2]

1.3.1 Univerzální hrotový soustruh

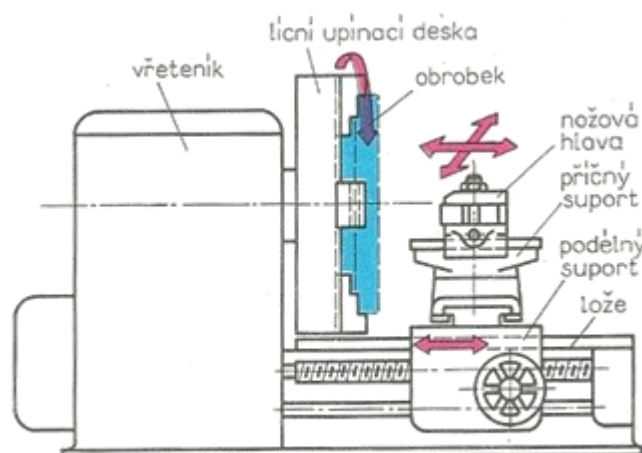
Hrotový soustruh, je nejběžněji používaným soustruhem v praxi. Na stroji je možno nastavit velkého rozsahu otáček. Lze na něm vyrábět výrobky se závitů (jelikož je vybaven vodícím šroubem), vrtat, upichovat atd. Obrobek se zde otáčí kolem vodorovné osy. Mezi hlavní části hrotového soustruhu patří vodorovné lože, vřeteník s převodovou skříní, hlavní suport a koník s pinolou. (obr.2). [3]



Obrázek 2 Univerzální hrotový soustruh [5]

1.3.2 Čelní soustruh

Čelní soustruh je určen pro obrábění lehkých obrobků o velkém průměru a malé výšce (např. setrvačníky, příruby). Obrobek se zde upevňuje na lícní desku, na které se každá čelist pohybuje zvlášť. Jelikož je upínání obrobku obtížné, je proto soustruh málo využíván. Nahrazuje se tedy karuselem neboli vertikálním soustruhem. [2,3]



Obrázek 3 Čelní soustruh [6]

1.3.3 Karusel (vertikální soustruh)

Karusel má svislou osu otáčení a jeho upínací deska ve tvaru kotouče je otočena taktéž kolem svislé osy.

Upínání těžkých součástí je na vertikálním soustruhu snadné a upínají se zde zpravidla obrobky větších průměrů a menší délky. Pohyb nástroje představuje suport, který také určuje maximální výšku obrobku. Vertikální soustruhy mají mechanismy pro plynulou regulaci otáček stolu, tudíž řezná rychlost je zde konstantní. [2,3]

1.3.4 Revolverový soustruh (revolver)

Revolverový soustruh je používán u hromadné výroby menších součástí. Kvůli možnosti upnutí více nástrojů najednou, se zde obrobek může obrobit na hotovo. V dnešní době bývají všechny pracovní operace řízeny programově. [2,3]

1.3.5 Ostatní soustruhy

V praxi se lze potkat s kopírovacími soustruhy, které jsou poloautomatické a vyrábějí součást pomocí kopírování předloženého modelu. Speciální soustruhy slouží především k jednoúčelovému obrábění speciálních obrobků (např. klikové hřídele). [3]

1.4 Nástroje

V moderním soustružení se používají tři hlavní typy soustružnických nástrojů: Nástroje z rychlořezné oceli (HSS), nože s pájenými břitovými destičkami ze slinutých karbidů a nástroje s vyměnitelnou břitovou destičkou (VBD). Všechny zmíněné mají na dílně své využití a u většiny prací se neupřednostňuje jeden typ před druhým.

Nástroje je nutné taky rozdělovat podle druhu prováděné operace. Jejich hlavní rozdělení je na vnější a vnitřní, pravé, levé či souměrné, uběrací a hladící, pozitivní a negativní (záleží na úhlu čela). [8]

1.4.1 Vyměnitelné břitové destičky

Nástroje s VBD, jsou nejběžněji používané nástroje v moderním soustružení. Je celá řada parametrů, podle kterých se břitové destičky volí. Nejběžnější parametry jsou správná geometrie, tvar (úhel špičky), velikost a poloměr zaoblení špičky břitové destičky. [12]

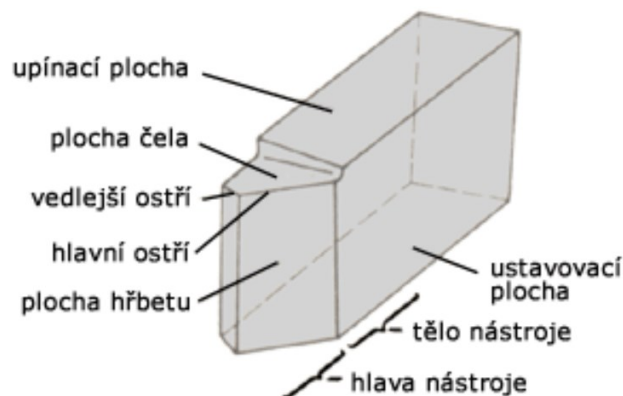
1.4.2 Nástroje z rychlořezné oceli

Nástroje z rychlořezné oceli, jsou často rozšířené ve výrobě na klasických strojích. Mají většinou přísady legujících prvků, které zapříčiňují jejich lepší řezné vlastnosti, a proto jsou slitinové.

Nástroje z této oceli, se označují také jako HSS (High Speed Steel) a mají velice dobré mechanické vlastnosti, jako např. pevnost, tvrdost apod.

1.4.3 Geometrie řezného klínu nástroje

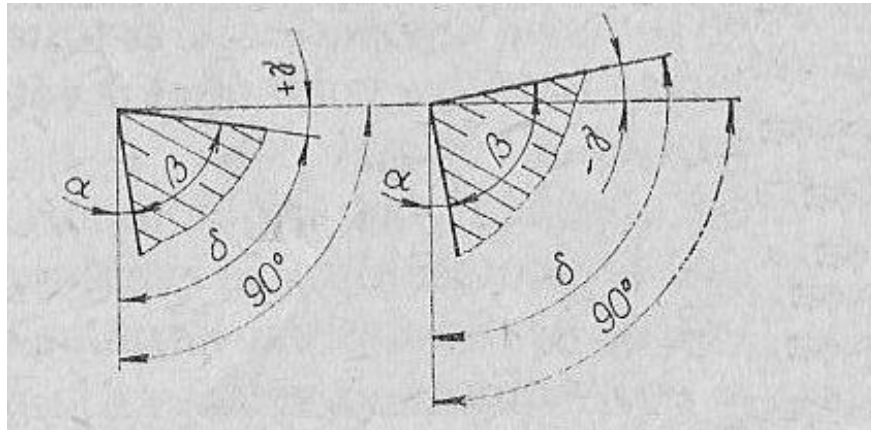
Řezný klín, je nejdůležitější část nástroje, jelikož vytváří při kontaktu s obrobkem třísku. Mění nám tak řezné vlastnosti a ovlivňuje konečný efekt výroby. Mezi hlavní části řezného klínu patří plocha hřbetu A_α , vedlejšího hřbetu A'_α , plocha čela A_λ , hlavní řezná hrana S a vedlejší řezná hrana S' (obr. 4)



Obrázek 4 Hlavní části řezného klínu [10]

Hlavní úhel hřbetu α , svírá hřbet nástroje s rovinou řezu. Obvykle se pohybuje mezi 10° až 30° , u nástrojů pro beztrískové dělení (např. stříhání, prostříhávání) je to poté 0° . Hlavní vliv úhlu, je na tření hřbetu nástroje na obráběnou plochu, kde se styková plocha postupně zvětšuje s otupením nástroje. To má za následek větší řezný odpor, tudíž vznik velkého tření a následné zahřívání nástroje. Úhel břitu β , svírá hlavní hřbet s čelem nože. Pohybuje se mezi 45° - 90° a má vliv na vnik do materiálu. Menší úhel se používá při měkkých materiálech, naopak u větších se volí úhel velký. Úhel čela γ , ovlivňuje povrch obrobené plochy a tvoření třísky. Nachází se mezi čelem nože a rovinou. Z pravidla platí, že čím je větší úhel, tím se tvoří lepší tříška a snadněji odchází. U měkkých materiálů se volí

úhel velký, naopak u materiálů pevných úhel až nulový. Úhel řezu δ , je mezi čelem nože a tečnou k řezné ploše obrobku. Velikost bývá většinou menší než 90° . [9]



Obrázek 5 Hlavní řezné úhly soustružnického nože [11]

1.5 Moderní soustružení – číslicově řízené soustruhy

V současné době se k obrábění používají nejčastěji číslicově řízené stroje CNC. Tyto stroje jsou řízeny pomocí programu, který je vytvořený v počítači nebo přímo na stroji. Stroje jsou tedy poloautomatické a při běhu je potřeba minimální obsluhy, tudíž jsou oproti konvekcím efektivnější a rychlejší. Jako představitele těchto strojů se používají především frézky a soustruhy.

Programovat stroj lze i pomocí počítačového softwaru s integrovanou podporou konstrukce. Znamená to, že pomocí 3D CAD systému se vymodeluje požadovaný výrobek, který se má na stroji obrábět. Následně se přesune do CAM programu, kde se vytvoří pomocí parametrů a funkcí výsledný program, který je vkládaný přímo do stroje a řídí se podle něho samostatná výroba. V současné době umí CAM modely řešit i sdružené technologie (soustružení a frézování zároveň), které jsou využívány na obráběcích centrech. [13]

1.5.1 Výhody a nevýhody CNC strojů

Při porovnání s konvenčními stroji lze říct, že CNC stroje mají řadu výhod a předností, ale naopak se sebou nesou i dílčí nevýhody. V porovnání níže jsou uvedeny výhody a nevýhody užívání číslicově řízených strojů.

Výhody:

- je navýšena kvalita výrobku,
- menší požadavky na kvalifikaci obsluhy,
- program lze jednoduše a rychle měnit,
- výroba přesných a složitých součástí,
- přesně určený výrobní čas, efektivnější plánování výroby,
- chyby způsobené lidským faktorem snižené na minimum (únava,...),
- skladování nástrojů přímo ve stroji, jednodušší výměna nástroje.

Nevýhody:

- vysoké pořizovací náklady a servis,
- kvalifikace pracovníků tvořících NC program,
- náročnější technologická příprava výroby. [13]

2 ZÁKLADNÍ CHARAKTERISTIKY ŘEZNÝCH KAPALIN A CHLADICÍCH MEDIÍ

Řezné kapaliny se obvykle používají při obrábění, jako je frézování, vrtání nebo soustružení. Předpokladem řezné kapaliny jsou výborné mazací a chladičí účinky. Kapaliny nám umožňují snížit tření, odvádět třísky z místa řezu, chladit obrobek i třísky a chránit ho před poškozením (např. koroze). V současné době se ve zpracovatelském průmyslu rozvíjí zájem o vysokou kvalitu výrobku, dále o nízkou cenu a rychlost výroby. Produktivita je vysoce závislá na velikosti řezné rychlosti, hloubce řezu a posuvu, což má za následek zvýšení teploty v řezné oblasti. Proto u výroby kvalitního výrobku je potřeba dobře stanovit účinnost řezných kapalin. [34]

Při určitých obráběcích procesech, lze taky použít obrábění bez použití řezné kapaliny (tzv. obrábění za sucha). Při obrábění za sucha je potřeba zajistit volbu nejvhodnějšího nástroje, jeho geometrie a správné nástrojové třídy určené k tomuto procesu. Převážný počet aplikací však vyžaduje použití řezné kapaliny, a to z důvodu rozměrových tolerancí, potřebné kvality, obrobeného povrchu nebo jeho obrobitelnosti. Řezná kapalina by měla být vybrána vhodně, s cílem maximalizování jejího skutečného výrobního potenciálu. [14]

2.1 Vlastnosti a charakteristiky řezných kapalin

Mezi základní vlastnosti řezné kapaliny zahrnujeme fyzikální a chemické vlastnosti, které nám zajišťují mazací, chladičí, čistící a ochranné účinky. Další důležité vlastnosti kapalin jsou také zdravotní nezávadnost, provozní stálost a přiměřené náklady.

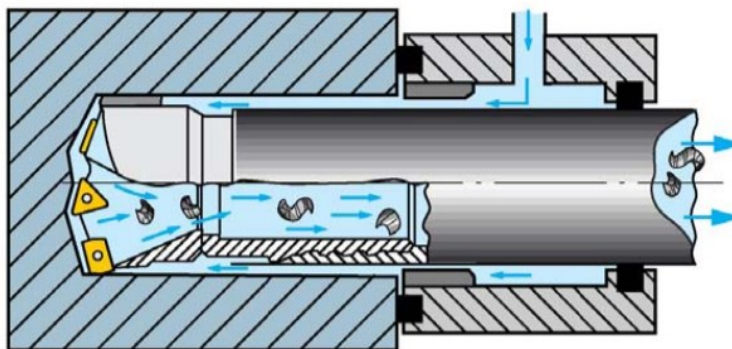
Mazací účinek – schopnost mazacího účinku vytváří na povrchu obráběného materiálu vrstvu, která má za úkol zabránit přímému styku kovových povrchů a tím snížit tření, které vzniká mezi povrchem obrobku a nástrojem. Vytvoření vrstvy ale může způsobit vznik tzv. „mezního tření“. To je zapříčiněno z důvodu velké afinitě kapaliny ke kovu.

Tato schopnost tedy zmenšuje řezné síly, tudíž i spotřebu energie a zlepšuje vlastnosti povrchu. Proto se vyžaduje především u dokončovacích operací nebo operací jako tvoření závitu nebo protahování.

Chladicí účinek – chladícím účinkem lze rozumět schopnost řezného média odvádět teplo z místa styku nástroje s obrobkem. Schopnost chladit má každá kapalina, která umí smočit povrch obrobku a existuje zde tepelný spád. Znamená to, že kapalina dokáže odvést teplo tím, že proud řezné kapaliny opláchne nástroj, odvede třísky a přijme vznikající teplo.

Chladicí účinek závisí na smáčecí schopnosti, výparném teple, rychlosti vypařování, tepelné vodivosti a měřeném teple. Čím větší budou tyto hodnoty, tím větší bude i chladicí účinek. Při odpařování kapaliny, se musí zohlednit hledisko čistoty a zdraví, proto je potřeba v určitých případech vznikající páry odsávat.

Čistící účinek – čistící účinek závisí na přívodu řezné kapaliny a následnému odstraňování třísek. Např. u řezného kotouče řezná kapalina čistí póry a tím zlepšuje jeho vlastnosti. Účinek má velký význam u řezání závitu, broušení nebo vrtání.



Obrázek 6 Vyplavování třísek při vrtání [15]

Ochranný účinek – ochranný účinek kapaliny zajišťuje jistou ochranu obrobku vůči korozi. Je to jeden z důležitějších požadavků, kvůli kterému poté nemusíme výrobky mezi operací konzervovat proti korozi. Proto jsou do kapaliny přidávány přísady, které korozi zabraňují. Dalším důvodem této schopnosti, je ochrana nátěrů na stroji a zamezení agresivité vůči gumovým těsněním.

Zdravotní nezávadnost – nejen u konvenčních strojů dochází často ke styku operátora s řeznou kapalinou, proto je tedy nutné, aby kapalina neobsahovala žádné dráždivé látky a nebyla zdraví škodlivá. Kapaliny také nesmí zamořovat ovzduší kolem pracoviště zápachem, proto je mnohdy potřeba zajistit odsávání.

Provozní stálost – řezná kapalina po určitém čase začne měnit své vlastnosti, proto je potřeba dbát na její občasnou výměnu.

U olejových typů řezných kapalin lze po čase pozorovat tvoření pryskyřičnatých usazenin, které mohou zapříčinit i poškození stroje. Může to způsobit také zhoršení ostatních účinků, jako jsou např. mazací účinky nebo zdravotní nezávadnost.

Provozní stálost závisí především na fyzikálních a chemických vlastnostech řezné kapaliny a její teplotě.

Přiměřené náklady – přiměřené náklady se odvíjí od spotřeby kapaliny. V první řadě je potřeba určit, jaký má mít vliv na obrábění. Dále poté, jakou má mít provozní stálost a jaké jsou náklady na likvidaci.

Procesní kapaliny lze jednoduše rozdělit podle cenových rozdílů, nicméně toto rozdělení není zcela dostatečné, jelikož kapaliny zasahují do ekonomiky obrábění v mnohem větším rozsahu, než je jejich hodnota. Nelze proto zvolit jeden druh procesní kapaliny, která by mohla být dostačující pro všechny operace. Každá operace vyžaduje jiný přívod kapaliny a její koncentraci. [31,32]

2.2 Rozdělení řezných kapalin

Řezné kapaliny lze rozdělit do dvou základních skupin. Jsou to kapaliny s chladícím účinkem, kde patří převážně řezné kapaliny na vodní bázi a poté s mazacím účinkem, do které lze zařadit kapaliny na olejové bázi.

2.2.1 Vodní roztoky

Kapaliny na bázi vody jsou komerčně dostupné v koncentrované formě, které je potřeba jako mazivo smíchat před použitím s vodou, aby se vytvořila požadovaná stabilní koncentrace. Tyto roztoky se dělí do dvou hlavních skupin, jsou to „emulgované“, které vytváří emulzi, nebo „roztoky rozpustné ve vodě“, které tvoří roztok z určitých typů rozpustných olejů.

Lze taky použít obyčejnou vodu, nebo vodu obsahující stopy alkálií. Voda je ekonomická, ale při neopatrném zacházení může způsobit korozi stroje a dílů, nebo zředit potřebné mazivo ložisek a jiných opotřebitelných částí v blízkosti obrábění.

Chladicí kapaliny na bázi vody lze použít při různých technikách chlazení, jako záplavové chlazení a MQL chlazení. [19]

2.2.2 Emulzní kapaliny

Emulzní kapaliny jsou na minerální bázi a obsahují emulgátory. Emulgátory umožňují snížení mezi povrchových napětí a stabilizaci emulze. Rozpustné oleje jsou levné a poskytují dobrou chladicí schopnost při vyšších rychlostech. Hlavními problémy u emulzních olejů je tvořící se mlha, napadení bakteriemi a náchylnost na tvrdost vody.

Emulzní kapaliny jsou jedny z nejvíce používaných řezných kapalin. [17]

2.2.3 Přímé oleje

Tyto přímé řezné oleje jsou komerčně k dispozici jako produkt připravený k použití, s výjimkou některých případů, kdy se jedná o oleje s přídatnými minerálními oleji a petroleji, aby se dosáhlo potřebné viskozity pro některé operace. Oleje lze použít jak u záplavového chlazení, tak při technice MQL. Oproti kapalinám na vodní bázi mají kapaliny na olejové bázi lepší mazací vlastnosti a lepší odolnost vůči tlaku. Při vysokém tlaku a po přidání síry a sloučenin chlóru zlepšují kvalitu obrobku a zvyšují životnost nástroje. Oleje nemají moc dobré chladicí vlastnosti a jsou známé vysokou hořlavostí. U operací s vysokou

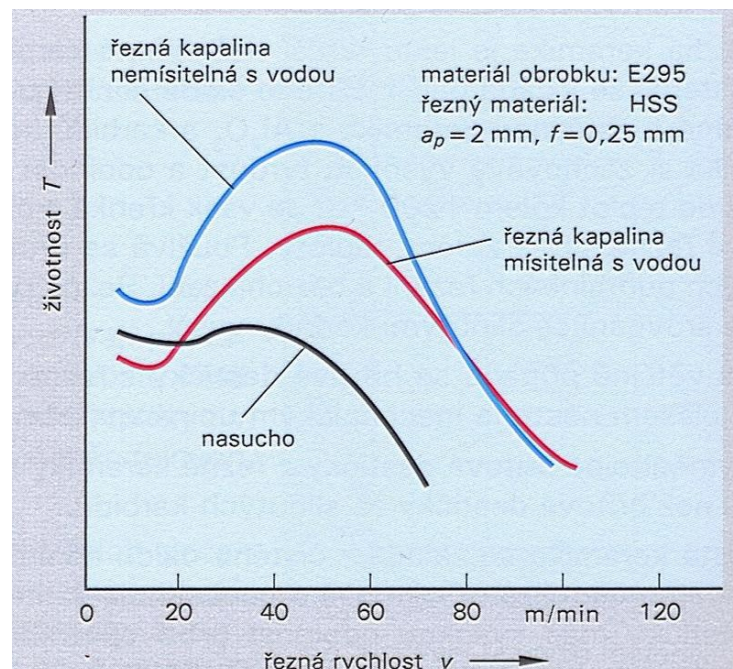
řeznou rychlostí, jsou přímé oleje vysoce neefektivní, protože jejich účinnost odvádění tepla je velmi nízká.

Přímé oleje lze použít u operací, kde je potřeba nízkých otáček. Pro snížení tvorby kouře a nebezpečí požáru se může využít rostlinných olejů díky vyšší viskozitě. [17]

2.2.4 Syntetické kapaliny

Syntetické chladicí kapaliny, jsou kapaliny na bázi vody, které jsou vyrobeny z alkalických organických látek. Před použitím se musí zředit s velkým množstvím vody, aby byla kapalina stabilní. Dále se do syntetických kapalin přidávají chemické přísady, jako jsou inhibitory koroze, biocidy a další látky.

Použití kapaliny má řadu výhod, za které lze považovat např. nízkou cenu, vysokou nehořlavost, snadné míchání a rozpustnost ve vodě, významnou chladicí schopnost apod. Mezi nevýhody lze řadit chemické reakce s nekovovými díly, které mohou způsobit poškození těsnění stroje. [18]



Obrázek 7 Životnost nástroje, při použití různých kapalin [36]

2.3 Ostatní chladící způsoby

Používání a likvidace řezných kapalin v kombinaci s právními předpisy o životním prostředí a ochraně zdraví vedla k ekologickému obrábění. Minimální množství maziva (MQL) a suché obrábění se úspěšně používá v některých obráběcích procesech a byly klasifikovány jako techniky šetrné k životnímu prostředí.

2.3.1 Stlačený vzduch

Hlavním cílem vzduchu je odstraňovat malé třísky prachu, které mohou narušit povrch obráběného materiálu.

2.3.2 MQL – mikrolubrikace

Hlavními výhodami chlazení za pomoci mikrolubrikace jsou kvalita povrchu, lepší řezné podmínky a snížení negativního dopadu na životní prostředí. Malé množství kapaliny, se pomocí stlačeného vzduchu s velmi vysokou rychlostí (100 m/s) vstříkuje ve formě ultra jemných kapiček do řezné oblasti. Umožňuje tak efektivně chladit jak nástroj, tak i obrobek od nečistot. [16]

2.3.3 Kryogenní chlazení

Kryogenní chlazení se stalo atraktivním v obrábění, protože páry kryogenního plynu jsou bezpečné a nemají žádné negativní účinky na zdraví obsluhy. Nejčastějšími plyny při kryogenním chlazením jsou dusík a oxid uhličitý, které jsou bezbarvé, bez chuti, zápachu a nejsou toxické. Třísky, které vzniknou, jsou čisté a nejsou mastné, tudíž se dají snadněji recyklovat. Mezi nevýhody kryogenního chlazení, lze zahrnout změny povrchových vlastností obrobku v důsledku náhlého a rychlého poklesu jeho teploty, které mohou způsobit křehkost obrobku a mohou vést ke špatným rozměrovým výstupům. Výhoda tohoto chlazení nastává při obrábění slitin titanu, niklu a duplexních ocelí, kde může nastat rychlé opotřebení bříty. [18,22]

3 PŘÍVOD ŘEZNÝCH KAPALIN DO MÍSTA ŘEZU

Při třískovém obrábění nemusí ovlivnit kvalitu obrábění jen teplota a tlak, ale i způsob, jakým se médium k danému místu přivede. Způsob přívodu média může výrazně ovlivnit trvanlivost břitu nástroje a drsnost povrchu. Bez ohledu na způsob použití a dopravy chladicí kapaliny, musí být zajištěn její dostatečný objem, aby bylo zajištěno efektivního chlazení a odstranění třísek.

Kapaliny lze přivádět čtyřmi hlavními způsoby – přesně, ze spodu, volně a zevnitř. Při obrábění náročnějších materiálů, nebo zvýšení řezné rychlosti lze způsoby mezi sebou kombinovat.

3.1 Přesný přívod

Přesný přívod kapaliny, se může nazvat také jako přívod z horní strany. Proud řezné kapaliny je přiváděn na čelní stranu břitu přímo do místa řezu. Hlavní výhodou tohoto způsobu je, že snižuje teplotu v místě dotyku nástroje s obráběným materiálem a pomáhá lepšímu tvoření třísek. Způsob tvoření třísek lze ovlivnit úpravou tlaku proudění. Čím vyšší je tlak, tím lze lépe obrábět problematictější materiály. Moderní soustružnické nástroje mají zabudované trysky přímo na čelní straně břitu.

V případě špatného nasměrování trysky a tlaku může dojít k hromadění třísek a následnému rychlému opotřebení nástroje nebo odstavení stroje. [14]

3.2 Přívod ze spodní strany

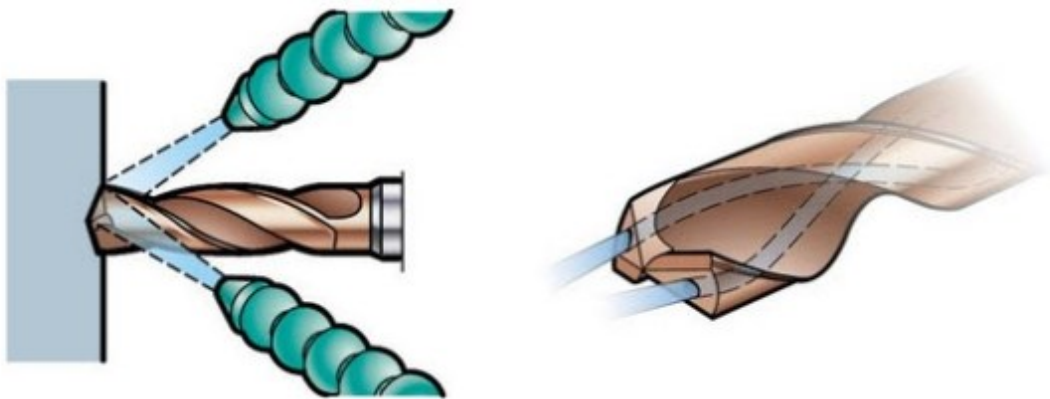
Touto metodou působí proud na hřbetní stranu břitové destičky a efektivně snižuje její teplotu. To má za následek nižší opotřebení nástroje, a tudíž jeho větší životnost. Při použití tohoto přívodu lze použít vyšších řezných rychlostí a posuvu. [14]

3.3 Volný přívod

Při tomto způsobu přívodu kapaliny dochází k tzv. zaplavení místa řezu. Používá se nejčastěji u konvekčního obrábění, protože nevyžaduje žádné zvláštní trysky, ani úpravu potrubí. Trysky by měly být nasměrovány před řez a měly by zajišťovat dostatečné množství chladicí kapaliny. Zaplavení je účinné k odstraňování třísek a chlazení dílu, mazací účinnost je omezená, protože kapalina nemá dostatečný tlak k pronikání do rozhraní nástroj-tříska. Kapalina je čerpána z nádrže pomocí čerpadla a je dopravena volně do místa řezu. [14,23]

3.4 Vnitřní chlazení

Při vnitřním chlazení proudí kapalina v nástroji. Využívá se u nástrojů se slinutými karbidy, kde kapalina proudí přímo do místa řezu. Lze zde zvýšit řeznou rychlost až o 15 %. Metoda, nejčastěji využívající tohoto přívodu kapaliny je vrtání hlubokých děr, kde napomáhá při odstraňování třísek. [20,23]



Obrázek 8 Porovnání volného přívodu a vnitřního chlazení (vpravo) [21]

3.5 Speciální systémy přívodu

Při kryogenním chlazení pomocí kapalného dusíku (-196 °C) je potřeba, aby na stroji byl speciální systém přívodů. Izolována musí být jak skladovací nádoba pro dusík, tak přívodní hadice. Pracoviště musí být odvětráváno. [22]

4 JEVY PŘI SOUSTRUŽENÍ

Při obrábění lze narazit na mnoho jevů, které mohou narušit nebo zpomalit navazující procesy obrábění a můžou nám způsobit jak časovou, tak i finanční ztrátu.

4.1 Opotřebení nástroje

Při obrábění dochází k velmi vysoké plastické deformaci obrobku. Je to zapříčiněno pomocí smykového napětí, které má nejvyšší hodnotu těsně před deformací materiálu. Tato deformační zóna se označuje jako primární. Sekundární deformační zóna vzniká mezi nástrojem a třískou. Tření, které je mezi obrobkem a nástrojem, vede k velmi vysokým teplotám, jež se odvádí do obrobku, nástroje, třísky nebo se ztrácí v okolí.

Vysoká teplota může poškodit nástroj, ale pokud přesáhne určitou mez, tak i povrch obrobku. Proto je žádoucí, aby teplo odcházelo v co největší míře společně s chladicí kapalinou. [23]

Pojem opotřebení břitu nástroje tedy znamená postupně probíhající proces, u kterého se zvětšuje poloměr zaoblení ostří, dále se v místech čela a hřbetu mění drsnost a geometrie břitu. [24]

4.1.1 Mechanismy opotřebení nástroje

Pomocí otěru stykových ploch dochází k opotřebení nástroje a mezi základní mechanismy tohoto jevu se řadí:

Abraze – jedná se o tzv. brusný otěr, který vzniká důsledkem vlivu tvrdých mikročástic materiálu a mikročástic z nástroje.

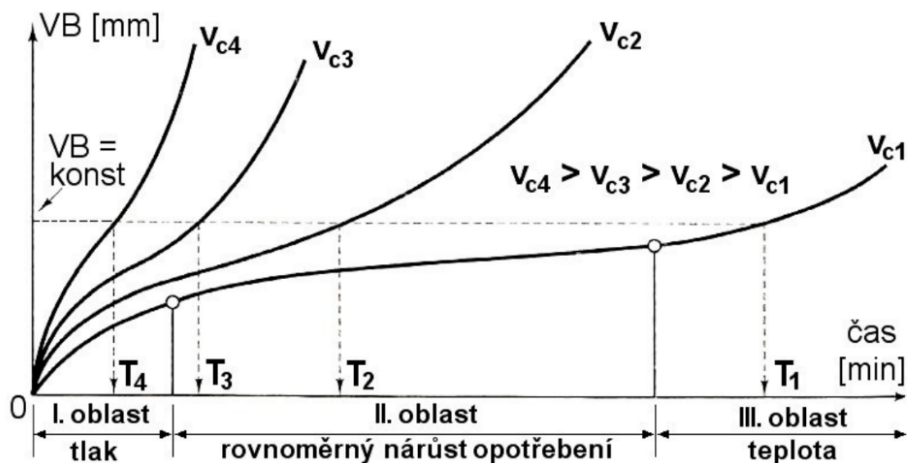
Adheze – dochází zde ke vzniku a následnému přerušování mikro svarových spojů na potkávajících se nerovnostech čela a třísky, zapříčiněném vysokými teplotami a tlaku. Je zde velké opotřebení a úbytek nástroje.

Difúze – difúze je zapříčiněna migrací atomů z nástroje do obrobku a naopak. Na základě migrace se vytvářejí nežádoucí chemické sloučeniny ve struktuře nástroje.

Oxidace – u oxidace vznikají chemické sloučeniny na povrchu nástroje, které zapříčiňuje kyslík, jenž je přítomen v okolním prostředí.

Plastická deformace povrchu břitu – vzniká nejčastěji při obrábění měkkých materiálů a důsledkem je mechanické zatížení a vysoká teplota. Obráběný materiál má malou tepelnou vodivost, tudíž se hromadí teplo v nástroji a může dojít k tzv. lavinovému opotřebení.

Křehké lomy – tento jev vzniká při velkém mechanickém zatížení (např. přerušovaným řezem) a objevuje se nejčastěji u slinutých karbidů nebo keramiky. [24]



Obrázek 9 Závislost vlivu opotřebení T_1 , T_2 , T_3 , T_4 na řezné rychlosti V_{c1} , V_{c2} , V_{c3} , V_{c4} , pro konstantu kritického opotřebení VB [35]

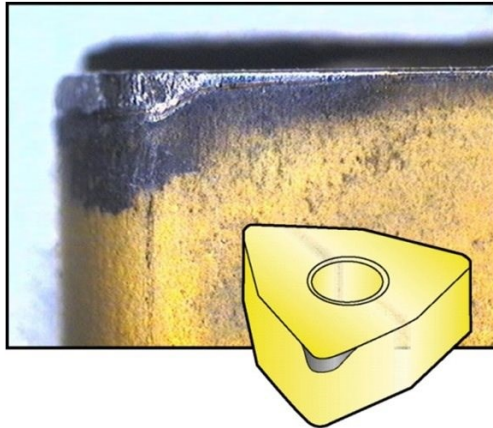
4.1.2 Typy opotřebení nástroje

Pro zmenšení opotřebení nástroje je potřeba zvolit správného řezného materiálu společně se správnými řeznými podmínkami. Existují kritéria, podle kterých lze zjistit dané parametry, jsou to: jakost obráběného materiálu, tvoření a lámání třísky a přesnost rozměrů.

Další možnost, jak zvolit správné parametry pro obrábění, jsou pomocí pohledu na břit, na kterém vlivem obrábění vznikají viditelná opotřebení. Při každém procesu obrábění existuje tzv. optimální průběh opotřebení. [23]

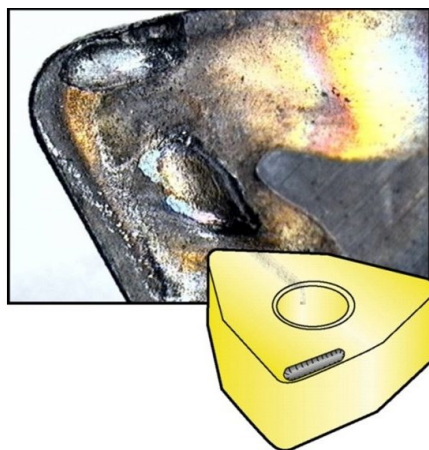
Viditelné poškození na nástroji, lze rozdělit do mnoha typů:

Opotřebení na hřbetu nástroje – je způsobený příčinami abrazivního mechanismu a projevuje se na ploše hřbetu břitu. Vypadá jako pravidelná abraze na ostří nástroje, ale může zde nastat také ulpívání kovu z obrobku, při kterém hrozí zhoršení jakosti obrobku. [25]



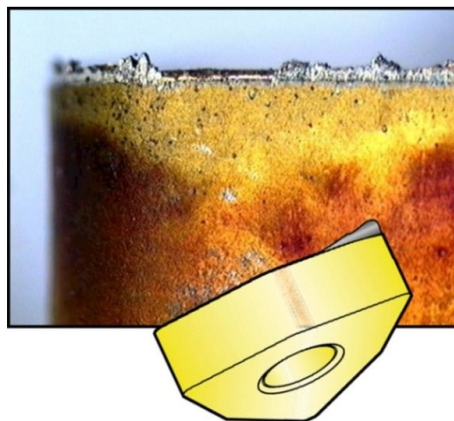
Obrázek 10 Opotřebení na hřbetu nástroje [25]

Vytvoření žlábků na čele – vzniká důsledkem kombinace difúzního a abrazivního mechanismu. Příčinou je obrábění tvrdých materiálů. Velké poškození nástroje způsobí změnu jeho geometrie a ovlivní tvoření třísky. Minimalizaci žlábků, lze provést volbou vhodného břitu, který obsahuje silné vrstvy oxidu hliníku, nebo zajištěním účinného chlazení. [25]



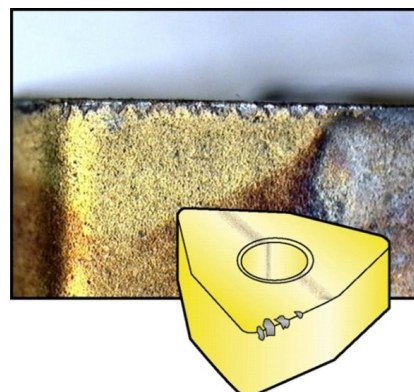
Obrázek 11 Vytvoření žlábků na čele [25]

Nárůstky na břitu – důvodem tvoření nárůstku na břitu jsou nevhodné řezné podmínky. Dochází zde k tlakovému navaření materiálu obrobku na část ostří nástroje. Nárůstek se v dané chvíli odtrhne a může dojít k ulomení částic břitu, což zapříčiní jeho rychlé opotřebení. Zabránit tomuto typu poškození lze zvýšením řezné rychlosti, zvolením typu břitu s ostřejší geometrií nebo použitím chladicí kapaliny s vyšším obsahem oleje.[25]



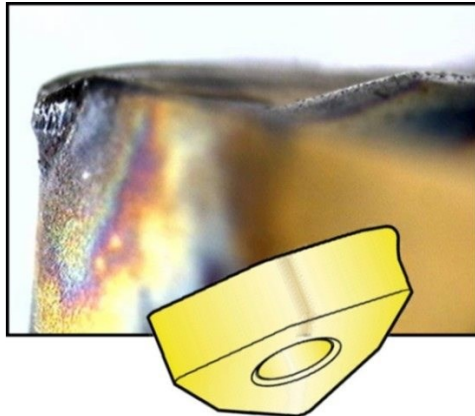
Obrázek 12 Nárůstky na břitu [25]

Vyštipování ostří – vzniká především vibracemi obrobku, stroje nebo samostatného nástroje. V materiálu břitu se také mohou vyskytovat praskliny nebo mechanická nestabilita, což zapříčiní vyštipování. Může také nastat tehdy, je-li v obrobku obsaženo tvrdých částic. Opatření, které lze provést, jsou minimalizace průhybů a správné nastavení soustavy, výběr vhodnější karbidové třídy nebo změny řezné rychlosti. [25]



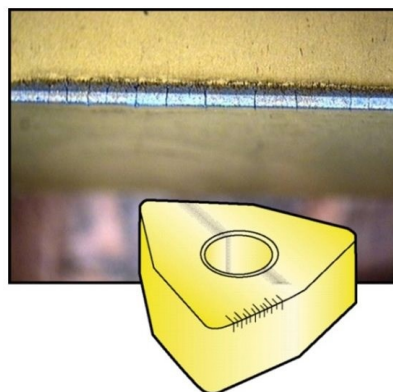
Obrázek 13 Vyštipování ostří [25]

Plastická deformace – vysoká teplota a řezné tlaky jsou vlivem tvoření plastické deformace na břitu. Při deformaci nastává tzv. vyboulení břitu, které dále zvyšuje teplotu a mění jeho geometrii. Poté dochází ke snížení pevnosti materiálu ve špičce až do jeho úplného zlomení. Lze tomu předejít nasazením vhodné destičky, která má větší rádius ve špičce, změnou řezných podmínek nebo zvolení tvrdších karbidových tříd destičky. [25]



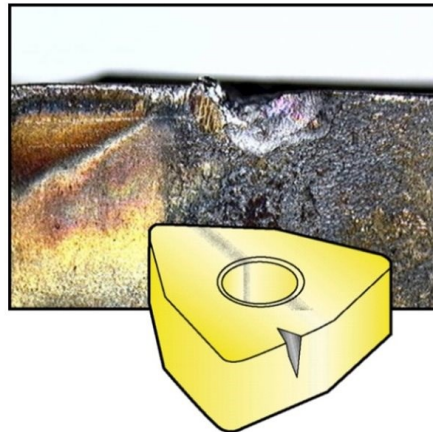
Obrázek 14 Plastická deformace [25]

Tepelné trhliny – vzniká vlivem tepelného šoku. V ostří vznikají chladnější a teplejší zóny, které způsobují namáhání břitu. Vytvořené tepelné trhliny se vlivem uvolňování částic karbidu uvolní a vylamují se. Opatřením tohoto jevu je správný přísun chladící kapaliny. [25]



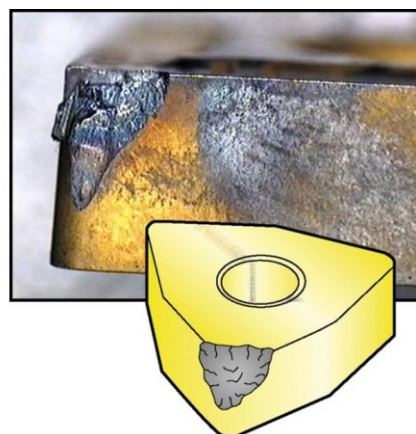
Obrázek 15 Tepelné trhliny [25]

Vrby na břitě – vzniká, je-li obrobek tepelně zpracován a povrch obrobku má větší tvrdost než jeho nižší vrstvy. Může také nastat, má-li obrobek nepravidelný povrch, což způsobí rychlejší opotřebení v části břitě, která se dotýká pevnější části obrobku. To zapříčiní vytvoření vrubu na nástroji. Snížení posuvu a variabilní hloubka řezu společně se zvýšením řezné rychlosti vede ke snížení pravděpodobnosti poškození nástroje. [25]



Obrázek 16 Vrub na břitě [25]

Odlomení břitě – osudný jev, který je považován za konec trvanlivosti ostří nástroje. Vzniká malou houževnatostí břitě, náhlou změnou geometrie, teploty nebo sil při obrábění. [25]



Obrázek 17 Odlomení břitě [25]

4.1.3 Měření opotřebení nástroje

Měření opotřebení nástroje je důležitou metodou, která optimalizuje řezné procesy. Rozumí se jí kontrola během obrábění, ale i po jeho ukončení. Opotřebení může ovlivnit jak jakost povrchu obrobku, tak i jeho rozměrovou nepřesnost.

Měření stavu nástroje je velmi významné z ekonomického hlediska, protože když nastane celková destrukce, může způsobit jak časovou prodlevu ve výrobě, tak i havárii stroje. [26]

V moderních strojích probíhá sledování stavu nástroje automaticky a ty dokážou data shromažďovat a vyhodnocovat. Může zde nastat automatické upravení řezných podmínek, nebo samostatné ukončení dané operace, aby se předešlo vniknutí škod jak na stroji, tak obrobku. [27]

Velikost poškození nástroje se může měřit metodou přímou a nepřímou.

4.1.3.1 Přímé metody měření

Tato metoda měření je v praxi těžko aplikovatelná z toho důvodu, že otupující se místa jsou nedostupná pro měřicí přístroje. Je zde nutné zastavení procesu obrábění, což následně ovlivňuje v dalších procesech jeho charakter otupení. Zároveň, se musí ve většině případů nástroj sundat z držáku, což znamená změny podmínek při dalším upnutí. Přímé metody měření se rozdělují do několika kategorií. [26]

Metoda váhová (hmotnostní) – zde se bere jako míra opotřebení břitu jeho hmotnost. Podstata této metody spočívá v tom, že se porovnává hmotnost opotřebované a nové destičky. Rozdíl těchto hodnot, nám vyjadřuje její poškození. Nevýhoda při této metodě je, že na nástroji může vzniknout výrůstek, který ovlivní hmotnost destičky.

$$\Delta M = M1 - M2 \text{ (g)} \quad (4.1)$$

Kde: ΔM – úbytek hmoty (g)

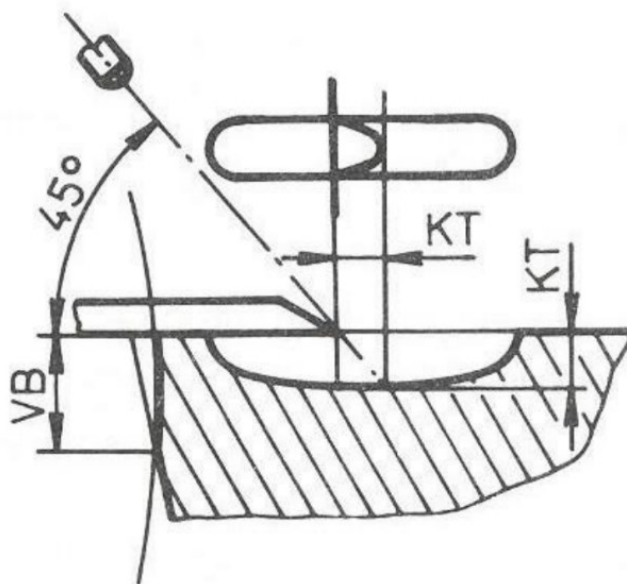
$M1$ – hmotnost nové destičky (g)

$M2$ – hmotnost otupené destičky (g) [26]

Metoda radioaktivních izotopů – metoda určující úbytek hmotnosti břitové destičky v závislosti na čase. Je to v kategorii přímých měření nejpřesnější metoda, jelikož dokáže určit hmotnostní úbytek v přesnosti až 10^{-3} mg. Tento typ měření patří mezi velice nebezpečné pro zdraví, proto jsou zde přísné bezpečnostní podmínky. [26]

Mikrometrická metoda – měření mikrometrickou metodou se určují opotřebení pomocí lineárních rozměrů, které se měří dílenskými mikroskopy. Toto měření nelze použít přímo při obrábění.

Optická metoda – optická neboli stínová metoda využívá paprsku světla, který nasvítí ostrou hranu nástroje, umístěnou na čele pod úhlem 45° . Tato metoda se používá pro měření opotřebení ve tvaru žlábků.



Obrázek 18 Měření opotřebení optickou metodou [26]

4.1.3.2 Nepřímé metody měření

Měření pomocí lupy s mikrometrickým šroubem – na stroji je upnuté speciální zařízení, které v době, kdy je stroj nečinný, se přiblíží k břitu a provede měření. Zařízení pracuje na optickém principu s následným elektronickým vyhodnocováním. Je velice nákladné, proto se musí správně naprogramovat, aby nedošlo k jeho poškození. [28]

Měření pomocí síly řezání – u tohoto měření se zaměřujeme především na výkon elektromotoru v obráběcím stroji. Je efektivní pro hodnocení síly působící mezi nástrojem

a obrobkem. Tento způsob zabrání nadměrnému přetížení stroje, které by mohlo vést ke změně geometrie nebo poškození stroje. [28]

Měření tepla obráběcího nástroje – tato technika využívá princip měření teploty, často lokalizované v částech nástroje, nebo obrobku. Teplotní data umožňují sledovat stav nástroje a optimalizovat podmínky obrábění.

Hlavním kritériem opotřebení je intenzita tepla v oblasti řezu, která se měří pomocí metody průtoku tepla v nástroji, založené na teplotním rozdílu mezi dvěma body blízko řezných ran.

Mezi další způsob monitorování teploty se považuje bezkontaktní měření pomocí termokamery. Ideální je, když je termokamera trvale umístěna na stroji, kde je stále zaměřená na okolí řezu. Získaná data jsou nadále zpracována počítačem. [28]

Při tomto způsobu platí tepelná bilance, kde množství tepla vytvořeného během řezání musí odpovídat teple odvedeného z řezu.

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 = Q_t + Q_o + Q_n + Q_p \quad (4.2)$$

Q_1 – teplo způsobené deformací v místě střižné plochy (J),

Q_2 – teplo způsobené třením třísky v místě čela nástroje (J),

Q_3 – teplo způsobené třením v místě hřbetu nástroje (J),

Q_t – teplo v tříске (J),

Q_o – teplo v obrobku (J),

Q_n – teplo v nástroji (J),

Q_p – teplo v okolí řezu (J). [28]

Měření akustické – tato technika využívá k měření mikrofon umístěný poblíž nástroje. Její nevýhodou je vznik akustického hluku v okolí nástroje, což ji činí vhodnější pro použití na strojích s ochrannými kryty. Na druhou stranu, výhodou této techniky oproti ostatním je ekonomická nenáročnost a malé rozměry senzoru. [28]

Monitorování pomocí vibrací – vibrace vznikající na nástroji jsou důsledkem jeho opotřebení, tzn. čím větší je opotřebení, tím větší je vibrace. Hlavním problémem ale jsou

vibrace tzv. „cizí“, které vnikají během procesu obrábění a jsou považovány za rušivý faktor. Frekvenční rozsah je nutné zvolit v souladu s konkrétní metodou obrábění.

Vibrace lze měřit pomocí akcelerometru nebo kyvadla. [28]

4.2 Jakost obráběného materiálu

Jakost povrchu je důležitým parametrem při obrábění, jelikož se velká část obrobků namáhána dynamicky, závisí tedy na jeho struktuře a vlastnostech, které jakost dokáže ovlivnit.

Jakost se hodnotí ze dvou možných hledisek: drsnost povrchu neboli jeho prostorové uspořádání (textura), a dále na fyzikální a chemické vlastnosti povrchu, zvané také jako integrita povrchu.

Nerovnosti, které vznikají na materiálu, jsou výsledkem vztahu nástroje a obrobku, které jsou často ovlivněny i fyzikálními jevy. Z velké části záleží také na podmínkách obrábění, materiálu obrobku nebo chladicí kapalině. U vyrobených součástí, které jsou namáhány dynamicky, se zkoumá únavový součinitel a únavový zlom, který může vzniknout buď na povrchu obrobku, nebo těsně pod ním. U statického namáhání, jako jsou např. namáhání tahem, ohybem a krutem, jsou největší napětí rovněž na povrchu součástí. [29]

4.2.1 Jakost povrchu

Jakost povrchu, charakterizována drsností povrchu, známá také jako mikrogeometrie, je klíčová pro funkční parametry obrobku. Je definována, jako nejmenší nepravidelnost (odchylka) od ideálně hladkého, rovného a lesklého povrchu. Může vzniknout v posledních fázích obrábění, ať už vlivem řezného nástroje nebo brusného kotouče.

Do drsnosti povrchu se nezahrnují náhodná poškození vzniknutá naraženinami, původními vady materiálu, otřepy apod.

Záleží také na tom, jestli jsou operace při soustružení hrubovací nebo dokončovací. Při hrubování se musí brát v potaz velké řezné síly, s čímž je spojena tuhost stroje, upnutí obrobku nebo nástroje. [33,41]

4.2.2 Metody měření drsnosti

Existují dvě hlavní metody měření drsnosti povrchu (kontaktní a bezkontaktní), které prošly velkým vývojem a modernizací.

Kontaktní měřicí metoda – nejstarším způsobem měření drsnosti povrchu, se kterým se v praxi ještě lze setkat, je měření pomocí etalonů. Jednalo se o měrky, které se porovnávaly s povrchem obrobku buď pomocí pouhého oka nebo mikroskopu. Nevýhodou etalonů je, že lidské oko dokáže rozeznat parametry pouze v μm , což je pro dnešní moderní výrobu již nedostačující. Z toho důvodu se začaly vyvíjet měřicí systémy.

První měřicí systémy, které jsou využívány ve výrobě, fungují na principu kontaktním. Přístroj, se skládá z mechanické a elektronické části. Jedná se o druh, který je tvořen ze zavěšeného vahadlového ramene, kde na jeho konci je měřící hrot, zkoumající povrch obrobku. Pohybem systému hrot přenáší mechanický signál na druhý konec ramene, kde je snímač, který mění přenášený signál na elektrický. Ten poté spolupracuje s dalšími systémy zpracovávající data. [33,41]

Tyto systémy lze rozdělit podle jeho snímače na elektromagnetické a optické.



Obrázek 19 Moderní profilometr [40]

Mezi výhody kontaktních měřících metod, patří například to, že měřené součástky nemusí být ve vodorovné poloze, proto se tato metoda používá pro měření kuželových ploch. Zároveň při nedokonalém očištění obrobku, může hrot nečistotu odsunout z měřící části a nevznikají tak často náhodné chyby.

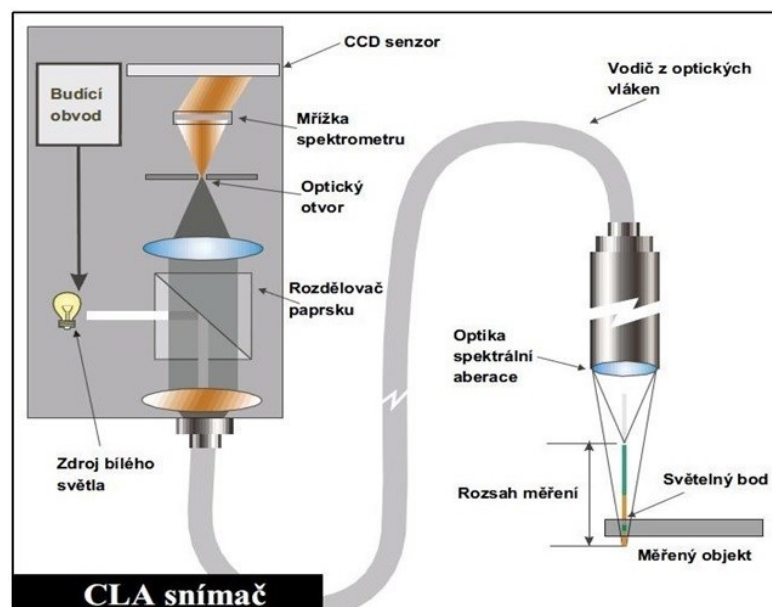
Naopak nevýhoda metody je, že hrot, který snímá povrch obrobku není dokonale ostrý, ale má na špičce rádius, tudíž není schopný měřit mikro nerovnosti, které jsou menší než průměr špičky. Hrot je také po určité době opotřebovaný, a jelikož se zde používají hroty z diamantu, jeho výměna je nákladná.

Bezkontaktní měřící metody – v současné době se zvyšují požadavky na vlastnosti funkčních ploch. Proto se tedy zdokonalil technický vývoj a začaly se vyrábět bezkontaktní měřící přístroje, které jsou schopné měřit v 1 nm. Některé povrchy jsou citlivé na mechanické poškození, nebo jsou příliš měkké na to, aby zde byla použita kontaktní metoda.

Metoda využívá světelného paprsku promítající na povrch obrobku, kde se nachází mikroskopické nerovnosti, které světelný paprsek rozptýlí. Čím je povrch hladší, tím víc se paprsek rozptyluje zrcadlově. Naopak čím je povrch drsnější, zrcadlový efekt se zde snižuje a zvětšuje se zde rozptyl.

Hlavní výhodou bezkontaktního měření je jeho přesnost a rychlost. Zároveň tato metoda není tak náchylná na opotřebení, tudíž provozní náklady nejsou tak vysoké. Lze s nimi měřit i měkké povrchy a citlivé povrchy.

Nevýhodou měření je, že když se paprsek dostane do oblasti, kde se náhle změní profil, nemusí se správně odrazit do detektoru a data se zde „ztratí“. Modernější softwary dokážou s touto chybou pracovat, ale v praxi se často objevují softwary, které nejsou schopny tohle rozeznat. Světlo a okolní vibrace mají ale největší vliv na měření, kdy se nemusí změřit přesné hodnoty. [33,41]



Obrázek 20 Bezkontaktní metoda měření drsnosti povrchu [30]

Bezkontaktní metoda pomocí CLA snímače (viz. obr. 18) spočívá v tom, že bílé světlo mířeno optikou na kontrolovaný povrch, je rozloženo podle vlnových délek a na každém místě povrchu je světlo zaostřeno a odraženo. Odražené světlo musí projít otvorem, přes který musí projít jen světlo zaostřené vlnové délky. Přístroj poté světlo přesměruje na CCD senzor, který počítačově vyhodnotí prostorovou polohu každého bodu. [30]

4.3 Tvoření třísky

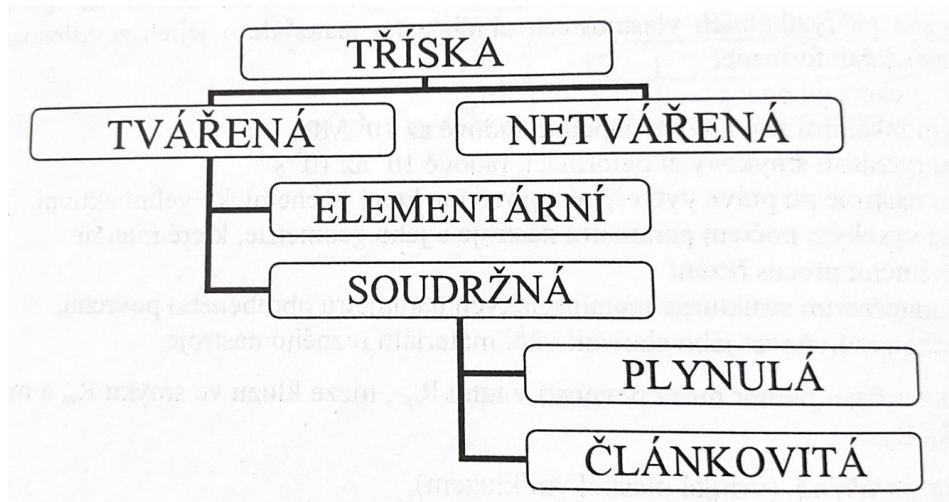
Průběh, při kterém se odděluje tříska, závisí na mnoha faktorech. Jedním z hlavních faktorů je fyzikální vlastnost obráběného materiálu a jeho plastická deformace.

Druh třísky závisí na mezi pevnosti v tahu R_m , mezi kluzu ve smyku R_{es} a mezi pevnosti ve smyku R_{ms} . Také se tvoření třísky rozděluje podle toho, jestli je látka krystalická nebo nekrystalická. U krystalické látky, vzniká tříska tvářená, u nekrystalické je tříska netvářená. [4]

Tvářená tříska soudržná – tečné napětí v této situaci dosáhne meze kluzu R_{es} a meze pevnosti R_{ms} dříve než normálového napětí v tahu R_m . Plasticicky tvářený materiál se odděluje, což vede k tvoření třísky formované plastickým kluzem (př. Oceli, slitiny Al, slitiny C a další houževnaté materiály). Tvářená tříska se dále může dělit ještě na soudržnou a elementární, kde soudržná tříska může být rozdělena ještě na plynulou a článkovitou viz. Obr. 17.

Částečně tvářená tříska – v této situaci, nazývané také jako elementární tříska, je materiál před jeho oddělením částečně tvářen, a to z důvodu, že normálové napětí dosáhne R_m dříve než tečné napětí meze v R_{ms} , ale zase později než R_{es} (př. Obrábění litiny, bronzů, ...).

Netvářená tříška – v tomto případě není materiál nijak tvářen a tříška je zde vzniklá štěpením. Tento případ nastává proto, že normálové napětí dosáhne R_m dříve než tečné napětí R_{es} (zpracování dřeva, skla a plastů). [4]



Obrázek 21 Schéma jednotlivých druhů třísek [4]

4.3.1 Objemový součinitel třísek






Z hlediska následné manipulovatelnosti (doprava, zpracování, ...), musí mít třísky po obrobení určité rozměry a tvary. Při obrábění na automatizovaných strojích se tyto požadavky zvláště zdůrazňují, jelikož objem odvážených třísek je zde vysoký. Ovlivnit vznik třísky lze zejména volbou vhodných rezných podmínek. [31]

Objemový součinitel třísek W vyjadřuje poměr objemu „samostatně uložené“ třísky k objemu obrobeného materiálu, ze kterého vznikla.

$$W = \frac{V_t}{V_m} \quad (4.3)$$

Kde: V_t – objem volně uložených třísek

V_m – objem odebraného materiálu

TVAR TŘÍSEK		W	TVAR TŘÍSEK		W
	STUŽKOVÉ DLOUHÉ	400 a více		SPIRÁLOVÉ PLOCHÉ	10 až 20
	STUŽKOVÉ SMOTANÉ	300 až 400		OBLOUKOVITÉ SPOJENÉ	8 až 10
	VINUTÉ DLOUHÉ	80 až 150		ELEMENTÁRNÍ	4 až 6
	VINUTÉ KRÁTKÉ	40 až 60			

Obrázek 22 Hodnoty objemového koeficientu W pro vybrané druhy třísek [31]

4.3.2 Příčný koeficient pýchované třísky

Vznik plastických deformací v oblasti, kde se tvoří třísky způsobí její pýchování a následné komplikace při jejím odchodu z místa řezu. Součinitel pýchování třísky se značí k_s a vyjádří se pomocí vztahu: [31]

$$k_s = \frac{h_{Dc}}{h_D} = \frac{x \cdot \sin(180 - \varphi - \delta)}{x \cdot \sin(\varphi)} = \frac{\sin(180 - \varphi - \delta)}{\sin(\varphi)} \quad (4.4)$$

Kde: h_{Dc} – tloušťka třísky (mm)

h_D – tloušťka odřezávané vrstvy (mm)

5 SHRUTÍ TEORETICKÉ ČÁSTI A CÍLE ČÁSTI PRAKTICKÉ

Teoretická část bakalářské práce se nejprve zaměřuje na stručný popis soustružení, jak na klasických soustruzích, tak i na soustruzích číslicově řízených. Dále je detailněji popsáno rozdělení chladících kapalin, jejich vlastnosti a způsoby přívodu kapalin do místa řezu.

Následně jsou podrobně popsány jevy, které mohou při soustružení nastat. Jeden z nejčastějších jevů je opotřebení nástroje, který má výrazný vliv na následující obrábění. Kapitola se zaměřuje na druhy opotřebení a mechanismy, kterými mohou tyto jevy nastat. Dalšími jevy, řešenými v teoretické části, je jakost obráběného materiálu, kde jsou popsány různé druhy měření drsnosti a přístroje, kterými povrch měřit. Závěr teoretické části je zaměřen na tvoření třísky, její druhy.

Cílem praktické části bakalářské práce, je seznámit se s kontaktním způsobem měření drsnosti povrchu a následného porovnání naměřených hodnot, vizuálního zhodnocení opotřebení břitové destičky a způsobu tvoření a zbarvení třísky. Při obrábění se bude používat stejný druh materiálu a měnit se bude pouze tlak přiváděné chladící kapaliny.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 ZAŘÍZENÍ A MATERIÁLY POUŽITÉ PŘI MĚŘENÍ

Všechny prostředky a materiály, které jsem použil při obrábění a měření, byly poskytnuté univerzitou v jejích dílenských prostorách.

6.1 CNC soustruh

Obrábění dílu, na kterém se provádělo následovné měření, probíhalo na obráběcím CNC stroji od firmy DMG MORI s názvem NTX 1000. Při experimentu bylo potřeba stroje s vysokou tuhostí, z důvodu co nejmenších naměřených rozdílů, zapříčiněných vedlejšími vlivy obrábění.



Obrázek 23 CNC stroj DMG MORI – NTX 1000

Stroj byl stále naprogramován a byly měněny pouze parametry řezných podmínek v závislosti na měnícím se průměru obrobku, aby bylo zachováno stejného zatížení na břitovou destičku a výsledky hodnocení byly ovlivněny pouze použitím různých tlaků přívodu řezné kapaliny.

6.2 Břitové destičky

Vyměnitelné břitové destičky, které se použily při experimentu byly pod značením SNMA120416, TKL0501 od firmy SECO s povlakem CVD. Destičky mají vrcholový úhel 90° a jsou oboustranné, tudíž jedna nabízí 8 břitů, kterými lze obrábět. Rohový rádius VBD je 1,60 mm.



Obrázek 24 Břitové destičky

6.3 Nůž

V experimentu je použit pravý soustružnický nůž, který umožní upnutí vyměnitelné břitové destičky. Nůž má označení Seco PSBNR2020K12 a nese rozměry upínací části 20 x 20 mm a jeho celková délka s upnutou destičkou činí 125 mm.

6.4 Profilometr

Profilometr, kterým bylo provedeno měření drsnosti povrchu, patří firmě Mitutoyo pod označením SurfTest SJ-410. Pomocí zařízení jsem v experimentu měřil R_z a R_a , které jsem poté zapisoval do tabulek a dále porovnával.

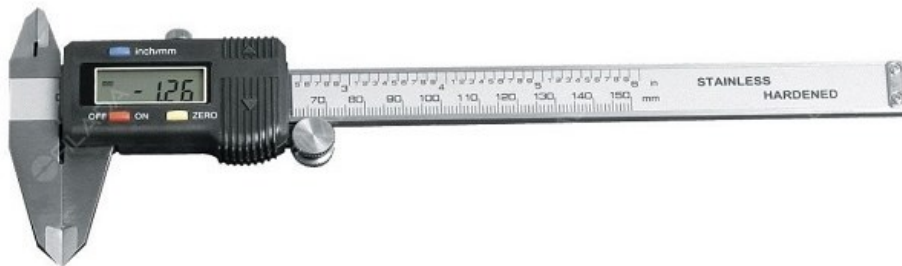
Drsnoměr je stále špičkou mezi kontaktními přenosnými drsnoměry a to proto, že měří s vysokým rozlišením, a tedy vysokou přesností ($0,0001 \mu\text{m}$ při rozsahu $8 \mu\text{m}$). Dále je jeho výhodou, že je napájený baterií a dokáže měřit v těžce přístupných místech. [39]



Obrázek 25 Profilometr Mitutoyo Surfest SJ-410

6.5 Digitální posuvné měřidlo

Pro měření tloušťky a šířky třísky bylo použito digitální posuvné měřidlo, které mělo přesnost 0,01 mm a jeho rozsah měření byl 0–150 mm.



Obrázek 26 Digitální posuvné měřidlo [38]

6.6 Obráběný vzorek

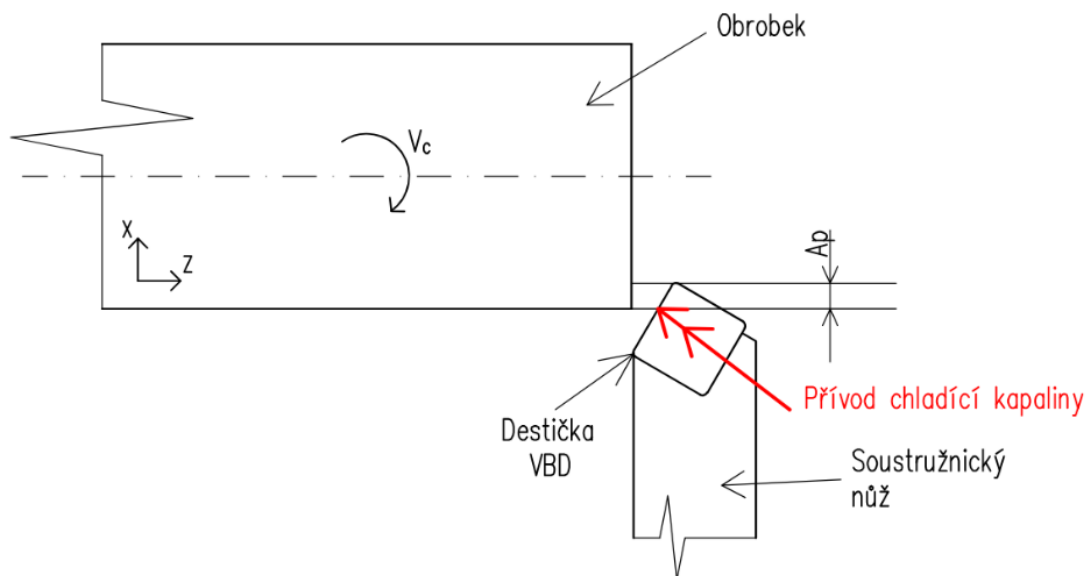
Uhlíková ocel ČSN 11 600- jedná se o neušlechtilou konstrukční ocel, která má vyšší obsah uhlíku. Používá se především pro součásti, které se namáhají staticky i dynamicky a nevyžaduje se u nich svařitelnost. Konkrétně se jedná o ozubená kola, hřídele, čepy, šrouby atd. [37]

6.7 Chladící kapalina

Pro chlazení obráběného materiálu byl použit chladící a mazací prostředek od firmy DECOIL, Decocut 1790, který je univerzální a používá se pro třískové obrábění jak železa, tak i hliníku a barevných kovů. Prostředek je mísitelný s vodou, kde poté vytvoří emulzi.

7 ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ

Při experimentu byla nastavena hloubka třísky $a_p = 1$ mm a měnily se pouze řezné podmínky v závislosti na průměru obrobku a tlak kapaliny, který se postupně navyšoval po 10 barech neboli 1 MPa. Řezná rychlost byla nastavena na 250 m/min a posuv $f = 0,5$ mm/ot. U každého tlaku kapaliny bylo provedeno 10 měření, které se zaznamenaly do tabulek, kde se poté zpracovaly do grafů, pro lepší znázornění vlivu řezné kapaliny na obrábění. U každého způsobu chlazení byl náhodně zvolen jeden měřicí proces, u kterého se pomocí profilometru vygeneroval graf materiálového podílu a četnosti jednotlivých úchylek. V tabulkách jsou zapsány hodnoty x, y (tloušťka a šířka třísky), které byly měřeny posuvným měřidlem a následně mezi sebou porovnávány.



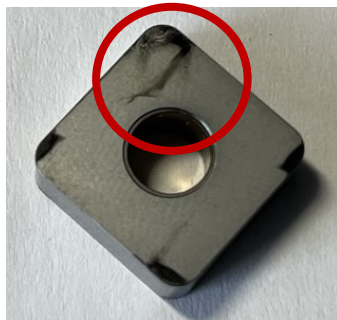
Obrázek 27 Schéma experimentu

7.1 Výsledky bez chlazení

Při obrábění bez chlazení lze již na první pohled vidět velké opotřebení břitové destičky a výrazné zbarvení třísky, které bylo způsobeno vysokou teplotou v místě řezu. Obrábění bylo doprovázeno výrazným písklavým zvukem. Naměřená hodnota č. 8 drsnosti povrchu Rz byla odstraněna z následného zpracování po provedení Grubbsova testu hrubých chyb.

Tabulka 1 Naměřené hodnoty bez chladicí kapaliny

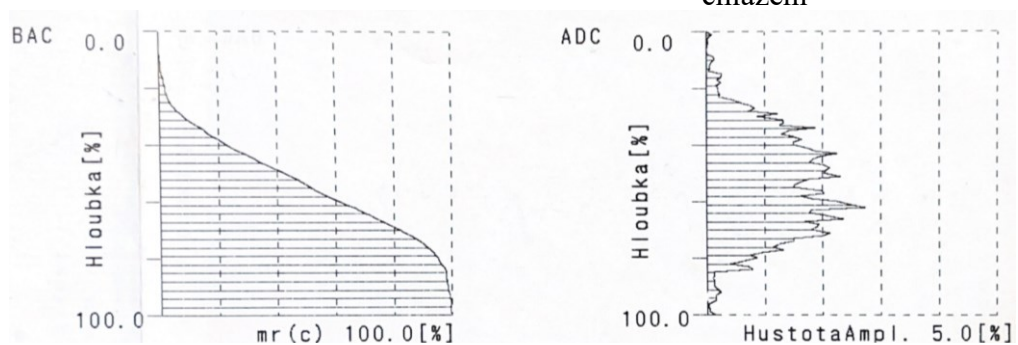
	Ra [μm]	Rz [μm]	x [mm]	y [mm]
1.	5,947	35,227	0,660	2,230
2.	5,548	29,989	0,660	2,220
3.	7,049	37,503	0,690	2,350
4.	5,105	28,458	0,720	2,290
5.	5,783	33,485	0,680	2,250
6.	5,766	32,096	0,690	2,270
7.	6,424	37,180	0,730	2,270
8.	6,982	52,584	0,680	2,300
9.	5,509	32,114	0,690	2,320
10.	5,488	41,157	0,690	2,260
průměr	5,960	35,979	0,689	2,276
Sm. Odchylka	0,653	4,019	0,022	0,040



Obrázek 30 Opatření břitové destičky – bez chlazení



Obrázek 28 Zbarvení a tvar třísky – bez chlazení



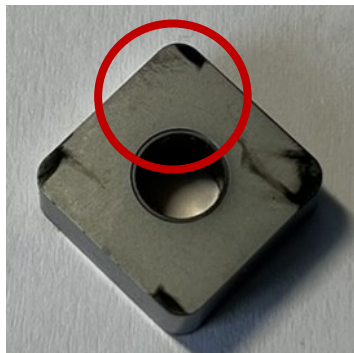
Obrázek 29 Materiálový podíl (vlevo) a amplitudová distribuce (vpravo) pro obrábění bez chlazení

7.2 Výsledky s chlazením 10 bar

Při nastavení tlaku 10 barů lze vidět výrazně nižší opotřebení břitové destičky a menší zbarvení třísky. Tvar ani rozměry třísky se zde nezměnily.

Tabulka 2 Naměřené hodnoty s chladicí kapalinou 10 bar

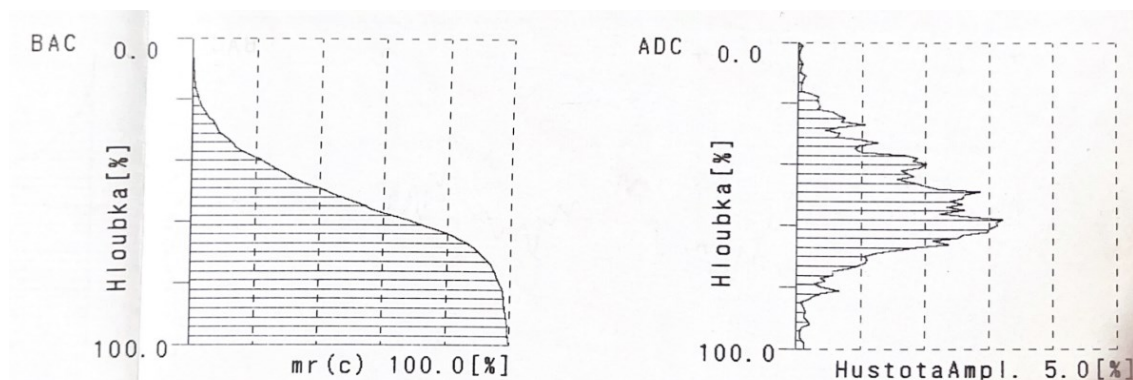
	Ra [μm]	Rz [μm]	x [mm]	y [mm]
1.	5,082	27,233	0,720	2,060
2.	5,419	26,337	0,660	2,020
3.	5,951	38,340	0,690	2,170
4.	5,605	34,602	0,740	2,120
5.	6,670	42,671	0,710	2,160
6.	5,590	29,447	0,680	2,080
7.	6,012	32,420	0,700	2,160
8.	7,698	48,598	0,750	2,200
9.	7,929	53,579	0,680	2,150
10.	6,751	38,288	0,670	2,090
průměr	6,271	37,152	0,700	2,121
Sm. Odchylka	0,966	9,053	0,030	0,057



Obrázek 33 Opotřebení břitové destičky- 10 bar



Obrázek 32 Zbarvení a tvar třísky- 10 bar



Obrázek 31 Materiálový podíl (vlevo) a amplitudová distribuce (vpravo) pro obrábění s chlazením o tlaku 10 bar

7.3 Výsledky s chlazením 20 bar

Zbarvení a změna tvaru třísky je u tlaku kapaliny 20 barů stále ještě viditelné. Na obrázku 33. lze na VBD vidět pouze lehké opotřebení v místě řezu.

Tabulka 3 Naměřené hodnoty s chladicí kapalinou 20 bar

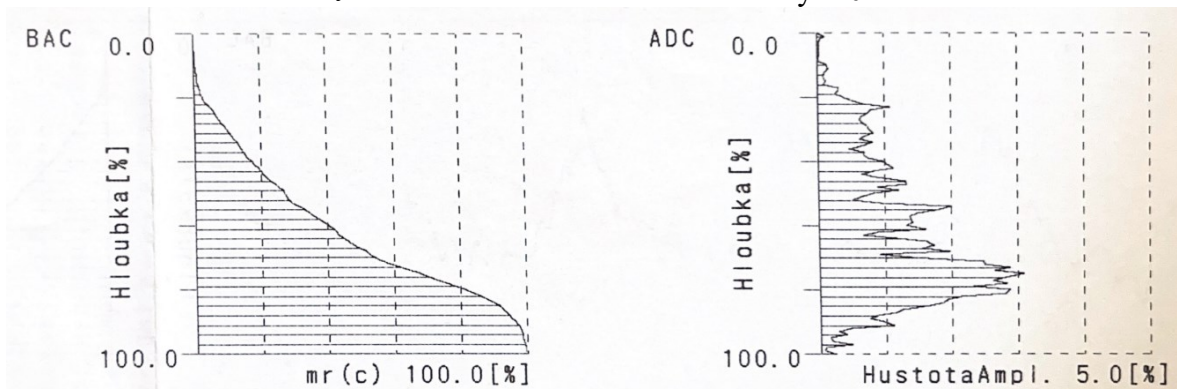
	Ra [μm]	Rz [μm]	x [mm]	y [mm]
1.	5,384	31,372	0,690	2,190
2.	5,902	31,654	0,680	2,060
3.	5,362	27,564	0,690	2,180
4.	6,477	36,479	0,670	2,210
5.	5,241	28,084	0,690	2,150
6.	7,697	40,914	0,690	2,170
7.	8,186	46,808	0,710	2,030
8.	6,263	34,360	0,690	2,100
9.	5,274	28,794	0,680	2,110
10.	4,519	22,056	0,690	2,200
průměr	6,031	32,809	0,688	2,140
Sm. Odchylka	1,157	7,169	0,010	0,062



Obrázek 36 Opotřebení břitové destičky- 20 bar



Obrázek 35 Zbarvení a tvar třísky- 20 bar



Obrázek 34 Materiálový podíl (vlevo) a amplitudová distribuce (vpravo) pro obrábění s chlazením o tlaku 20 bar

7.4 Výsledky s chlazením 30 bar

Od 30 barů bylo pískání během obrábění zcela výjimečně. Na třísece lze vidět, že odvod tepla z místa řezu byl dostačující.

Tabulka 4 Naměřené hodnoty s chladicí kapalinou 30 bar

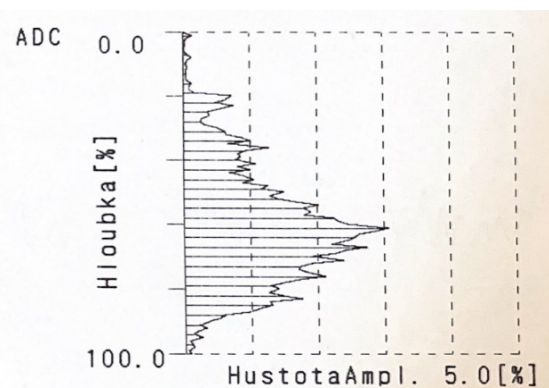
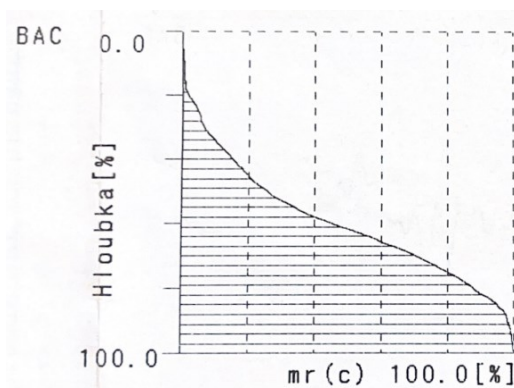
	Ra [μm]	Rz [μm]	x [mm]	y [mm]
1.	5,624	32,771	0,690	2,180
2.	6,418	33,561	0,680	2,190
3.	7,541	48,683	0,670	2,120
4.	5,071	28,385	0,690	2,090
5.	4,884	26,714	0,700	2,140
6.	6,479	36,106	0,690	2,170
7.	6,924	42,580	0,670	2,240
8.	5,987	36,169	0,710	2,140
9.	5,967	34,112	0,690	2,210
10.	6,193	33,386	0,700	2,130
průměr	6,109	35,247	0,689	2,161
Sm. Odchylka	0,803	6,408	0,013	0,045



Obrázek 39 Opotřebení břitové destičky- 30 bar



Obrázek 38 Zbarvení a tvar třísky- 30 bar



Obrázek 37 Materiálový podíl (vlevo) a amplitudová distribuce (vpravo) pro obrábění s chlazením o tlaku 30 bar

7.5 Výsledky s chlazením 40 bar

V tabulce č. 5 lze zpozorovat, že hodnoty Rz a Ra jsou nižší než v ostatních způsobech chlazení. Je to způsobeno odchylkou, popř. chybou při měření.

Tabulka 5 Naměřené hodnoty s chladicí kapalinou 40 bar

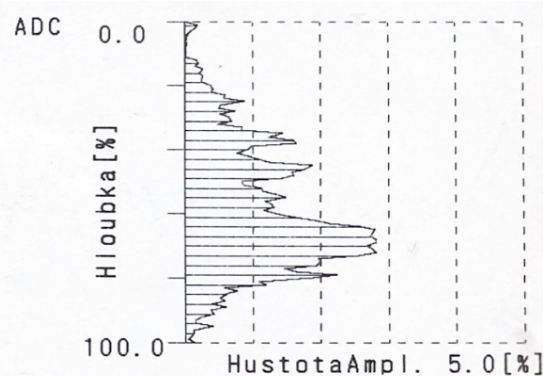
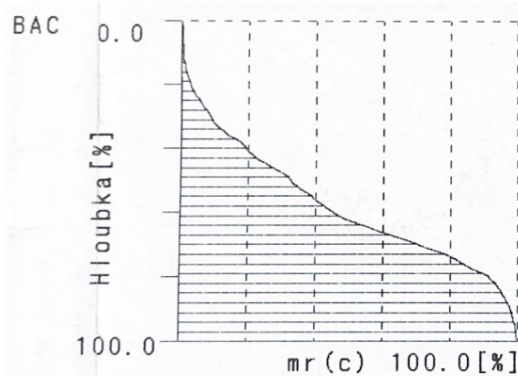
	Ra [μm]	Rz [μm]	x [mm]	y [mm]
1.	6,250	35,481	0,700	2,260
2.	4,417	23,906	0,710	2,120
3.	5,606	32,053	0,720	2,160
4.	5,206	24,973	0,650	2,080
5.	6,627	40,280	0,690	2,190
6.	6,195	33,513	0,690	2,200
7.	5,695	28,612	0,750	2,140
8.	4,539	26,654	0,660	2,160
9.	5,013	30,153	0,690	2,140
10.	5,392	32,207	0,670	2,200
průměr	5,494	30,783	0,693	2,165
Sm. Odchylka	0,730	5,017	0,029	0,050



Obrázek 42 Opotřebení břitové destičky- 40 bar



Obrázek 41 Zbarvení a tvar třísky- 40 bar



Obrázek 40 Materiálový podíl (vlevo) a amplitudová distribuce (vpravo) pro obrábění s chlazením o tlaku 40 bar

7.6 Výsledky s chlazením 50 bar

Při 50 a 60 barech jsou naměřené hodnoty a opotřebení velmi podobné. Zbarvení třísky je zde zcela minimální a její tvar je stále stejný. Naměřené hodnoty Ra a Rz (č.9) zvýrazněné červeně byly taktéž odstraněny po provedení Grubbova testu hrubých chyb.

Tabulka 6 Naměřené hodnoty s chladicí kapalinou 50 bar

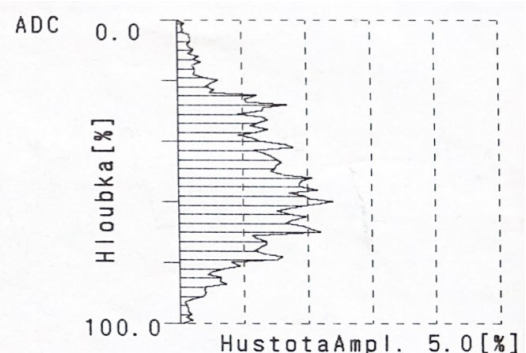
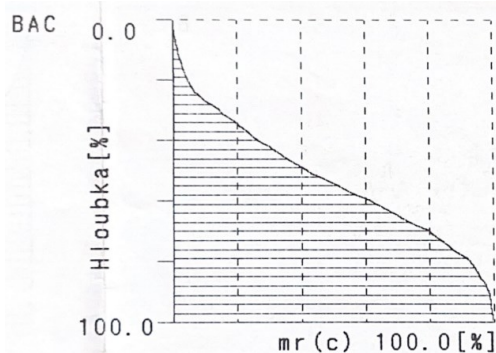
	Ra [μm]	Rz [μm]	x [mm]	y [mm]
1.	6,332	36,233	0,670	2,190
2.	5,449	32,979	0,630	2,200
3.	5,288	29,675	0,720	2,260
4.	6,803	40,120	0,670	2,240
5.	6,325	35,503	0,640	2,200
6.	5,572	33,283	0,680	2,210
7.	6,357	39,708	0,660	2,200
8.	6,033	33,769	0,740	2,180
9.	9,269	56,003	0,700	2,230
10.	6,345	31,845	0,630	2,200
průměr	6,377	36,912	0,674	2,211
Sm. Odchylka	1,124	7,465	0,037	0,025



Obrázek 45 Opotřebení břitové destičky- 50 bar



Obrázek 43 Zbarvení a tvar třísky- 50 bar



Obrázek 44 Materiálový podíl (vlevo) a amplitudová distribuce (vpravo) pro obrábění s chlazením o tlaku 50 bar

7.7 Výsledky s chlazením 60 bar

Tabulka 7 Naměřené hodnoty s chladící kapalinou 60 bar

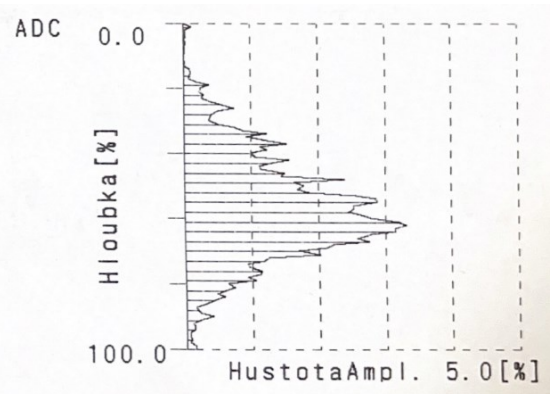
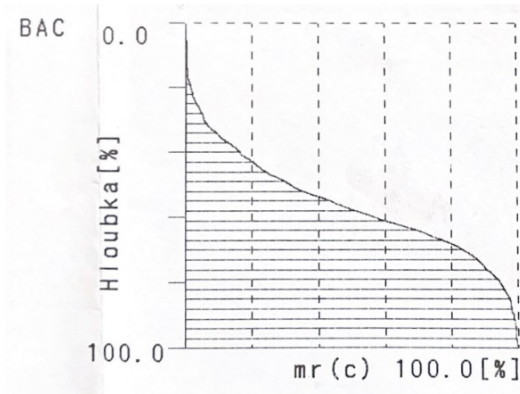
	Ra [μm]	Rz [μm]	x [mm]	y [mm]
1.	5,082	25,930	0,680	2,110
2.	7,839	41,415	0,680	2,110
3.	5,599	31,336	0,670	2,090
4.	8,151	52,559	0,680	2,100
5.	5,313	30,440	0,740	2,110
6.	4,892	29,114	0,760	2,080
7.	5,909	31,929	0,690	2,100
8.	5,391	28,217	0,680	2,100
9.	7,510	44,968	0,700	2,090
10.	6,024	29,791	0,690	2,110
průměr	6,171	34,570	0,697	2,100
Sm. Odchylka	1,206	8,697	0,029	0,011



Obrázek 46 Opatření břitové destičky- 60 bar



Obrázek 47 Zbarvení a tvar třísky- 60 bar



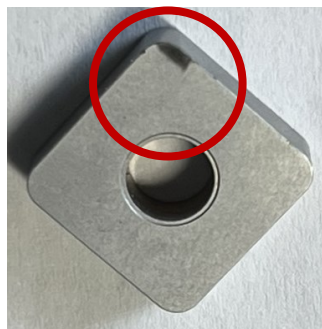
Obrázek 48 Materiálový podíl (vlevo) a amplitudová distribuce (vpravo) pro obrábění s chlazením o tlaku 60 bar

7.8 Výsledky s chlazením 70 bar

Při maximálním použitém tlaku v experimentu lze vidět, že tříška má chromovou barvu a došlo k jejímu lámání a lepšímu odvodu. Destička VBD má pouze zbarvenou část, kudy odcházela tříška, ale nemá žádné viditelné opotřebení na břitu.

Tabulka 8 Naměřené hodnoty s chladicí kapalinou 70 bar

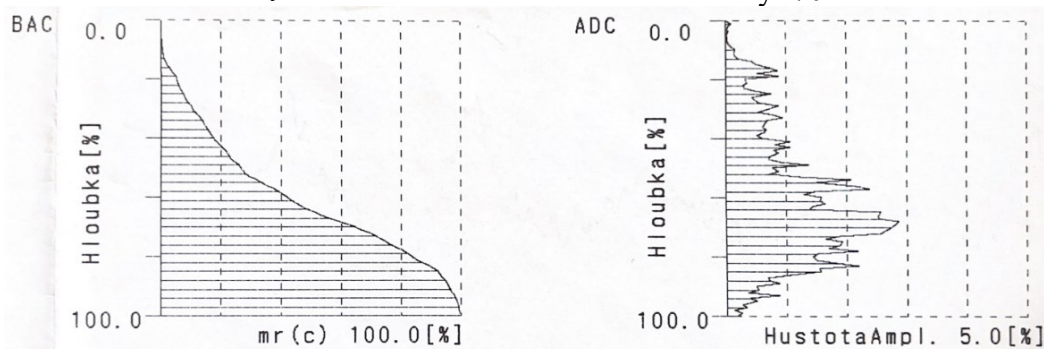
	Ra [μm]	Rz [μm]	x [mm]	y [mm]
1.	6,854	35,012	0,660	2,190
2.	5,247	27,726	0,670	2,190
3.	5,060	26,711	0,710	2,180
4.	5,606	34,358	0,690	2,150
5.	6,014	35,158	0,660	2,180
6.	6,285	33,021	0,660	2,110
7.	4,509	22,453	0,710	2,140
8.	6,770	43,179	0,670	2,150
9.	4,832	26,544	0,690	2,190
10.	5,261	29,098	0,700	2,110
průměr	5,644	31,326	0,682	2,159
Sm. Odchylka	0,808	5,978	0,020	0,032



Obrázek 51 Opotřebení břitové destičky- 70 bar



Obrázek 49 Zbarvení a tvar třísky- 70 bar



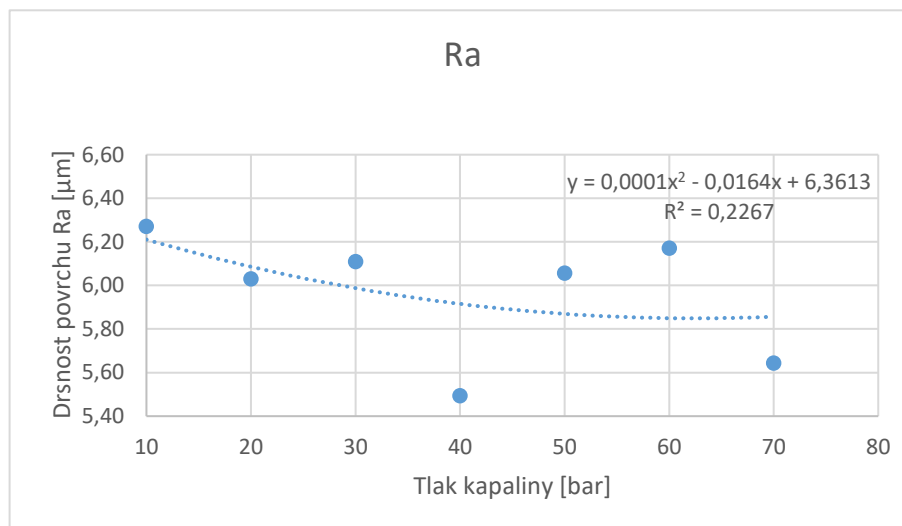
Obrázek 50 Materiálový podíl (vlevo) a amplitudová distribuce (vpravo) pro obrábění s chlazením o tlaku 70 bar

8 DISKUZE VÝSLEDKŮ

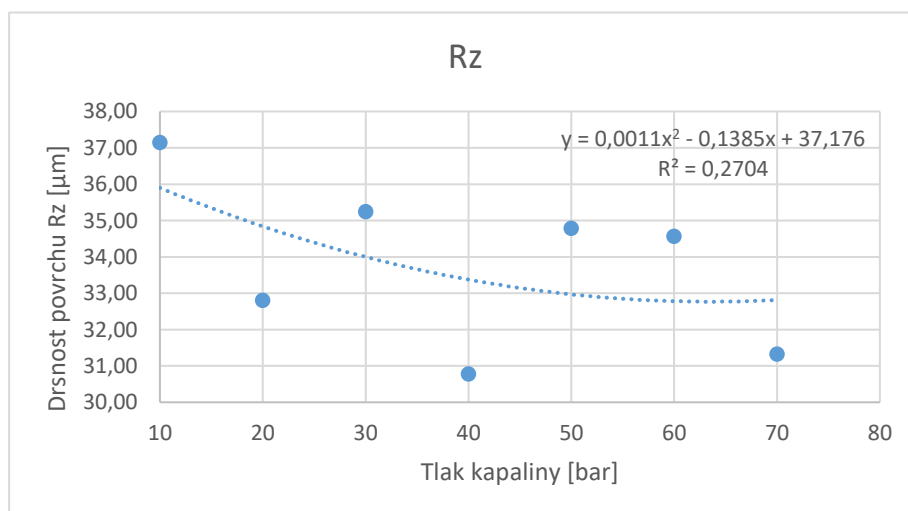
V této kapitole se budou porovnávat naměřené hodnoty, vloží se do grafů, proběhne diskuze a zhodnocení měření.

8.1 Drsnost povrchu v Ra a Rz

V tabulkách 1-8, lze vidět naměřené a zpracované hodnoty drsnosti povrchu v Ra a Rz. Již při pohledu na vypočtené průměry je patrné, že jak u obrábění bez chladicí kapaliny, tak i u obrábění s chladicí kapalinou o různých tlacích, nemají hodnoty žádnou posloupnost a rozdíly v nich nejsou závislé na tlaku procesní kapaliny. Pro lepší znázornění byly vyneseny průměry parametrů drsnosti povrchu do grafu (obrázek 51 a 52).

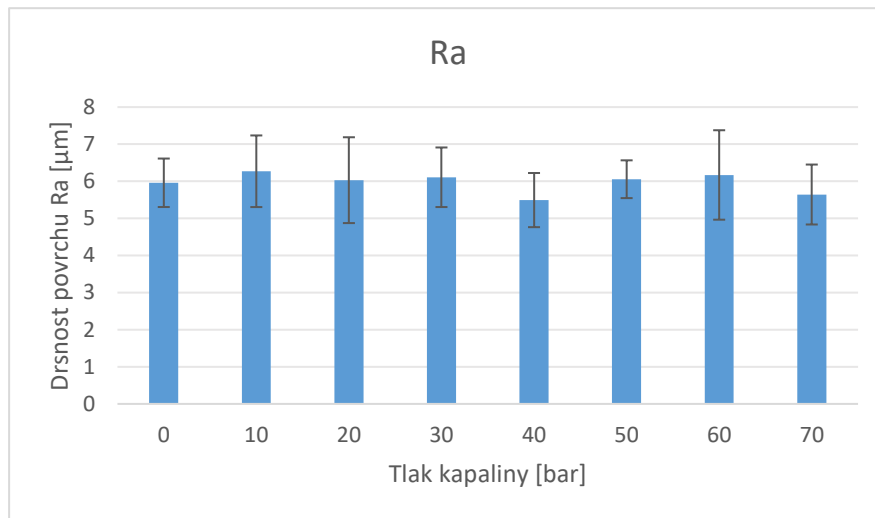


Obrázek 52 Vliv tlaku kapaliny na drsnost povrchu v Ra

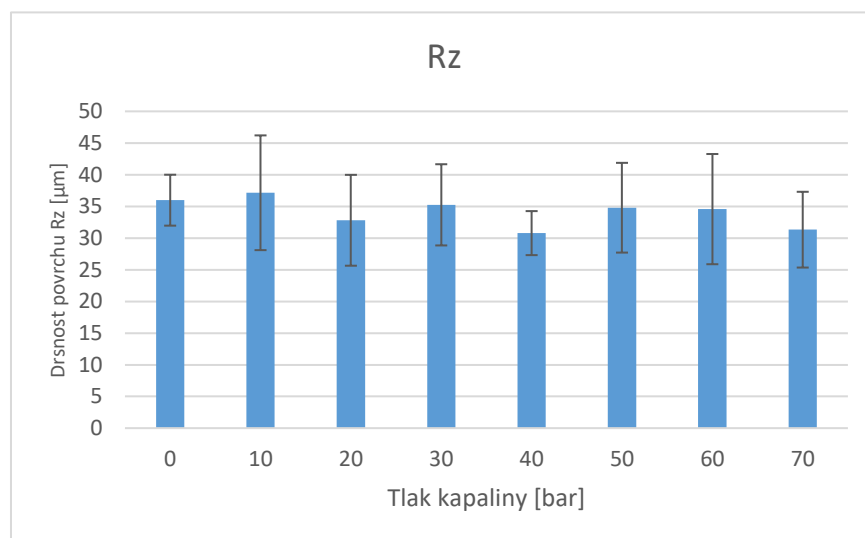


Obrázek 53 Vliv tlaku kapaliny na drsnost povrchu v Rz

V následujících grafech (obr. 53,54), se hodnoty Ra a Rz vynesly do sloupcových grafů pro viditelné znázornění chybové úsečky s pravděpodobností výsledku 68,27 %, vzniklé pomocí zadání směrodatné odchylky.



Obrázek 54 Závislost Ra na použitém tlaku s chybovými úsečkami



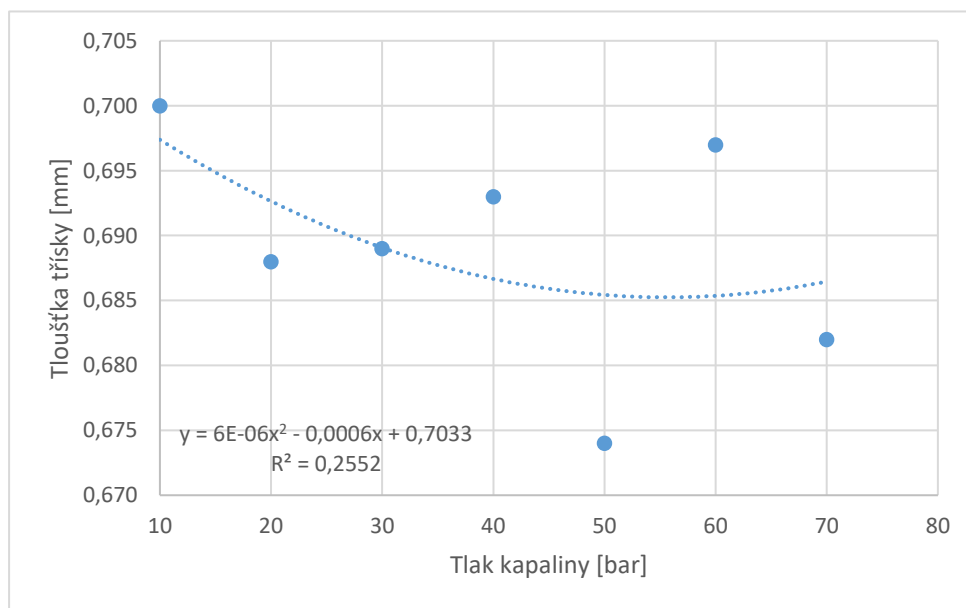
Obrázek 55 Závislost Rz na použitém tlaku s chybovými úsečkami

Hodnoty znázorněné v grafech nám říkají, že rozdíl mezi obráběním s chladicí kapalinou a bez chladicí kapaliny nemá vliv na povrch obrobku. Důvodem může být zvolení správných rezných podmínek, materiálu i výběr břitové destičky. Kdyby se během experimentu zvolila větší hloubka řezu ($1\text{ mm} < \dots$), lze spekulovat, že teplota v místě řezu by byla vyšší, což by znamenalo i větší opotřebení VBD s následným zhoršením povrchu materiálu.

8.2 Tvar a barva třísky

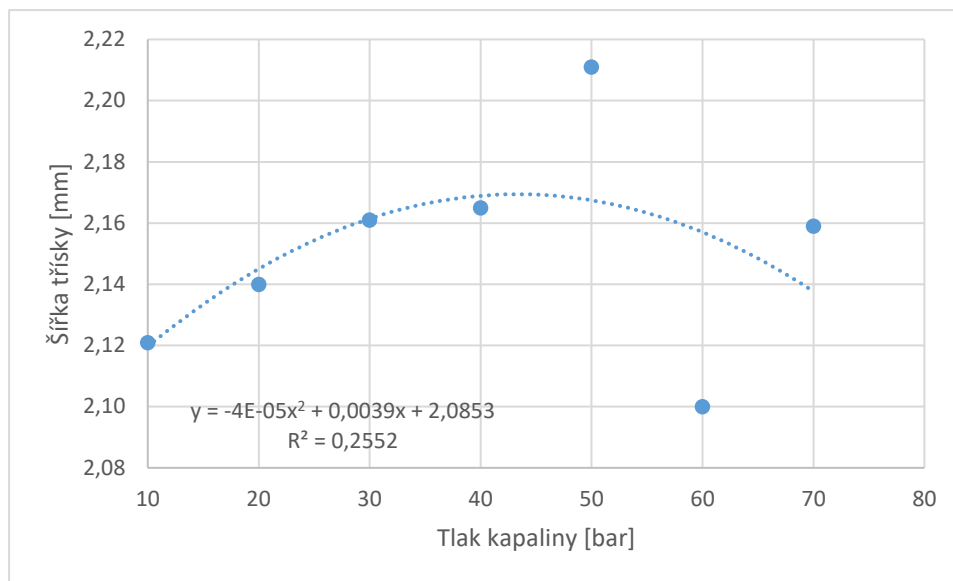
V kapitole 8.1-8.8 lze pozorovat zbarvení třísky při měnícím se tlaku procesní kapaliny. Je zde patrné, že při obrábění bez chladicí kapaliny, nebo při menším tlaku, je zbarvení výrazné. Důvodem je vysoká teplota v místě řezu, která neměla možnost odejít pomocí chladicí kapaliny, ale musela být odváděna v tříse. Jako další důvod může být špatně nasměrovaná tryska, což zapříčiní nepřesný přívod chladicí kapaliny do místa řezu, chlazení se zde stává neúčinné.

V následujících grafech (obr. 55,56) je znázorněn vliv tlaku kapaliny na tloušťku a šířku třísky. V prvním grafu (tloušťka třísky) je na první pohled je patrné, že rozdíly v naměřených hodnotách jsou náhodné a nemají žádnou posloupnost, tudíž tlak kapaliny zde neměl žádný vliv. Tříska se měřila na náhodných místech, tudíž rozdíly v hodnotách mohou být způsobeny místem měření. Grafy vychází ze zprůměrovaných hodnot, které jsou zapsány v tabulkách 1-8.



Obrázek 56 Vliv tlaku kapaliny na tloušťku třísky

V druhém grafu, lze vidět porovnání šířky třísky vůči různým tlakům chladicí kapaliny. Tříska bez chladicí kapaliny, která měla šířku 2,276 (viz. tab. 1) v porovnání s hodnotami v grafu není výrazně rozdílná. Proto tedy chladicí kapalina neměla velký vliv na šířku třísky.



Obrázek 57 Vliv tlaku kapaliny na šířku třísky

8.3 Opotřebení VBD

V kapitole 8.1-8.8 je možno vidět obrázky břitové destičky. Po vizuálním zhodnocení lze říct, že břitová destička má bez chlazení výrazné opotřebení na hlavním ostří a při dalším pokusu o obrobení plochy by mohlo dojít k její nevratné deformaci. Což by pro firmu znamenalo velkou spotřebu destiček a výrazně by se to odrazilo na ekonomice.

Při následném použití chlazení je vidět pouhým okem rozdíl na opotřebení destičky a již při tlaku 10 barů, můžeme říct, že obrábění je mnohem efektivnější. Stroj po spuštění chladící kapaliny měl mnohem menší vibrace, tudíž i opotřebení funkčních částí stroje, zde bylo nižší.

ZÁVĚR

Bakalářská práce se v teoretické části věnuje popisu a definici soustružení, dále rozdělení strojů a nástrojů. Detailněji potom popisuje druhy chladících kapalin, jejich vlastnosti a způsoby přivedení do místa řezu. Další problematikou, která je obsažena v teoretické části jsou jevy, které mohou při obrábění nastat (např. opotřebením nástroje, měření drsnosti povrchu, ...).

Hlavním cílem této bakalářské práce bylo zjistit, jaký vliv má chladící kapalina při obrábění na tvoření třísky, opotřebením nástroje a drsnost povrchu obrobku. V praktické části bylo nejprve popsáno příslušenství, které se při experimentu používalo. Experiment byl realizován na CNC obráběcím centru DMG MORI NTX 1000, kde probíhaly veškeré procesy obrábění. Pro měření drsnosti povrchu byl použit bezkontaktní měřicí přístroj s názvem Mitutoyo Surftest SJ-410, díky kterému se naměřily hodnoty Ra a Rz a následně vygenerovaly grafy materiálového podílu a amplitudové distribuce. Veškeré naměřené hodnoty v experimentu se zpracovaly do tabulek a provedl se Grubbsův test hrubých chyb, jenž vyřadil 3 hodnoty, které se už poté nepoužívaly k dalšímu zpracování.

Následně proběhla diskuze výsledků, kde se vytvořily grafy, pro lepší porovnání a zhodnocení experimentu. Grafy znázornily závislosti tlaků chladící kapaliny na drsnostech povrchu Rz a Ra, ve kterých lze vidět pouze nízký pokles drsností vlivem tlaku chladící kapaliny a lze říci, že kapalina a její tlak nemá vliv na drsnost a neprokázala zde žádnou efektivnost. Rozdíl mezi tím, jestli byla použita chladící kapalina nebo ne, se ukázal až při porovnání třísky u jednotlivých způsobů chlazení. Při obrábění bez kapaliny lze vidět výrazné zbarvení třísky, způsobené vysokou teplotou v místě řezu. Také zde byly pozorovány velké vibrace a funkční části stroje zde značně trpěly. Jelikož opotřebením břitové destičky bylo hodnoceno pouze vizuálně, nelze říct, jakým vlivem byla destička opotřebena. Jedním z důvodů může být vysoká teplota v místě řezu, což by mohlo znamenat nedostatek chladící kapaliny. Dalšími důvody mohou být např. zvolení nesprávné destičky vůči materiálu, špatná geometrie nebo špatné řezné podmínky.

Z experimentu vyplývá, že použití řezné kapaliny při obrábění, má význam z hlediska ekonomiky. Použití chladící kapaliny, je značně levnější, než nakupování nových břitových destiček a popř. servisování stroje.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] GRUBER, J., *Malé dějiny soustruhu* [online]. [cit. 2021-11-14]. Dostupné na WWW: http://www.spstr.pilsedu.cz/osobnistranky/josef_gruber/clanky/soustr.pdf
- [2] BÍLEK, Ondřej; LUKOVICS Imrich. *Výrobní inženýrství a technologie*. [cit. 2021-11-14]. Ve Zlíně: Univerzita Tomáše Bati, 2014, 173 s. ISBN 9788074544712.
- [3] MACHEK, Václav. *Kovové materiály 4: výroba a zpracování ocelí a litin*. [cit. 2021-11-14]. V Praze: České vysoké učení technické, 2015, 143 s. ISBN 9788001056868.
- [4] KOČMAN, Karel. *Technologické procesy obrábění*. [cit. 2021-11-18]. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011, 330 s. ISBN 9788072047222.
- [5] Osu; *Popis základních částí univerzálního soustruhu* [online]. [cit. 2021-11-18]. Dostupné z: <https://www.osu.cz/dokumenty/proportal/pdf/kpv/soustruzeni/02000.html>
- [6] MIČÍKOVÁ Iveta. *Pohyby při soustružení na čelním soustruhu* [online]. [cit. 2021-11-18]. Dostupné z: [www: http://slideplayer.cz/slide/2745448/](http://slideplayer.cz/slide/2745448/)
- [7] ITO, Y.; MATSUMURA, Takashi. *Theory and practice in machining systems*. Cham, Switzerland: Springer, 2017, 1 online resource (xii, 292 pages). [cit. 2021-11-20]. ISBN 3319852701.
- [8] CLARK, David A. *Metal Turning on the Lathe*. England: Crowood. 2013 [cit. 2021-11-20]. ISBN 9781847976413.
- [9] KOPECKÝ, Zdeněk. *Geometrie řezného klínu nástroje a jeho opotřebení* [online]. 2018 [cit. 2021-11-28]. Dostupné z: https://fraxinus.mendelu.cz/vyuka/soubory/TMZD_NMS/Povinne_predmety/Nastroje_a_procesy_obrazeni/pr03_Geometrie%20%C5%99ezn%C3%A9ho%20kl%C3%ADnu%20n%C3%A1stroje%20a%20jeho%20opot%C5%99eben%C3%AD.pdf
- [10] Osu; *Základní soustružnické nože a jejich popis* [online]. [cit. 2021-11-28]. Dostupné z: <https://www.osu.cz/dokumenty/proportal/pdf/kpv/soustruzeni/lekce3.htm>
- [11] TUMLIKOVO; *Geometrie břitu obecně*. [online]. 2011 [cit. 2021-11-28]. Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/geometrie-britu-obecne/>

- [12] SANDVIK; *Volba vhodných soustružnických břitových destiček* [online]. Sandvik Coromant [cit. 2021-11-28]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/general-turning/pages/how-to-choose-correct-turning-insert.aspx>
- [13] KOBLÁSA, Pavel. *CNC stroje a jejich programování při výuce na středních odborných školách*, 2016. Hradec Králové. [cit. 2021-11-28]. Dostupné také z: <https://theses.cz/id/277tdk/18994209>. Bakalářská práce. Univerzita Hradec Králové, Pedagogická fakulta.
- [14] SANDVIK; *Použití řezné kapaliny a chlazení při soustružení* [online]. Sandvik Coromant [cit. 2022-02-15]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/general-turning/pages/how-to-apply-coolant-and-cutting-fluid-in-turning.aspx>
- [15] RŮŽIČKA, Dalibor. *Technologie triskového obrábění*. 2018 [online]. [cit. 2022-02-15]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/68530434-Technologie-triskoveho-obrabeni.html>
- [16] RAVI, S., P. GURUSAMY a V. MOHANAVEL. *A review and assessment of effect of cutting fluids*. *Materials Today: Proceedings*. 2021, 37, 220-222 [cit. 2022-03-09]. ISSN 22147853.
- [17] SINGH, Jasjeevan, Simranpreet Singh GILL, Manu DOGRA a Rupinder SINGH. *A review on cutting fluids used in machining processes*. *Engineering Research Express*. 2021, 3 (1) [cit. 2022-03-09]. ISSN 2631-8695.
- [18] ABDELRAZEK, Ali H., I. A. CHOUDHURY, Yusoff , NUKMAN a S. N. KAZI. *Metal cutting lubricants and cutting tools: a review on the performance improvement and sustainability assessment*. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2020, 106(9-10), 4221-4245 [cit. 2022-03-09]. ISSN 0268-3768.
- [19] SINGH, Ramesh a Vivek BAJPAI. *Coolant and Lubrication in Machining*. In: NEE, Andrew Y. C., ed. *Handbook of Manufacturing Engineering and Technology*. London: Springer London, 2015, 2015-9-30, s. 981-1018 [cit. 2022-10-10]. ISBN 978-1-4471-4669-8.
- [20] SANDVIK.: *Vrtání hlubokých děr* [online]. [cit. 2023-05-01]. Dostupné z: <https://pdf.directindustry.com/pdf/sandvik-coromant-14460.html>

- [21] Konstrukter: *Výhody vnitřního chlazení* [online]. [cit. 2023-05-01]. Dostupné z: <https://www.konstrukter.cz/video-jake-jsou-vyhody-vnitřního-chlazení/>
- [22] Průmyslové spektrum: *Výroba a technologie* [online]. 2014 [cit. 2023-05-01]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/rozhodujici-je-pouziti-efektivního-chlazení>
- [23] NEE, Andrew: *Handbook of Manufacturing Engineering and Technology*. [cit. 2023-05-01]. London: Springer London 2014. ISBN 1447146697.
- [24] BRYCHTA, Josef et al.: *Technologie II*. [cit. 2023-05-01]. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava 2007. ISBN 978-80-248-1641-8.
- [25] SECO. *Přehled základních projevů opotřebení nástrojů pro obrábění kovů*. [online]. 2023 [cit. 2024-02-21]. Dostupné z: <https://www.secotools.com/article/122073?language=cs>.
- [26] ČEP, R., BRYCHTA, J., NOVÁKOVÁ, J., PETŘKOVSKÁ, L. *Technologie II - 1. díl*; 2007. [online]. [cit. 2024-02-28] Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/skripta_Technologie_II_1dil.pdf
- [27] DIMLA, E. *Sensor signals for tool-wear monitoring in metal cutting operations*. 2000. vol. 40, issue 8, [online]. [cit. 2024-02-29] Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695599001224?via%3Dihub>
- [28] VŠB; *Měření opotřebení nástrojů*. VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2014.[online]. [cit. 2024-02-29] Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_kapitola_05.pdf
- [29] BUMBÁLEK, Bohumil; ODVODY, Vladimír a OŠŤÁDAL, Bohuslav. *Drsnost povrchu*. [cit. 2024-03-19]. 1989, Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury.
- [30] ELUC. *Měření drsnosti povrchu*. [Online]. [cit. 2024-03-19]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1103>
- [31] KOČMAN, K.; PROKOP, J. *Technologie obrábění 2*. [cit. 2024-03-19]. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005. 270 s. ISBN 80-214-3068-0.
- [32] KOČMAN, Karel. *Speciální technologie. Obrábění*. [cit. 2024-03-19]. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. 227 s. ISBN 80-214-2562-8
- [33] TAY C.J, S.H Wang, C Quan, H.M Shang; *In situ surface roughness measurement using a laser scattering method*. [Online]. 2003 [cit. 2024-03-19] Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0030401803011027>

- [34] SINGH, Jasjeevan, Rupinder and Simranpreet; DORGA, Manu: *A review on cutting fluids used in machining processes*. [Online]. 2021 [cit. 2024-03-19] Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2631-8695/abeca0/pdf>
- [35] ČEP, R., PETRŮ, J.; *Opotřebení řezných nástrojů*. Ostrava 2013. [Online]. [cit. 2024-03-29] Dostupné z: https://projekty.fs.vsb.cz/463/edubase/VY_01_002/%C3%A9Avod%20do%20teorie%20obr%C3%A1b%C4%9Bn%C3%AD/02%20Text%20pro%20e-learning/%C3%A9Avod%20do%20teorie%20obrabeni%2004%20Opot%C5%99eben%C3%AD%20%C5%99ezn%C3%BDch%20n%C3%A1stroj%C5%AF.pdf
- [36] ELUC. *Chlazení a mazání*. [Online]. [cit. 2024-03-29]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1817>
- [37] T-PROM s.r.o. *Ocel ČSN 11 600*. [Online]. [cit. 2024-04-12]. Dostupné z: <https://www.tprom.cz/wiki/ocel/11600>
- [38] FILADA, Průmyslové zásobování. [Online]. [cit. 2024-04-12]. Dostupné z: <https://www.filada.cz/kraftwerk-posuvne-meridlo-150mm-001mm-digitalni>
- [39] GAMIN, *Technický list profilometru*. [Online]. [cit. 2024-04-18]. Dostupné z: https://www.elcometer.cz/fileadmin/user_upload/Prenosny_pristroj_na_mereni_drsnosti_povrchu_Mitutoyo_SJ_410_a_SJ_411.pdf
- [40] MEASUREMENT, [Online]. [cit. 2024-04-19]. Dostupné z: <https://measurementsupply.com/products/surface-roughness/mitutoyo/mitutoyo-4mn-sj-411-portable-surface-roughness-tester-178-581>
- [41] H.Y Kim; Y.F Shen; J.H Ahn; *Developement of a surface roughness measurement systém using reflected laser beam*. 2002 [Online]. [cit. 2024-04-19] <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0924013602007318>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

CNC	Počítačem řízené stroje
V_c	Řezná rychlost
HSS	Nástroje z rychlořezné oceli
VBD	Vyměnitelná břitová destička
A_α	Plocha hřbetu
A'_α	Plocha vedlejšího hřbetu
A_λ	Plocha čela
S	Hlavní řezná hrana
S'	Vedlejší řezná hrana
α	Hlavní úhel hřbetu
β	Úhel břitu
γ	Úhel čela
δ	Úhel řezu
CAD	Computer-aided design (počítačem podporované projektování)
CAM	Computer Aided Manufacturing (počítačová podpora obrábění)
NC	NC programem řízený stroj
MQL	Mikrolubrikace
ΔM	Úbytek hmoty
M1	Hmotnost nové destičky
M2	Hmotnost staré destičky
J	Joule
g	Gram
mm	Milimetr
μm	Mikrometr
nm	Nanometr

R_m	Mez pevnosti tahu
R_{es}	Mez kluzu ve smyku
R_{ms}	Mez pevnosti ve smyku
W	Objemový součinitel třísek
V_t	Objem volně uložených třísek
V_m	Objem odebraného materiálu
k_s	Součinitel přechování třísky
R_z	Průměrná hloubka
R_a	Aritmeticky průměrná odchylka
MPa	Megapascal
a_p	Hloubka třísky v mm
m/min	Metry za minutu
bar	jednotka tlaku
ČSN	česká technická norma
sin	sinus

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Proces soustružení [7].....	12
Obrázek 2 Univerzální hrotový soustruh [5].....	13
Obrázek 3 Čelní soustruh [6]	13
Obrázek 4 Hlavní části řezného klínu [10]	15
Obrázek 5 Hlavní řezné úhly soustružnického nože [11]	16
Obrázek 6 Vyplavování třísek při vrtání [15]	19
Obrázek 7 Životnost nástroje, při použití různých kapalin [36]	22
Obrázek 8 Porovnání volného přívodu a vnitřního chlazení (vpravo) [21]	25
Obrázek 9 Závislost vlivu opotřebení T_1, T_2, T_3, T_4 na řezné rychlosti $V_{c1}, V_{c2}, V_{c3}, V_{c4}$, pro konstantu kritického opotřebení V_B [35].....	27
Obrázek 10 Opotřebení na hřbetu nástroje [25].....	28
Obrázek 11 Vytvoření žlábků na čele [25].....	28
Obrázek 12 Nárůstky na břitu [25].....	29
Obrázek 13 Vyštipování ostří [25].....	29
Obrázek 14 Plastická deformace [25]	30
Obrázek 15 Tepelné trhliny [25]	30
Obrázek 16 Vrub na břitu [25].....	31
Obrázek 17 Odlomení břitu [25]	31
Obrázek 18 Měření opotřebení optickou metodou [26].....	33
Obrázek 19 Moderní profilometr [40].....	36
Obrázek 20 Bezkontaktní metoda měření drsnosti povrchu [30].....	37
Obrázek 21 Schéma jednotlivých druhů třísek [4].....	39
Obrázek 22 Hodnoty objemového koeficientu W pro vybrané druhy třísek [31].....	40
Obrázek 23 CNC stroj DMG MORI – NTX 1000	44
Obrázek 24 Břitové destičky	45

Obrázek 25 Profilometr Mitutoyo Surfes SJ-410	46
Obrázek 26 Digitální posuvné měřidlo [38].....	46
Obrázek 27 Schéma experimentu.....	48
Obrázek 28 Zbarvení a tvar třísky – bez chlazení.....	49
Obrázek 29 Materiálový podíl (vlevo) a amplitudová distribuce (vpravo) pro obrábění bez chlazení.....	49
Obrázek 30 Opotřebení břitové destičky – bez chlazení.....	49
Obrázek 31 Materiálový podíl (vlevo) a amplitudová distribuce (vpravo) pro obrábění s chlazením o tlaku 10 bar.....	50
Obrázek 32 Zbarvení a tvar třísky- 10 bar	50
Obrázek 33 Opotřebení břitové destičky- 10 bar	50
Obrázek 34 Materiálový podíl (vlevo) a amplitudová distribuce (vpravo) pro obrábění s chlazením o tlaku 20 bar.....	51
Obrázek 35 Zbarvení a tvar třísky- 20 bar	51
Obrázek 36 Opotřebení břitové destičky- 20 bar	51
Obrázek 37 Materiálový podíl (vlevo) a amplitudová distribuce (vpravo) pro obrábění s chlazením o tlaku 30 bar.....	52
Obrázek 38 Zbarvení a tvar třísky- 30 bar	52
Obrázek 39 Opotřebení břitové destičky- 30 bar	52
Obrázek 40 Materiálový podíl (vlevo) a amplitudová distribuce (vpravo) pro obrábění s chlazením o tlaku 40 bar.....	53
Obrázek 41 Zbarvení a tvar třísky- 40 bar	53
Obrázek 42 Opotřebení břitové destičky- 40 bar	53
Obrázek 43 Zbarvení a tvar třísky- 50 bar	54
Obrázek 44 Materiálový podíl (vlevo) a amplitudová distribuce (vpravo) pro obrábění s chlazením o tlaku 50 bar.....	54
Obrázek 45 Opotřebení břitové destičky- 50 bar	54

Obrázek 46 Opotřebení břitové destičky- 60 bar	55
Obrázek 47 Zbarvení a tvar třísky- 60 bar	55
Obrázek 48 Materiálový podíl (vlevo) a amplitudová distribuce (vpravo) pro obrábění s chlazením o tlaku 60 bar	55
Obrázek 49 Materiálový podíl (vlevo) a amplitudová distribuce (vpravo) pro obrábění s chlazením o tlaku 70 bar	56
Obrázek 50 Opotřebení břitové destičky- 70 bar	56
Obrázek 51 Zbarvení a tvar třísky- 70 bar	56
Obrázek 52 Vliv tlaku kapaliny na drsnost povrchu v Ra	57
Obrázek 53 Vliv tlaku kapaliny na drsnost povrchu v Rz	57
Obrázek 54 Závislost Ra na použitém tlaku s chybovými úsečkami	58
Obrázek 55 Závislost Rz na použitém tlaku s chybovými úsečkami	58
Obrázek 56 Vliv tlaku kapaliny na tloušťku třísky	59
Obrázek 57 Vliv tlaku kapaliny na šířku třísky	60

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Naměřené hodnoty bez chladící kapaliny	49
Tabulka 2 Naměřené hodnoty s chladící kapalinou 10 bar	50
Tabulka 3 Naměřené hodnoty s chladící kapalinou 20 bar	51
Tabulka 4 Naměřené hodnoty s chladící kapalinou 30 bar	52
Tabulka 5 Naměřené hodnoty s chladící kapalinou 40 bar	53
Tabulka 6 Naměřené hodnoty s chladící kapalinou 50 bar	54
Tabulka 7 Naměřené hodnoty s chladící kapalinou 60 bar	55
Tabulka 8 Naměřené hodnoty s chladící kapalinou 70 bar	56