



**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

DIPLOMOVÁ PRÁCE Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

**Teorie obrábění kovových materiálů bez
řezné kapaliny**

**Theory of machining of metallic
materials without cutting fluid**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2019

Bc. Jiří PLÁNSKÝ

Studijní program: N2301 STROJNÍ INŽENÝRSTVÍ

Studijní obor: 3911T035 VÝROBNÍ A MATERIÁLOVÉ INŽENÝRSTVÍ

Vedoucí práce: Ing. Lukáš Pelikán

SUCHÉ OBRÁBĚNÍ



**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

DIPLOMOVÁ PRÁCE Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem: „Teorie obrábění kovových materiálů bez řezné kapaliny“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Lukáše Pelikána a s použitím uvedené literatury na konci mé diplomové práce v seznamu použité literatury.

V Praze.....

Bc. Jiří Plánský:



Poděkování

Chtěl bych tímto poděkovat všem, kteří mi při vytváření této práce pomáhali. Především děkuji svému vedoucímu diplomové práce Ing. Lukáši Pelikánovi za věnovaný čas a cenné připomínky. Děkuji rovněž firmám Iscar a Shape Steel za dodání všeho potřebného pro uskutečnění experimentu. Děkuji také svým blízkým za podporu při tvorbě této diplomové práce.



Abstrakt (Anotace)

Tato diplomová práce se zabývá problematikou obrábění kovových materiálů bez řezné kapaliny neboli problematikou suchého obrábění. Práce pojednává o výhodách, nevýhodách a důvodech k použití technologie suchého obrábění. Dále se věnuje doporučením při aplikaci suchého obrábění pro základní technologie - frézování, broušení, soustružení a vrtání. Zabývá se také vhodnými nástrojovými povlaky a jejich vlivem na životnost. Práce rovněž vyhodnocuje opotřebení vrtáků po obrábění za sucha a s použitím řezné kapaliny. Experimentální část této práce se zabývá oblastí vhodného utváření třísky při technologii vrtání.

Abstract (Annotation)

This diploma thesis deals with machining of metallic materials without cutting fluid also called as dry machining. It assesses advantages, disadvantages and reasons for using dry machining. It also covers recommendations for dry machining for basic technologies – milling, grinding, turning and drilling. The appropriate tool coatings and their impact on durability are appraised and the wear of drills after machining with and without cutting fluid is evaluated as well. The experimental part of this work tries to determine optimal area for chip formation in drilling technology.



DIPLOMOVÁ PRÁCE Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

Obsah

1	Úvod	1
2	Teorie obrábění bez řezné kapaliny	2
2.1	Výhody suchého obrábění	2
2.1.1	Parametry ovlivňující trvanlivost bříty a obrobitelnost	3
2.2	Nevýhody suchého obrábění	4
3	Kvazi - suché obrábění (MQL).....	5
4	Problémy vznikající u obrábění s řeznými kapalinami	6
4.1	Náklady na řezné kapaliny	6
5	Podmínky a obecná doporučení u suchého obrábění	7
5.1	Podmínky suchého obrábění	7
5.1.1	Minimalizace tepla v oblasti řezu	7
5.1.2	Odvod třísek.....	8
6	Využití suchého obrábění u základních technologií	9
6.1	Technologie suchého frézování ocelí	9
6.2	Technologie suchého soustružení ocelí	9
6.3	Technologie suchého vrtání ocelí	10
7	Nástrojové povlaky vhodné pro suché obrábění	10
7.1	Povlakování řezných nástrojů	10
7.2	Vliv povlakování nástrojů na jejich trvanlivost a životnost	11
7.2.1	Tvrdost	11
7.2.2	Koeficient tření	12
7.2.3	Odolnost proti oxidaci	13
7.2.4	Tepelná a chemická stálost.....	14
7.3	Vhodné nástrojové povlaky u základních technologií obrábění	14
7.4	Nástrojový povlak TiAlN	15

SUCHÉ OBRÁBĚNÍ



DIPLOMOVÁ PRÁCE Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

7.5	Nástrojový povlak CrAlN	15
7.6	Nástrojový povlak na bázi Al ₂ O ₃ - Duratomic	16
8	Teorie opotřebení nástroje.....	17
8.1	Opotřebení břitu nástroje.....	18
8.2	Formy opotřebení	19
8.2.1	Plastická deformace břitu nástroje	19
8.2.2	Hřbet a jeho opotřebení	20
8.2.3	Opotřebení hřbetu ve tvaru vrubu.....	20
8.2.4	Opotřebení čela ve tvaru žlábků.....	21
8.2.5	Hřbenovité trhliny na nástrojovém ostří.....	21
8.2.6	Vydrolování nástrojového ostří	21
8.2.7	Lom břitu nástroje	22
8.2.8	Únavový lom nástroje	22
8.3	Druhy opotřebení.....	23
8.3.1	Abrázivní opotřebení.....	24
8.3.2	Adhezní opotřebení.....	24
8.3.3	Difuzní otěr.....	26
8.3.4	Oxidační otěr.....	26
9	Teorie tvorby třísky při obrábění za sucha	27
9.1	Fyzikální základy procesu řezání.....	27
9.2	Plastická deformace v oblasti utváření třísky.....	28
9.2.1	Primární plastická deformace	30
9.2.2	Sekundární plastická deformace	31
9.2.3	Terciární plastická deformace.....	33
9.3	Tvorba třísky	33
9.4	Poznatky z tvorby třísky při suchém obrábění.....	33

SUCHÉ OBRÁBĚNÍ



DIPLOMOVÁ PRÁCE Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

9.5.1	Druhy tvářených třísek.....	34
9.5.2	Součinitel pěchování třísky	35
9.5.3	Objemový součinitel třísek.....	37
10	Experimentální část – Vhodné utváření třísky při vrtání.....	38
10.1	Pětiosé svislé frézovací centrum – Okuma MU – 400V II	38
10.1.1	Okuma MU – 400V II – Technická data	39
10.2	Vrták ISCAR Suchodam DCN A s korunkou ISCAR ICP 210	42
10.3	Polotovar S 960 QL	44
10.4	Průběh experimentu	45
10.5	Digitální mikroskop Keyence VHX – 6000.....	49
10.6	Korunka Iscar po vrtání za sucha – Měření na mikroskopu	51
10.7	Korunka Iscar po vrtání s chladicí kapalinou – Měření na mikroskopu.....	54
11	Měření tloušťek třísek pomocí mikrometru Mahr.....	56
12	Měření průměrů třísek pomocí posuvného měřítka MarCal	59
13	Měření drsnosti děr	62
13.1	R - Parametry drsnosti	63
13.1.1	R _p - Největší výška výstupku profilu	63
13.1.2	R _v - Největší hloubka prohlubně profilu	63
13.1.3	R _z - Největší výška profilu.....	63
13.1.4	R _c - Průměrná výška prvků profilu.....	63
13.1.5	R _t - Celková výška profilu.....	64
13.1.6	R _a - Průměrná aritmetická úchylna posuzovaného profilu.....	64
13.1.7	R _m (R _{max}) - Největší výška nerovností	66
13.2	Měření drsnosti děr pomocí drsnoměru Marsurf PS 10	66
13.3	Zhodnocení měření drsnosti – R _a , R _z a R _{max}	74
14	Experiment – Třísky utvářené při vrtání sady děr za sucha.....	75



DIPLOMOVÁ PRÁCE Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

14.1	Vrtání sady děr za sucha – Zhodnocení	84
15	Experiment – Třísky utvářené při vrtání sady děr s použitím chladicí kapaliny.	86
15.1	Vrtání sady děr s použitím chladicí kapaliny – Zhodnocení	93
16	Oblast vhodného utváření třísky při vrtání.....	95
16.1	Oblast vhodného utváření třísky při vrtání - Zhodnocení	98
17	Závěr	99



1 Úvod

V současné době jsou v oblasti třískového obrábění nejvýraznějšími trendy například suché obrábění, využívání metody MQL neboli metody minimálního množství procesní kapaliny, obrábění tvrdých a těžkoobrobitelných materiálů a obrábění za vysokých rychlostí (řezných i posuvových). Tyto technologie se ubírají společným směrem dalšího vývoje ve vztahu k maximalizaci odebíraného objemu za jednotkový čas, minimalizaci výrobních nákladů nebo snižování ekologického zatížení životního prostředí. Neustálý pokrok a aplikace inovativních přístupů a metod při řešení konkrétních technologických zadání jsou dány zejména vývojem v oblastech řezných nástrojů, obráběcích strojů a softwarů na tvorbu NC programů. Tyto oblasti rovněž vytvářejí hlavní omezující podmínky technologií třískového obrábění.

Řezné nástroje se neustále vyvíjejí a zdokonalují. Proto lze na stále širší spektrum obráběných materiálů a řezných parametrů aplikovat suché nebo málo mazané (kvazi suché) obrábění, tvrdé obrábění či vysokorychlostní obrábění (HSC).

Ve strojírenství je obrábění kovů jednou z nejvýznamnějších technologií výroby. Hlavním cílem při využívání technologie suchého obrábění je zvýšení trvanlivosti řezných nástrojů a získání co nejlepší rozměrové přesnosti a kvality povrchu obrobku. V této problematice je důležitá jak volba řezného materiálu a úprava řezných podmínek, tak změna prostředí obráběcího procesu s použitím procesní kapaliny.

Z množství provedených studií vyplývá, že náklady na aplikaci procesních kapalin se pohybují v rozmezí 7 až 17 % nákladů na výrobu vztažených na jeden výrobek. To je někdy i více než náklady na řezné nástroje. V posledních letech tak zaznamenáváme snahu o minimalizaci nákladů vydaných na procesní kapaliny a jejich nahrazení suchým obráběním.



2 Teorie obrábění bez řezné kapaliny

Většina obráběcích operací je doprovázena přívodem procesní kapaliny. Ovšem náklady na likvidaci těchto kapalin po jejich využití rostou. Objevuje se tedy metoda, která je zaměřená na minimalizaci množství procesních kapalin na výrobních linkách. Snaha omezit tuto problematiku s likvidací procesních kapalin vede k uplatňování suchého obrábění neboli obrábění bez procesních kapalin. To lze uplatnit pouze za předpokladu, že bude doručena obráběním za sucha stejná jakost obrobku a stejné náklady na obrobení jako při obrábění s chlazením chladicí kapalinou. [1]

Užíváním procesních kapalin mnohdy dosáhneme potřebných výsledků v trvanlivosti nástrojů, jakosti obrobku v jeho rozměru, tvaru i struktury povrchu. Procesní kapaliny přispívají k lámání a odvodu třísky, což je žádoucí. [4]

Využívání procesních kapalin a jejich likvidace nicméně vyvolávají značné ekologické a zdravotní problémy. Problematikou je rovněž bezpečnost práce a ochrana pracovního prostředí. Tyto skutečnosti také přispívají k vyšším ekonomickým nákladům. Suché obrábění se využívá zejména při soustružení, frézování a do určité míry i při vrtání. [3]

Jedním z hlavních přínosů suchého obrábění je snížení nákladů na pořízení procesních kapalin, jejich následnou filtraci, recyklaci a likvidaci. Z hlediska ekologie se jedná o čisté řešení, které je nakloněno neustále se zvyšujícím požadavkům legislativy na hospodárnost a výrobní ekologičnost. Nicméně ne vždy lze obrábět bez procesní kapaliny. Dá se předpokládat, že omezením používání řezné kapaliny mohou klesnout náklady na obrábění o 10 až 15 %. [2] [5]

2.1 Výhody suchého obrábění

Vzhledem ke způsobu obrábění, materiálu nástroje a obráběné součásti je obrábění bez řezné kapaliny vhodné jen za specifických podmínek. Někdy je bezkapalinové obrábění velmi příznivé, například při tvrdém obrábění HM (Hard Machining) nebo při obrábění vyššími řeznými rychlostmi HSC (High Speed Cutting). Takto se obrábějí materiály velmi tvrdé a odolné proti opotřebení, které umožňují použití řezné keramiky s řeznou rychlostí až $1000 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$. Suché



DIPLOMOVÁ PRÁCE Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

obrábění s použitím řezné keramiky je vhodné zejména pro vysokou citlivost keramiky na tepelné šoky. [6]

Při obrábění oceli mají výrazný vliv vysoké teploty během řezání, avšak při obrábění šedé litiny a hliníku s vysokým obsahem křemíku bývá podstatnější abrazivní otěr břitu. Značný sklon k adhezi u měkčích slitin hliníku způsobuje časté nalepování třísek na břit i na obrobek. Je zřejmé, že v závislosti na způsobu obrábění a druhu obráběného materiálu je dosahováno různých trvanlivostí břitu s použitím procesní kapaliny a bez ní. [1]

Suchým obráběním lze dosáhnout značných úspor poklesem výrobních i provozních nákladů. Nejprve ubydnou náklady nutné na nákup procesních kapalin, jejich recyklaci a následnou likvidaci po ukončení jejich používání. Dále odpadnou investice spojené se zařízením pro manipulaci, s čištěním a skladováním procesních kapalin, což představuje velmi náročný rizikový proces, a sice riziko úniku kapaliny včetně její následné ekologické likvidace.

Přechodem na metodu obrábění za sucha lze získat čistší a zdraví prospěšnější dílny s menšími provozními náklady a úsporou skladovacích prostor. V případě eliminace procesních kapalin nedochází k rozprašování řezné kapaliny, a tedy ke vzniku mastného povlaku na pracovišti. Naopak registrujeme kvalitnější pracovní i životní podmínky a práce se stává bezpečnější. Zároveň odpadá nutnost čištění a odmašťování obrobků před dalšími následnými operacemi. Zmiňovanou metodou je možné dosáhnout zkrácení vedlejšího výrobního času a snížení rizika vzniku alergických reakcí pracovníků u obráběcích strojů. [1] [6]

2.1.1 Parametry ovlivňující trvanlivost břitu a obrobitelnost

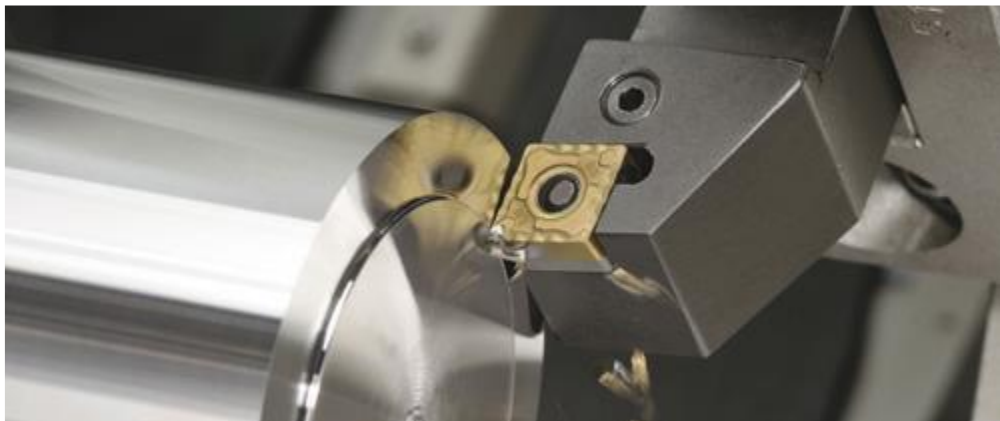
Podle způsobu obrábění a druhu materiálu obrobku se vyskytují značné rozdíly v trvanlivosti břitu mezi obráběním za sucha a s procesní kapalinou. Frézováním za sucha se u většiny materiálů dosahuje vyšších trvanlivostí břitu než při obrábění s chlazením procesními kapalinami. Jen při frézování hliníku může být trvanlivost břitu značně nižší kvůli vysoké adhezi materiálu obrobku (třísky) na břit. Soustružením a vrtáním za sucha se obvykle dosahuje nižších trvanlivostí břitu než za použití procesních kapalin. Děje se tak z důvodu vyšších teplot řezání při nepřerušovaném řezu. Zatížení změnami teploty se při plynulém řezu téměř nevyskytuje, jelikož břit



DIPLOMOVÁ PRÁCE Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

nevychází opakovaně ze záběru. Procesní kapaliny mění jen teplotní pole nástroje, ale samotný břit prudce neochlazuje. [3]

Vhodných předpokladů pro obrábění za sucha lze dosáhnout u obráběných materiálů zlepšením jejich obrobitelnosti, kupříkladu použitím vhodných dezoxidačních příměsí při metalurgické výrobě oceli. Oceli dezoxidované pomocí SiCa s příměsí hliníku obsahují měkké a tvárné hliníkaty vápníku, které se při teplotě řezání taví a působí jako mazadlo a ochranný povlak na povrchu břitu. Díky tomu lze zvýšit trvanlivost břitu až o 400 %. Na obrázku č. 1 lze vidět ukázkou soustružení za sucha. [4]



Obr. 1.: Soustružení za sucha. [19]

2.2 Nevýhody suchého obrábění

Suché obrábění se doporučuje jen tam, kde lze zaručit stejnou jakost obrobku, trvanlivost nástroje a čas obrábění jako při použití procesních kapalin.

Některé výrobní metody stále nelze ekonomicky realizovat bez použití procesní kapaliny. Zejména obrábění žáruvzdorných slitin za nízkých rezných rychlostí. Chlazení a mazání součástí procesní kapalinou je nutné například u frézování hlubokých drážek, protahování nebo výrobě ozubení odvalovacím způsobem.

U výroby vysoce přesných součástí je mnohdy použití procesních kapalin žádoucí z důvodu rozměrové přesnosti a povrchové kvality. Při dokončování korozivzdorné oceli a hliníku nedochází díky chlazení procesní kapalinou k zadírání malých částic do obrobeného povrchu. Použití procesních kapalin zajistí také odvod prachu, který vzniká například při obrábění šedých a tvárných litin. Alternativním



DIPLOMOVÁ PRÁCE Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

řešením je odvod prachu pomocí odsávání. Suché obrábění se zpravidla nepoužívá při vrtání hlubokých děr. Pro vrtání hlubokých děr lze využít metody kvazi - suchého obrábění MQL (Minimum Quantities of Lubricant).

Problematické je také vrtání, vystružování a řezání závitů do šedé litiny, slitin hliníku či do některých typů oceli. Komplikované je také čelní frézování, zejména slitin hliníku. U těchto případů se vyplatí použít metodu MQL. [4] [7]

3 Kvazi - suché obrábění (MQL)

Nelze-li použít suché obrábění, přechází se často k využití kvazi – suchého obrábění. Jedná se o metodu minimálního množství mazání MQL (Minimum Quantity Lubrication), jejímž principem je redukce procesní kapaliny na minimum množství kapaliny pro mazání kontaktních ploch třísky a nástroje.

Po použití metody MQL zůstanou nástroje, obrobky i třísky téměř suché a bez nánosu procesní kapaliny. Nejsou zde nutné další technologické postupy pro odstranění procesních kapalin z třísek či obrobku. Metodu MQL lze částečně považovat za suché obrábění, jelikož náklady potřebné k likvidaci procesní kapaliny jsou velmi nízké. Použitím moderních řezných nástrojů v kombinaci s metodou MQL dochází ke značnému zlepšení lubrikačních vlastností. Tenká a homogenní vrstva mazacího média vytvořená na břitu nástroje nebo povrchu obrobku vytváří tepelně izolační bariéru, která snižuje přestup tepla z obrobku do nástroje. Tímto způsobem se zlepšuje jeho odolnost a trvanlivost.

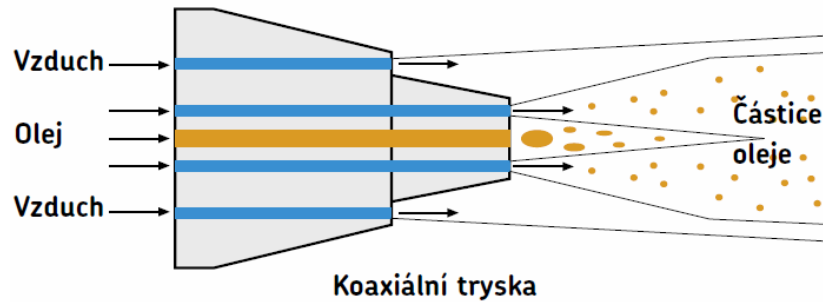
U metody MQL je velmi důležitý způsob přívodu média do oblasti řezu. Existuje několik základních způsobů přívodu MQL média do místa řezu: kontinuální přívod, přívod vnitřkem nástroje rovnou do místa řezu nebo nanesení média na povrch obrobku před obráběním. Způsoby aplikace se liší v závislosti na rozsahu výroby a její automatizaci.

Metoda MQL, známá také jako mazání mlhou, vpotřebuje méně než 50 -150 ml média za hodinu obrábění. I přes tuto skutečnost však mohou vytvářející se aerosoly způsobovat problémy spojené s hygienou pracovního prostředí, tudíž se často vyžaduje dostatečné oddělení pracovního prostoru obráběcího stroje od

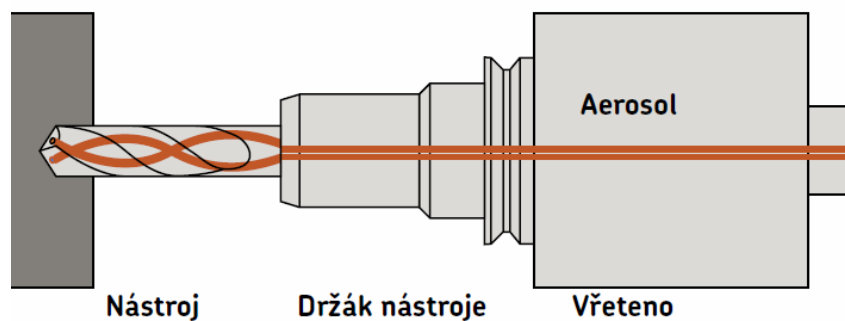


DIPLOMOVÁ PRÁCE **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**

okolí a odsávání vytvořeného aerosolu účinnými filtry. Díky tomuto postupu se ovšem investiční náklady zvýší. [4] [8]



Obr. 2.: MQL – Mazání externě. [8]



Obr. 3.: MQL – Mazání vnitřkem nástroje. [8]

4 Problémy vznikající u obrábění s řeznými kapalinami

Nevýhodou obrábění s řeznými kapalinami je komplikované technologické vybavení procesu a zvýšení výrobních nákladů. Značný význam mají rovněž ekologická a zdravotní hlediska, a to nejen z legislativních důvodů, ale zejména z hlediska nákladů na likvidaci případných ekologických havárií a zdravotních odškodnění. Důležitou omezující okolností v používání řezných kapalin představuje rozšiřování zákonných předpisů o manipulaci s chemickými látkami. Aktuálním trendem v obrábění je úsilí o minimalizaci používání procesních kapalin. Dynamický pokrok v technologii obrábění a zejména nové řezné materiály to již umožňují. [9] [10]

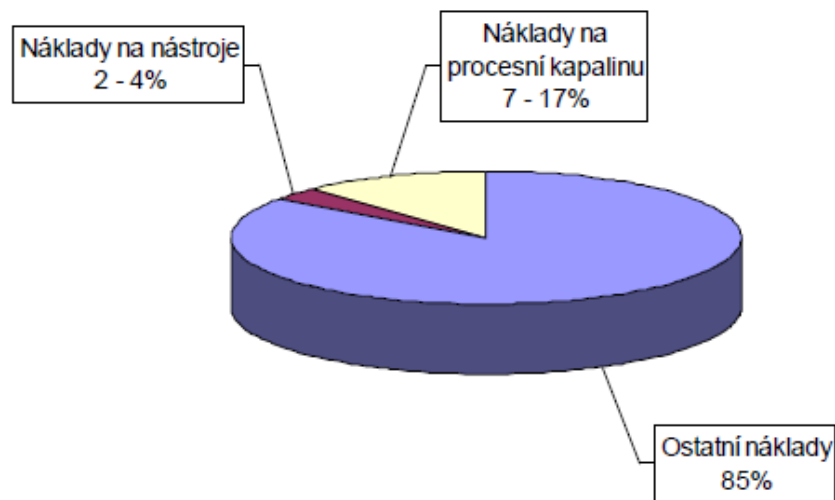
4.1 Náklady na řezné kapaliny

Náklady na aplikaci řezných kapalin na transferových obráběcích linkách se mnohdy pohybují v rozmezí 7 až 16 % výrobních nákladů na jeden obrobek. To je výrazně více, než se dříve předpokládalo. Průměrné náklady na řezné nástroje



DIPLOMOVÁ PRÁCE Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

se pohybují okolo 2 až 4 %. Další problematikou jsou náklady spojené se zpracováním třísek obsahujících zbytky řezných kapalin a náklady související s čištěním dokončených obrobků. Tyto skutečnosti upozorňují na nárůst negativních stránek používání umělých řezných prostředí a potřebu toto eliminovat. I z hlediska přímých a nepřímých nákladů na obrábění je zřejmé, že obrábění za sucha je za současných podmínek mnohdy výhodnější než obrábění za použití umělých řezných prostředí. [9]



Obr. 4.: Náklady na procesní kapalinu a nástroje při výrobě. [19]

5 Podmínky a obecná doporučení u suchého obrábění

Následující kapitoly pojednávají o podmínkách a obecných doporučeních při aplikaci suchého obrábění. Základem je snaha o minimalizaci tepla vznikajícího v oblasti řezu a efektivní tvorbu a odvádění třísek z oblasti řezu.

5.1 Podmínky suchého obrábění

Při obrábění za sucha je nutné provést analýzu pracovních podmínek, která má ukázat, jak se řezný proces vyrovná s minimalizací chlazení. Jde o řešení komplexního systému interakce materiálu obrobku s nástrojem. Podstatný je také materiál obrobku a nástroje, druh operace, řezné podmínky, obráběcí stroj, finální rozměrová či tvarová přesnost a vlastnosti povrchové vrstvy obrobku s případným zbytkovým pnutím. [4]

5.1.1 Minimalizace tepla v oblasti řezu

Základní problematikou u suchého obrábění je teplo vznikající v zóně řezu. Proto je vhodné dodržovat různé technologické předpoklady. Lze například využít



DIPLOMOVÁ PRÁCE Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

moderní řezné materiály s vysokou tepelnou stabilitou. Je vhodné používat povlakované nástroje, nástroje s pozitivní geometrií a nové kontrolní a regulační systémy obráběcích strojů. Tyto systémy umožňují kontrolovat a usměrňovat vysoké tepelné zatížení obráběcího procesu.

Teplo vznikající v oblasti řezu lze snížit například používáním tvarově přesných polotovarů – polotovarů s tvarovou podobností hotového obrobku (technologie „Near-Net-Shape-Technology“), kdy se z důvodu menšího objemu obráběného materiálu minimalizuje i množství vzniklého tepla.

U dokončování je nutné zajistit minimalizaci vznikajícího tepla přecházejícího do obrobku, aby se obrobek nedeformoval a byla dodržena přesnost tvarová i rozměrová. Tohoto lze docílit volbou vhodných řezných podmínek.

U soustružení lze vznikající teplo přestupující do obrobku minimalizovat zvýšením posuvu a hloubky řezu - průřezu odebírané vrstvy. Také u frézování je vhodné zvýšit posuv na zub, ale zejména používat sousledné frézování omezující tření hřbetu břitu o plochu řezu.

Zvýšením řezné rychlosti lze snížit množství tepla odváděného obrobkem, pokud je řezný materiál dostatečně tepelně odolný. Poté dojde ke zvýšení objemu tepla odváděného třískami a k minimalizaci plasticity obráběného materiálu v oblastech vzniku třísky, čímž se sníží plastické deformace. Tento způsob je využíván u vysokorychlostního obrábění HSC. [7]

5.1.2 Odvod třísek

Absence čistícího účinku procesní kapaliny - odplavování třísek, může způsobovat zahlcování a zaslepování oblasti pro třísky. Zejména u vrtáků, závitorezných a brusných nástrojů, někdy i fréz. Jakmile se zpevněné třísky dostanou mezi břit a obrobek a jsou opět řezány, znehodnocují obrobené plochy i nástrojové břity. Tento problém lze řešit odsáváním, případně odfukováním třísek tlakovým vzduchem. S odfukováním se ovšem pojí problém zafukování kovového prachu do ložisek, vodících ploch nebo šroubů. Efektivita odvodu třísek vzduchem značně závisí na velikosti použitého tlaku vzduchu.

K lepšímu odvodu třísek přispívá i změna polohy nástroje vůči obrobku, obrábění zespodu obrobku nebo lépe při vodorovném umístění vřetena frézky či vrtačky. Vyšší teplota řezání je příznivá pro zlepšení plasticity odřezávaného



DIPLOMOVÁ PRÁCE Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

materiálu třísky a jednodušší deformaci. Snížení řezných sil má při nepřerušovaném řezu nepříznivý vliv na třísku, která je stuhovitá nebo smotaná. V tomto případě se využívají speciální utvářeče a tvary drážek pro třísky u vrtáků tak, aby nedocházelo při suchém obrábění k zahlcování třískami. Z důvodu odstraňování třísek jsou konstruovány upínací přípravky a některé skupiny obráběcího stroje – lože či suporty. [7]

6 Využití suchého obrábění u základních technologií

V následujících kapitolách je blíže specifikováno konkrétní využití obrábění za sucha a možnosti uplatnění u základních technologií, jako je například frézování, soustružení nebo vrtání ocelí.

6.1 Technologie suchého frézování ocelí

Při suchém frézování slinutým karbidem se zpravidla dosahuje větší trvanlivosti břitu frézy než při frézování s chlazením kapalinou. Příčinou je nižší střídavé tepelné zatěžování břitu frézy. Horký břit již není po výběhu z řezu prudce ochlazen procesní kapalinou. Proto se i s dalšími velmi tvrdými řeznými materiály, jako je cermet a kubický nitrid boru, obrábí zpravidla za sucha.

Naopak u frézování slitin hliníku může docházet k výraznému snížení trvanlivosti břitu. Příčinou je vliv vysoké adheze obráběného materiálu na břit nástroje. [11]

6.2 Technologie suchého soustružení ocelí

V případě soustružení za sucha má břit obvykle nižší trvanlivost než při použití procesních kapalin. Trvanlivost břitu se snižuje díky vyšší teplotě řezného procesu při nepřerušovaném řezu. Při plynulém řezu se zatížení tepelnými šoky zpravidla nevyskytuje, jelikož břit opakovaně nevybíhá ze záběru. Procesní kapalina sice snižuje teplotní pole nástroje, ale samotný břit prudce neochlazuje.

V důsledku plynulého řezu při suchém soustružení ocelí představuje hlavní problematiku vysoká tepelná zátěž břitu. Řezný materiál musí odolávat zvýšené teplotě řezání, požadavky na pevnost v ohybu bývají obvykle méně důležité. [7]



6.3 Technologie suchého vrtání ocelí

Velkou problematikou suchého vrtání je spolehlivý odvod třísky z vrtané díry. Riziko napěchování třísky v drážce vrtáku roste s hloubkou vrtané díry. U vrtáků pro obrábění za sucha je důležitá optimalizace tvaru průřezu drážky, zejména její zvětšení, které poskytuje třísce více prostoru a snižuje tření o stěny díry. Důležitý je také tvar vznikající třísky, proto je nutné, aby byl vhodně navržen tvar břítu, především čela.

Nedostatečným odvodem tepla při vrtání za sucha dochází k vyšší tepelné zátěži vrtáku. Ta způsobuje nižší trvanlivost břitů a odolnost řezného materiálu vůči opotřebením. Kvůli tepelné roztažnosti nástroje může způsobit i zadření vrtáku ve vrtané díře. Proto se používají vrtáky s větší kuželovitostí směrem ke stopce vrtáku.

U nástrojů s destičkami ze slinutých karbidů se osvědčila úprava destiček slinutých karbidů tryskáním zrn oxidu hliníku o velikosti 12 až 14 mm. V povrchové vrstvě dochází k plastické deformaci, která zvýší odolnost destičky slinutého karbidu proti opotřebením. [7] [11]

7 Nástrojové povlaky vhodné pro suché obrábění

V dalších odstavcích se věnuji problematice povlakování řezných nástrojů se zaměřením na suché obrábění. Speciální pozornost si žádá zejména vliv povlakování nástrojů na jejich trvanlivost a životnost.

7.1 Povlakování řezných nástrojů

V technologiích povlakování řezných nástrojů zaznamenáváme trendy především ve vytváření nových a odolnějších vrstev s lepšími vlastnostmi. Spektrum nabízených povlaků se rozšiřuje o úplně nové nebo modifikované povlaky. Kombinace různých vrstev i metod povlakování (PVD a CVD) v rámci jednoho povlaku umožňuje další specializaci povlaků na konkrétní technologie, čímž se docílí zvýšení užitečných vlastností povlaků.

Vedle tradičních povlaků na bázi TiN, TiCN, AlTiN nebo CrAlSiN lze komerčními povlakovacími zařízeními připravit množství různých úprav povlaků specializovaných na konkrétní technologie výroby. K nejnovějším úpravám patří



DIPLOMOVÁ PRÁCE Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

oxidické $(Al,Cr)_2O_3$ nebo oxidicko-nitridové $(Al,Cr)(O,N)$ vrstvy, které jsou velmi odolné proti oxidaci a vhodné jako jedna z vrstev na nástrojích pracujících za vysokých teplot (do 1000 °C) při obrábění za sucha.

Novým povlakem je také druhá generace DLC povlaku (diamond like carbon). Povlak DLC se při obrábění využívá zejména při obrábění superslitin, niklových slitin a jeho další modifikace pak pro obrábění titanových a hliníkových slitin.

Důležitá je také příprava ostří před povlakováním a po něm. Příprava nepovlakovaných nástrojů se zakládá na vyhlazení a zaoblení ostří. Výsledkem je zpevnění břitu, zvýšená přilnavost povlaku, lepší jakost obrobeného povrchu. Takto se až několikanásobně prodlouží trvanlivost břitu. Úpravu břitu je ale nutné uzpůsobit materiálu obrobku. Úpravou břitu po povlakování se vytváří zaoblení ostří, čímž se sníží vylamování břitu ve větším objemu díky velkému pnutí na ostří břitu. Úprava břitu po povlakování je významná především u vrtáků. [12] [13]

7.2 Vliv povlakování nástrojů na jejich trvanlivost a životnost

Nástrojové povlaky jsou specifické svými fyzikálními a chemickými vlastnostmi. Mezi základní fyzikální vlastnosti nástrojových povlaků patří tvrdost, tloušťka, drsnost, adheze a kluzné vlastnosti. Nejvýznamnějšími chemickými vlastnostmi povlaků nástrojů jsou odolnost vůči oxidaci, tepelná a chemická stálost.

7.2.1 Tvrdost

U suchého obrábění je velmi důležitá tvrdost povlaku kvůli odolnosti k opotřebení abrazí. V tabulce č. 1 uvádím hodnoty tvrdosti různých typů povlaků, přičemž lze říct, že se zvyšující se tvrdostí roste zároveň i odolnost k abrazivnímu opotřebení. Velmi dobrých výsledků dosahují vrstvy na bázi Al, tedy TiAlN, TiAlSiN a DLC povlaky. [12]



Povlak	Tvrдость v GPa
CrN	17
TiN	23
TiCN	30
TiAlN	33
TiAlSiN	45
DLC	60

Tab. 1.: Tvrдость různých typů povlaků. [20]

7.2.2 Koeficient tření

Důležitou problematikou při obrábění je tření mezi třískou a nástrojem. Při suchém obrábění, kde chybí mazací účinek procesní kapaliny, je vliv koeficientu tření zvláště důležitý. Snižováním tření na čele nástroje se zvyšuje odpovídajícím způsobem úhel roviny maximálních smykových napětí a také se snižuje tloušťka třísky. Celý tento proces je z hlediska energetické náročnosti výhodnější a namáhání nástroje je menší.

Snížení tření mezi nástrojem a obrobkem lze docílit vhodným výběrem materiálu nástroje, tedy vhodným typem tvrdého otěruvzdorného a teplotně odolného povlaku. Tyto povlaky snižují tření mezi břitem a obrobkem a mění tepelný režim v oblasti vzniku třísky. Svými izolačními účinky minimalizují tepelnou zátěž substrátu břitu a zvyšují podíl tepla odváděného třískou.

Koeficienty tření pro různé povlaky jsou uvedeny v tabulce č. 2. Výborných hodnot dosahují povlaky DLC, příznivé kluzné vlastnosti mají i povlaky na bázi Al. [7]



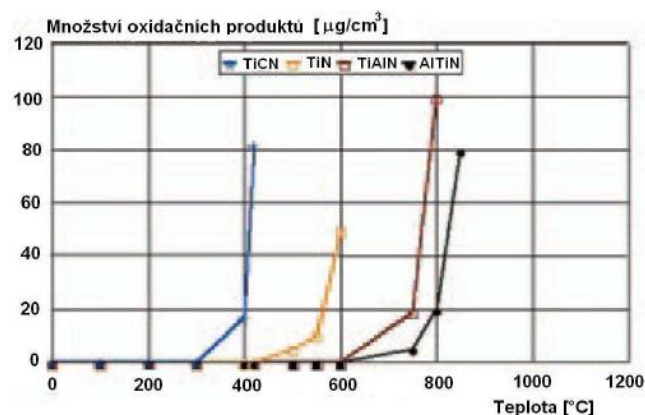
Povlak	Koeficient tření [μ] (proti oceli za sucha)
TiN	0,4
CrN	0,5
TiCN	0,4
TiAlN	0,4
TiAlSiN	0,32
DLC	0,1

Tab. 2.: Koeficienty tření různých typů povlaků. [20]

7.2.3 Odolnost proti oxidaci

Každý povlak charakterizuje maximální teplota použití, jejíž mez je určena odolností vůči oxidaci. Během povrchové oxidace dochází k pasivaci povrchu. Při hloubkové oxidaci ovšem dochází ke znehodnocení povrchové vrstvy.

Závislost oxidační odolnosti různých povlaků na teplotě znázorňuje obrázek č. 5. Vynikajících výsledků dosahují povlaky (TiAl)N a zejména (AlTi)N. Oba tyto povlaky se v současnosti stávají dominantními na slinutých karbidech a jejich využití při suchém obrábění se doporučuje. Velice příznivých parametrů dosahují rovněž povlaky z nanokrystalických kompozitních materiálů na bázi (TiAlSi)N pro substráty z jemnozrnného slinutého karbidu. Křemík přidávaný do těchto vrstev zlepšuje odolnost proti otěru. [7]



Obr. 5.: Závislost oxidační odolnosti různých povlaků na teplotě. [20]



7.2.4 Tepelná a chemická stálost

Tepelná stálost popisuje odolnost proti změně vnitřní struktury za zvýšení teploty vlivem obrábění, kdy může docházet k růstu krystalů, přechodu k jinému krystalickému uspořádání nebo změně vnitřního napětí.

Chemická stálost představuje odolnost povlaku k chemické reakci s obráběným materiálem, a to především za vyšších teplot vznikajících během obrábění. Chemickou stabilitu lze měnit dle typu obráběného materiálu a rezných podmínek. Typickým příkladem je diamantová vrstva, jejíž chemická stabilita je zcela nevyhovující pro obrábění ocelí a zároveň vynikající pro obrábění neželezných kovů. Srovnání vlastností různých povlaků uvádím prostřednictvím tabulky č. 3. [12]

Nejlepší ↑ Nejhorší	Chemická stabilita	Odolnost proti oxidaci	Tvrdość	Tvrdość za tepla
	Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	TiC	Al ₂ O ₃
	(TiAl)N	(TiAl)N	(TiC)N	(TiAl)N
	TiN	TiN	Al ₂ O ₃	TiN
	(TiC)N	(TiC)N	(TiAl)N	(TiC)N
	TiC	TiC	TiN	TiC

Tab. 3.: Srovnání různých vlastností povlaků. [20]

7.3 Vhodné nástrojové povlaky u základních technologií obrábění

U technologie frézování se povlakování břitů realizuje metodou PVD nebo lépe MT CVD, neboť příliš nezvyšují poloměr zaoblení ostří. Nejvýraznější zlepšení poskytuje povlak (TiAl)N díky značné tvrdosti i za vysokých teplot. Naopak (TiC)N nabízí lepší využití u frézování za použití procesních kapalin.

U technologie soustružení, zejména při dokončovacím soustružení, se doporučuje používat cermety s ochrannou vrstvou z (TiC)N, polykrystalického kubického nitridu bóru (PKNB) nebo z oxidické keramiky. Při hrubovacích operacích jsou vhodnější houževnatější slinuté karbidy s ochrannou vrstvou Al₂O₃, nanesené pomocí metody CVD.



DIPLOMOVÁ PRÁCE Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

U technologie vrtání se vhodnou volbou ochranné vrstvy, například z TiN, snižuje tření třísek o boky drážky vrtáku. Vysoké požadavky se kladou na kvalitní zakotvení vrstvy povlaku. Po přebroušení opotřebovaného břítu, typicky u vrtáku ze slinutého karbidu, dochází k roztírání kobaltového pojiva po broušeném povrchu a nově nanesená vrstva nemá dostačující adhezi vzhledem k substrátu. Před nanesením vrstvy je nezbytné provádět mikrotryskání, které příznivě působí na trvanlivost břítu, zvýšení přesnosti díry a drsnosti povrchu. [7] [11]

7.4 Nástrojový povlak TiAlN

V současnosti patří povlak TiAlN k jednomu z nejpoužívanějších povlaků v moderním, vysoce výkonném obrábění. Díky své dobré tepelné a chemické odolnosti je vhodný i pro obrábění za sucha. Povlaky TiAlN odolávají oxidaci a v porovnání s povlakem TiN zvyšují produktivitu až o 20 - 35 %. Tvrdost povlaku se pohybuje okolo 3000 HV a maximální pracovní teplota je až 800 °C. Některé vrstvy TiAlN obsahují i příměsi Cr, Y nebo Hf. V malém množství mají tyto příměsi pozitivní vliv na strukturu vrstev a přispívají ke zlepšení užitečných vlastností. Vývoj těchto systémů je motivován vysokými ekologickými a ekonomickými přínosy v oblasti produktivních řezných aplikací, kde je značný vývin tepla, například při obrábění za sucha nebo vysokorychlostním obrábění. [14]



Obr. 6.: Nástroje (VBD) s povlakem TiAlN. [23]

7.5 Nástrojový povlak CrAlN

Povlak CrAlN bez přítomnosti Ti má výbornou chemickou stabilitu při vysokých teplotách a dále zvýšenou adhezi k substrátu. Maximální teploty použití, při nichž dochází k masivní oxidaci vrstev CrAlN, se pohybují v rozmezí 700 až 800 °C. V případě vytvoření oxidační ochranné bariéry Al-Cr-O mohou být maximální pracovní teploty i vyšší. Tvrdost nových vrstev Cr-Al-N se pohybuje okolo 3000 HV a je tudíž srovnatelná s povlaky TiAlN. V některých aplikacích s vysokými



DIPLOMOVÁ PRÁCE Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

nároky na tepelnou stabilitu a chemickou odolnost se předpokládá, že vhodně doplní vrstvy na bázi TiAlN. Povlak CrAlN je alternativou k povlakům TiAlN. [14]

7.6 Nástrojový povlak na bázi Al₂O₃ - Duratomic

Povlak Duratomic (Durable + Atomic) se připravuje technologií na bázi speciálního uspořádání atomů hliníku a kyslíku zajišťující vysokou pevnost a odolnost proti abrazi. I když je oxid v některém směru orientace atomů křehčí, v jiném směru orientace atomové struktury se vyznačuje vyšší tvrdostí a houževnatější. Toho se využívá při řezání. Řízená struktura oxidu hlinitého garantuje vyšší kvalitu povrchu povlaku, což se projevuje minimalizací tření a tepelného zatížení při řezání. Plošky na zrnech tohoto povlaku brání tvorbě nárůstků na břitu a zvyšují kvalitu obrobeného povrchu. Povlak má příznivý vliv na opotřebení a zvyšuje trvanlivost nástroje, který lze využít i při obrábění korozivzdorných ocelí. Lepší teplotní poměry v oblasti řezu se projeví menším opotřebením čela i deformací břitu a vyšší trvanlivostí. Povlak Duratomic je výborný pro soustružení ocelí, včetně korozivzdorných ocelí. [16]

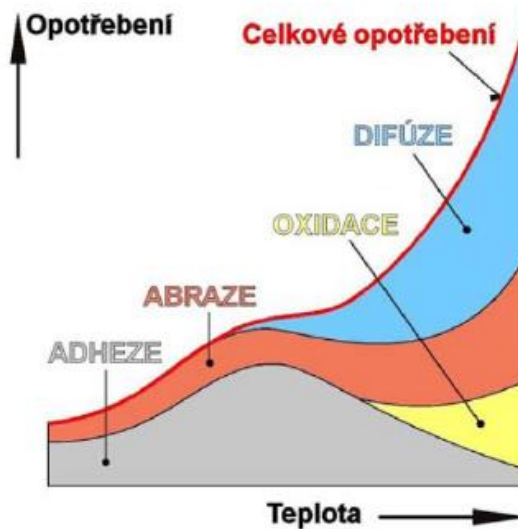


Obr. 7.: VBD s povlakem Duratomic. [15]

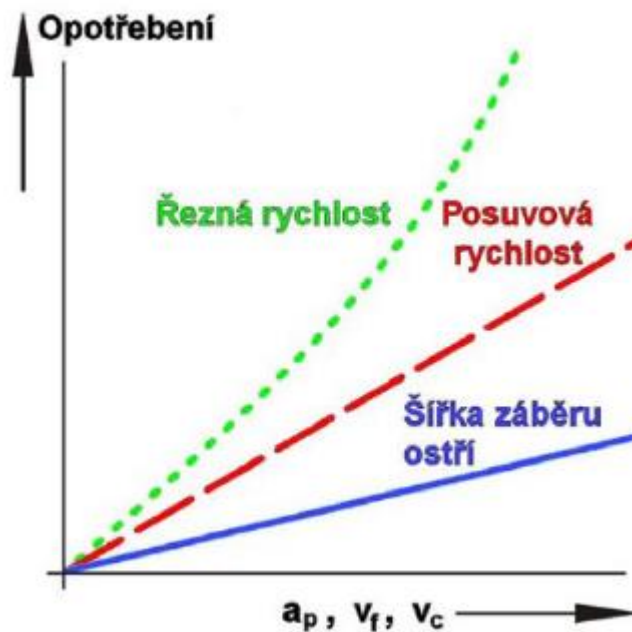


8 Teorie opotřebení nástroje

Teorie opotřebení nástroje je klíčová v oblasti ekonomiky obráběcího procesu u nástrojového hospodářství. Opotřebení nástroje může nabývat různých forem a druhů. Mezi základní mechanismy opotřebení patří abrazivní, adhezní, difúzní, oxidační opotřebení a také lom břitu nástroje.



Obr. 8.: Vliv teploty na jednotlivé mechanismy opotřebení nástroje. [20]

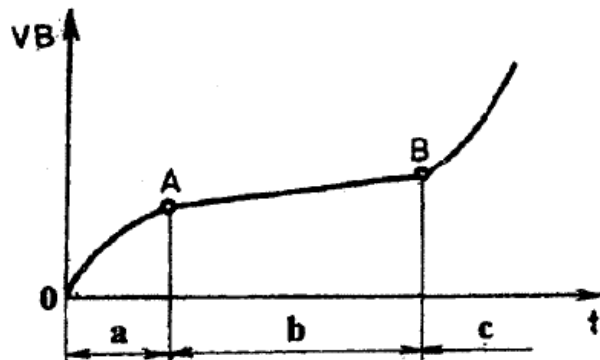


Obr. 9.: Vliv řezných podmínek na opotřebení nástroje. [20]



8.1 Opotřebení břitu nástroje

Opotřebení břitu nástroje při řezání je důsledkem otěru mikročástic materiálu nástroje z ploch čela a hřbetu. Při obrábění dochází k zatěžování břitu vysokými tlaky a vysokou teplotou. Velká tepelná i mechanická zátěž břitu zapříčiňuje jak strukturní změny na povrchu břitu, tak změny mechanických vlastností. Kombinací mechanických, tepelných, chemických a abrazivních účinků dojde k zatěžování břitu nástroje, což se projeví jeho opotřebením. Opotřebení nástroje představuje postupný proces, při němž se zvyšuje poloměr ostří, zhoršuje se drsnost plochy čela odcházející třískou a hřbetu s plochou řezu. Geometrie břitu se rapidně mění. [17]



Obr. 10.: Průběh opotřebení v čase. [17]

Průběh opotřebení v čase je možné popsat třemi oblastmi:

Oblast a představuje oblast zrychleného záběhového opotřebení. V této oblasti opotřebení výrazně roste. Zrychlené opotřebení je spojené se záběhem nástroje a je zapříčiněno vysokým měrným tlakem na vrcholcích mikronerovností povrchu hřbetu.

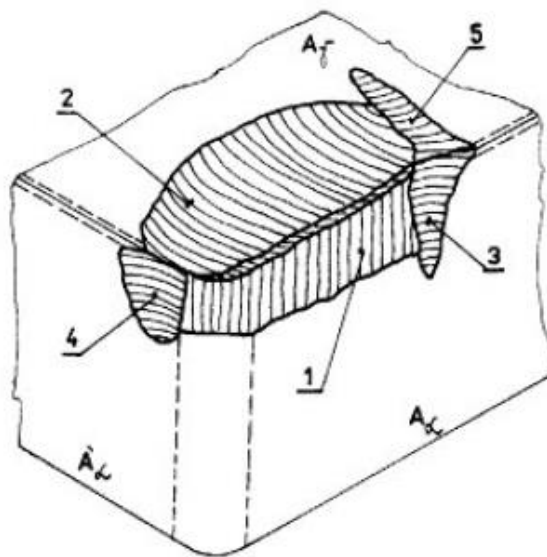
Oblast b reprezentuje oblast lineárního opotřebení. V této oblasti je nárůst opotřebení lineární a intenzita opotřebení konstantní.

Oblast c je oblastí zrychleného nadměrného opotřebení. V této oblasti opotřebení nabírá značných hodnot. Opotřebením se výrazně mění geometrie břitu nástroje a velikosti řezných sil. Působením vysokých tlaků a teploty se snižuje tvrdost řezného materiálu a dochází k plastické deformaci nebo křehkému lomu. [17]



8.2 Formy opotřebení

Opotřebení nebo otěr břitu má různé formy, odvíjející se podle materiálu obrobku a použitých řezných podmínek, tedy řezné rychlosti, tloušťce třísky a úhlu řezu. Opotřebení břitu v závislosti na technologických podmínkách řezného procesu nabývá různých forem.

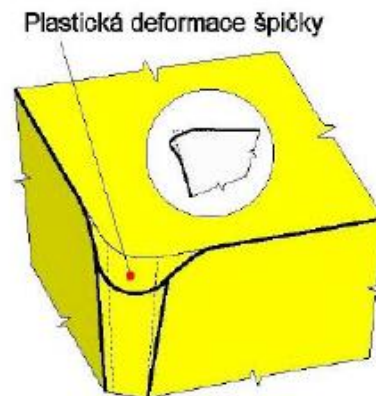


Obr. 11.: Formy opotřebení nástroje ze slinutých karbidů. [17]

- 1 – fazetka opotřebení na hřbetě nástroje
- 2 – výmol na čele nástroje
- 3 – primární hřbetní rýha
- 4 – sekundární (oxidační) hřbetní rýha
- 5 – rýha na čele nástroje

8.2.1 Plastická deformace břitu nástroje

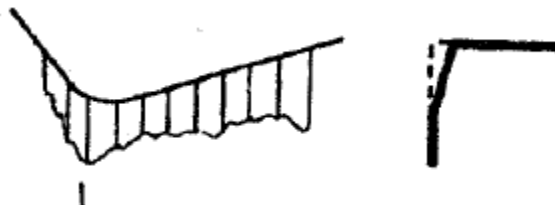
Plastická deformace břitu nástroje vzniká vlivem kombinace vysokých teplot a tlaků na břitu. Velké řezné rychlosti a posuvy způsobují vznik vysokých teplot a tlaků. Plastická deformace ještě výrazněji zvyšuje teploty, mění geometrii břitu a odvod třísky. Plastická deformace vzniká při obrábění všemi nástrojovými materiály za dosažení určité teploty v některé z oblastí stykových ploch mezi nástrojem a obrobkem. Dosažením této teploty prudce poklesne tvrdost řezného materiálu v důsledku strukturních změn. Plastickou deformaci lze minimalizovat vhodným zaoblením ostří a volbou geometrie břitu. [17]



Obr. 12.: Plastická deformace. [21]

8.2.2 Hřbet a jeho opotřebení

Opotřebení hřbetu patří mezi abrazivní formy opotřebení. Plochy hřbetu u hlavního ostří, vedlejšího ostří a poloměru špičky jsou před utvářením třísky, v průběhu utváření i po něm, vystaveny vlivu materiálu obrobku. Přílišné opotřebení hřbetu způsobuje zhoršení kvality obrobku, nepřesnosti rozměrů a vzrůstající tření, které vzniká změnou geometrie břitu. [18]



Obr. 13.: Opotřebení hřbetu. [17]

8.2.3 Opotřebení hřbetu ve tvaru vrubu

Opotřebení hřbetu ve tvaru vrubu představuje typické adhezivní opotřebení. Může ovšem souviset také s oxidačním opotřebením. Značné opotřebení hřbetu ve tvaru vrubu má vliv na utváření třísky a někdy vede až k lomu destičky. [18]



Obr. 14.: Opotřebení hřbetu ve tvaru vrubu. [17]



8.2.4 Opotřebení čela ve tvaru žlábků

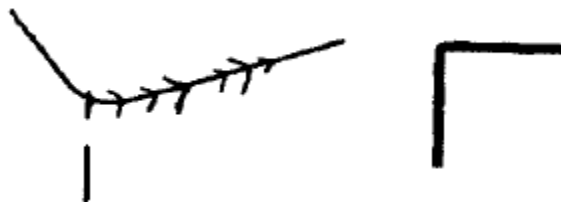
Opotřebení čela ve tvaru žlábků vzniká působením mechanismů difuzního opotřebení a abraze. Žlábek zčásti vzniká úběrem materiálu nástroje, způsobeným brousicím pochodem. Velké opotřebení čela ve tvaru žlábků může změnit geometrii břitu a ovlivnit tak tvar třísky, změnit směr působení řezných sil a zeslabit břit. [18]



Obr. 15.: Opotřebení čela ve tvaru žlábků. [17]

8.2.5 Hřebenovité trhliny na nástrojovém ostří

Hřebenovité trhliny na ostří nástroje patří mezi únavová opotřebení, která vznikají tepelnými šoky. Trhliny vznikají kolmo na ostří, přitom se mohou částice řezného nástrojového materiálu mezi trhlinami vylamovat a způsobit tak náhlý lom břitu. [17]



Obr. 16.: Hřebenovité trhliny na ostří. [17]

8.2.6 Vydrolování nástrojového ostří

Vydrolování nástrojového ostří je způsobeno zatížením ostří, v důsledku čehož se drobné částičky řezného materiálu se začnou oddělovat od povrchu břitu. Odlupování materiálu a trhliny upozorňují na možnost vzniku křehkého lomu břitu. [18]

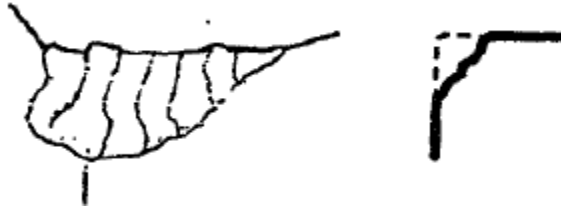


Obr. 17.: Vydrolování ostří. [17]



8.2.7 Lom břitu nástroje

Lom břitu představuje náhlou poruchu břitu. Lom břitu nástroje je ukončením jeho trvanlivosti. Křehký lom může vznikat vlivem různých faktorů, například pokud je materiál břitu málo houževnatý. [17]



Obr. 18.: Lom břitu. [17]



Obr. 19.: Křehký lom. [21]

8.2.8 Únavový lom nástroje

Únavový lom nástroje je typickým důsledkem výrazných změn velikosti řezných sil. Tento typ lomu vzniká vlivem neustálé změny různých zatížení. [17]

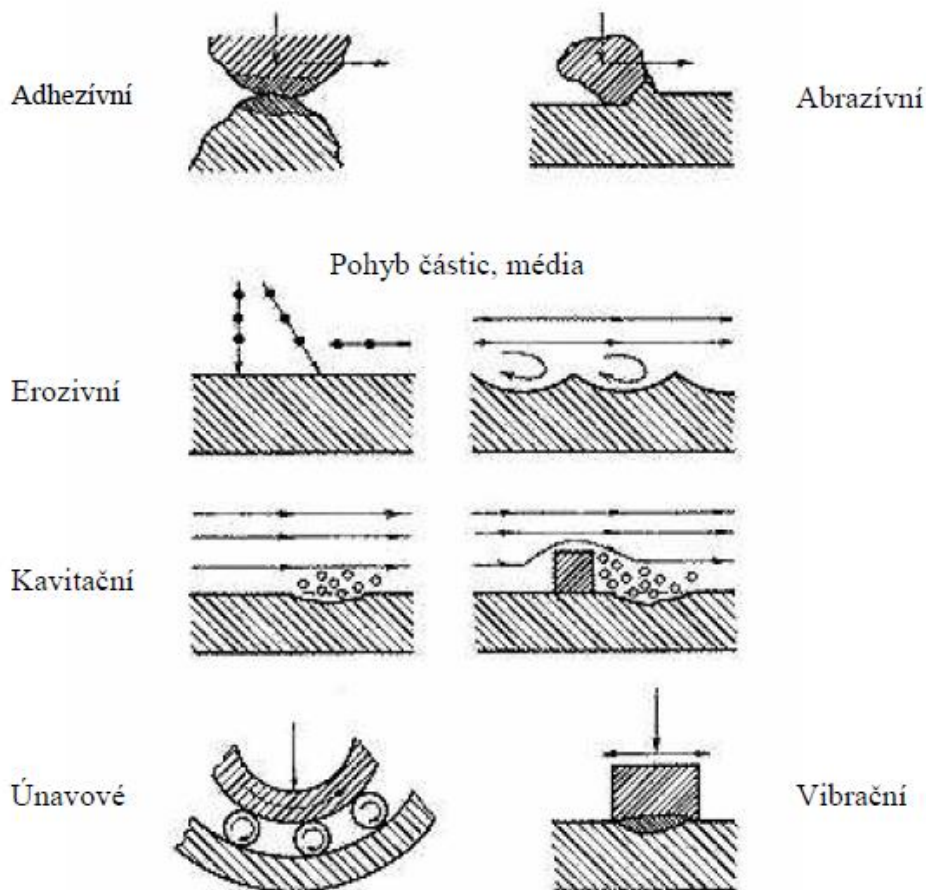


Obr. 20.: Únavový lom. [17]



8.3 Druhy opotřebení

Opotřebení lze rozčlenit na šest základních druhů, a to adhezivní, abrazivní, erozivní, kavitační, únavové a vibrační. Tyto druhy opotřebení vznikají při řezání vlivem působení fyzikálních a chemických jevů, zejména za zvýšené teploty a tlaku v oblasti řezu. V technické praxi obvykle dochází ke kombinaci jednotlivých druhů opotřebení a uplatňují se další vlivy. Jeden typ opotřebení přechází v druhý a zpravidla jsou doprovázeny korozí. Pokud se na povrchu tvoří pevně ulpívající korozní produkty, mohou zpomalit další opotřebení. Při jejich porušení se abrazivní účinek opotřebení naopak urychluje. Měkčí korozní zplodiny, k nimž se řadí například sulfidy nebo fosfidy však zlepšují kluzné vlastnosti povrchu a snižují opotřebení. [24]



Obr. 21.: Schématické zobrazení druhů opotřebení. [21]

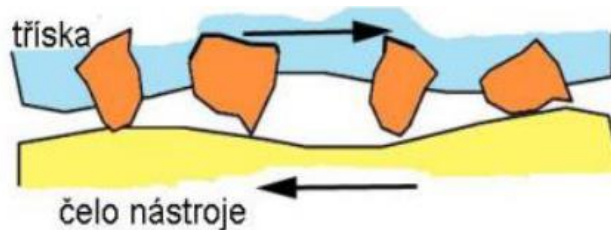


8.3.1 Abrazivní opotřebení

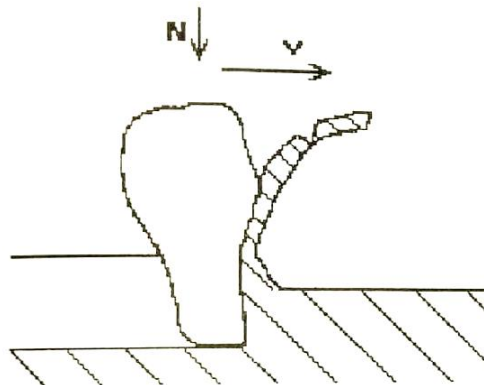
Abrazivní opotřebení je velmi rozšířený mechanismus vznikající působením tvrdých částic v materiálu obrobku. Typicky se vyznačuje rýhovaným vzhledem povrchu. Tvrdé částice se dostanou mezi povrch obrobku a povrch nástroje. Odolnost bříty proti abrazivnímu otěru závisí zejména na jeho tvrdosti.

Abrazivní otěr je značný za nízkých řezných rychlostí, kdy dochází ke styku obou materiálů na vrcholcích mikronerovností. Vyskytuje se při obrábění nástroji z rychlořezných a nástrojových ocelí.

Na intenzitu abrazivního opotřebení má vliv množství abrazivních částic, tvar abrazivních částic, působící síla na částice v normálovém směru, velikost abrazivních částic, pevnost a tvrdost abrazivních částic. [18]



Obr. 22.: Abrazivní opotřebení. [21]



Obr. 23.: Schéma mechanismu abrazivního opotřebení. [24]

8.3.2 Adhezní opotřebení

Tento druh opotřebení se objevuje v místech, kde dochází ke smýkání dvou tuhých těles, přitlačovaných k sobě působením normálové síly. Následně dochází k jejich dotyku, narušování povrchových adsorpčních a oxidových vrstev a vzniku adhezních mikrospojů, které jsou vzápětí rozrušovány.



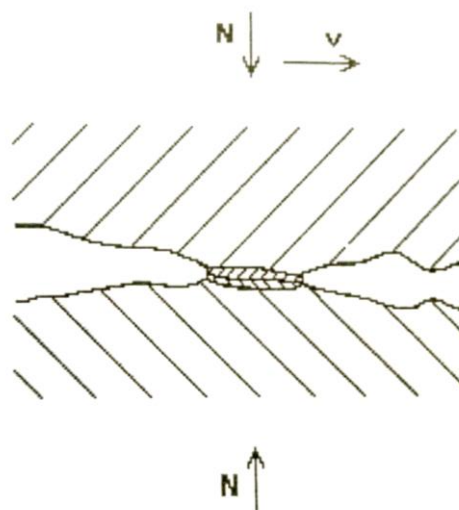
DIPLOMOVÁ PRÁCE **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**

Adhezní opotřebení se vyskytuje na čele břitu nástroje za nízkých teplot obrábění. Adhezní otěr se vytváří vytrháváním částic břitu díky adhezním spojům nástroje a obrobku. Nabývá na významu za nižších řezných rychlostí a vzniká vlivem vysokých tlaků na vrcholky mikronerovností obráběného materiálu. Pomocí adhezních sil dojde k pevnému spoji mikroskopickými svary. Adhezní otěr vzniká u obrábění nástroji z nástrojových a rychlořezných ocelí. To vede často k tvorbě nárůstku mezi třískou a břitem nástroje. Takto nárůstkem vytvořený břit může způsobit poškození původního břitu vydrolením nebo výlomem.

Vznik a průběh adhezivního opotřebení ovlivňuje hloubka vnikání a poloměr zakřivení mikronerovností povrchu, velikost zatížení, rychlost relativního pohybu a schopnost materiálu vytvářet adhezní spoje. [17] [24]



Obr. 24.: Adhezní opotřebení. [21]

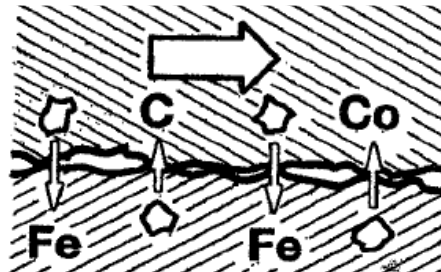


Obr. 25.: Schéma mechanismu adhezivního opotřebení. [24]



8.3.3 Difuzní otěr

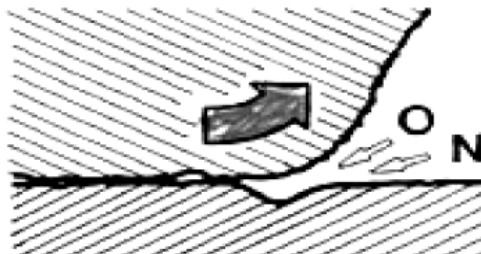
Difuzní otěr vzniká působením chemických vlivů v průběhu obrábění. Původcem jsou difuzní pochody za určité teploty, kdy přechází některé prvky z povrchové vrstvy řezného materiálu do povrchové vrstvy materiálu obrobku a obráceně. Chemické složení řezného nástroje a materiálu obrobku má zásadní vliv na podíl difuzního opotřebení vzhledem k celkovému opotřebení. Některé řezné materiály nereagují s materiálem obrobku vůbec, jiné zas reagují výrazně. Například afinita mezi slinutým karbidem a ocelí umožňuje vznik difuzního opotřebení. V důsledku toho vzniká žlábek na čele bříty. [18]



Obr. 26.: Difuzní otěr. [17]

8.3.4 Oxidační otěr

Oxidační otěr souvisí s vysokými teplotami řezného procesu, které spolu s okolním vzduchem způsobují oxidaci nástrojového materiálu. Vzniklé oxidy mají rozdílný vliv. Wolfram a kobalt vytvářejí porézní filmy oxidu, které se třískou snadno odvádí. Jiné oxidy jsou podstatně pevnější a tvrdší, jako například oxid hlinitý. Proto některé nástrojové materiály více podléhají oxidačnímu opotřebení než jiné. [17]



Obr. 27.: Schéma oxidačního opotřebení. [17]



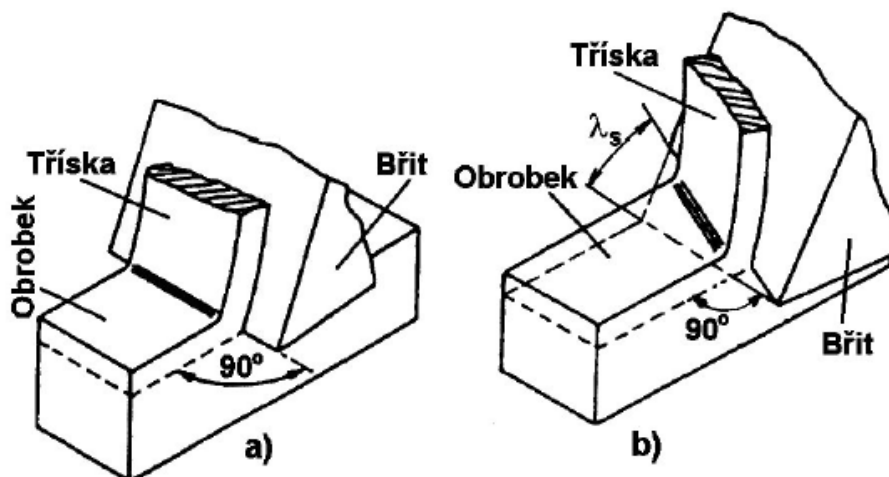
9 Teorie tvorby třísky při obrábění za sucha

Následující kapitoly se zabývají mechanismy utváření třísky při obrábění. Významnou roli v současném obrábění zaujímá utváření třísky, zejména její kontrolovaný odchod a lámání. Cílem je nejen odstranit odebíraný materiál z obrobku, ale také odvádět vznikající třísky z řezné zóny a jejich pomocí odvádět teplo, které vzniká při procesu obrábění. [30]

Vrtání je ve srovnání se soustružením a frézováním mnohem náročnější na utváření a odchod třísky z místa řezu. I z tohoto důvodu je vhodné věnovat dostatečnou pozornost určování tlaku a množství chladicí kapaliny potřebné pro dobré odvádění třísky z oblasti řezu. [32]

9.1 Fyzikální základy procesu řezání

Řezný proces se realizuje v soustavě obráběcí stroj, nástroj a obrobek, přičemž hlavním výstupem jsou parametry obrobenej plochy. Z tohoto pohledu má problematika mechanismu utváření třísky speciální význam. Řezný proces lze realizovat jako ortogonální nebo obecné řezání, což znázorňuje obrázek č. 28. [30]



Obr. 28.: Ortogonální (a) a obecné řezání (b). [30]

U ortogonálního řezání je ostří kolmé ke směru řezného pohybu a daná problematika se řeší v rovině, typicky u zapichování, frézování nástrojem s přímými zuby nebo protahování. U obecného řezání se přistupuje k řešení v prostoru, například u podélného soustružení, vrtání nebo frézování nástrojem se zuby ve šroubovici.



DIPLOMOVÁ PRÁCE **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**

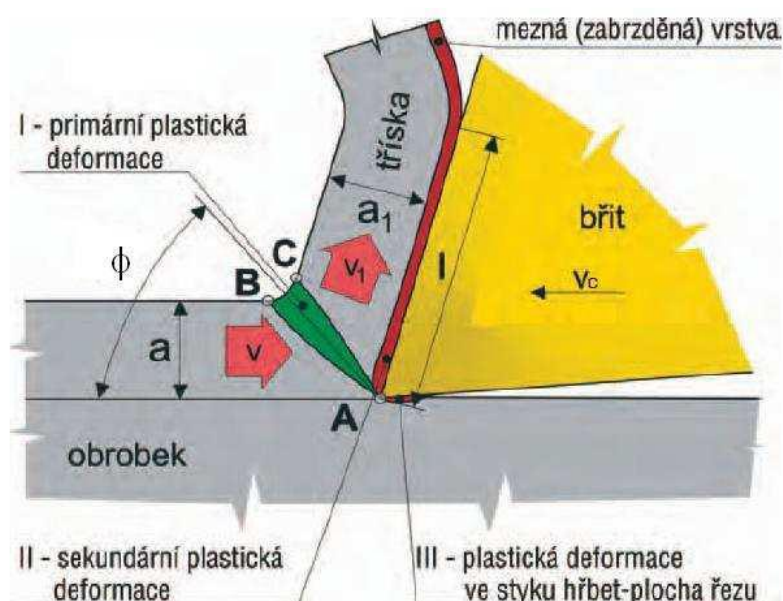
V průběhu obrábění probíhá oddělování třísky vlivem trvalého zatěžování odebírané vrstvy řezným nástrojem. Mechanismus vzniku a oddělování třísky se liší podle toho, zda se jedná o krystalické nebo nekystalické látky. U krystalických látek dojde při vnikání břitu nástroje do obrobku k plastické deformaci obráběného materiálu a vzniklá tříska je tvářená. U nekystalických látek se tříska dělí křehkým lomem nebo štěpením, k plastické deformaci nedochází a vzniklá tříska je netvářená. [31]

9.2 Plastická deformace v oblasti utváření třísky

Obrábění je technologický proces, při kterém řezáním vzniká nový povrch oddělením částic materiálu ve tvaru třísek. Řezání představuje proces plastické deformace, jejíž průběh ovlivňují vlastnosti obráběného materiálu a také podmínky, za jakých probíhá. Mezi nejvýznamnější podmínky patří deformační rychlost a teplota. [33]

Oblast materiálu, ve které dochází vlivem řezného nástroje k přetváření na třísku, se nazývá kořen třísky. Kořen třísky zahrnuje tři oblasti značné plastické deformace, a sice oblast primární plastické deformace materiálu I, oblast sekundární plastické deformace II a oblast terciární plastické deformace III.

Ke znázornění procesu řezání se obvykle využívá ortogonálního pravoúhlého systému pravoúhlého řezání, což lze vidět na Obr. 29.



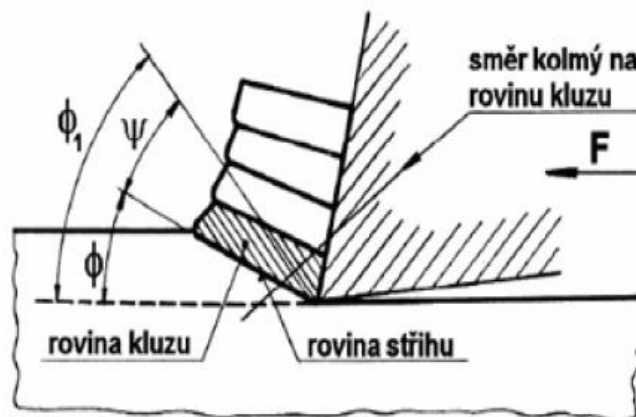
Obr. 29.: Oblasti plastických deformací v kořenu třísky. [31]



DIPLOMOVÁ PRÁCE **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**

Jakmile vnikne řezný klín nástroje do povrchu obrobku, dojde v oblasti utváření třísky k elastickým a následně plastickým deformacím. Břit nástroje je přitlačován do obrobku v důsledku působení síly F . Elastické deformace se rozkládají po celém obrobku, plastické deformace zahrnují jen zónu řezu.

Smyková napětí rostou do té doby, než dojde k plastické deformaci materiálu obrobku před břitem nástroje - posouvání vrstev v kluzných rovinách pod úhlem Φ . Pohyb nástroje pokračuje, plastická deformace roste a dochází k pěchování a posouvání vrstev materiálu ve směru kolmém vůči kluzným rovinám. Oddělováním třísky dochází v podstatě k ukončení procesu plastické deformace. Plastický lom nastává vlivem kluzné síly, zatímco křehký lom vlivem normálové síly. [33]



Obr. 30.: Vznik třísky při obrábění. [32]

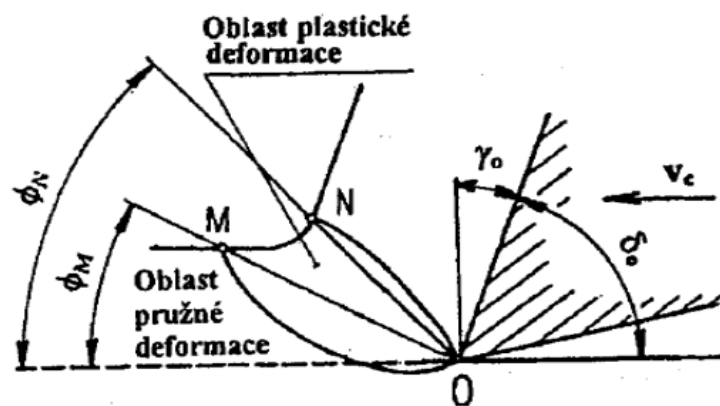


Obr. 31.: Tvorba třísek. [31]



9.2.1 Primární plastická deformace

Při relativním pohybu nástroje vzhledem k obrobku působí na odebíranou vrstvu materiálu vnější zatížení a vyvolává napětí. Velikost, tvar oblasti OMN i stav napjatosti v této oblasti jsou velmi proměnlivé. Závisí na fyzikálních vlastnostech deformovaného materiálu, zejména na deformační a zpevňovací schopnosti obráběného materiálu, řezné rychlosti v_c , nástrojovém ortogonálním úhlu řezu δ_0 a nástrojovém ortogonálním úhlu čela γ_0 . [32]



Obr. 32.: Oblast plastických deformací v odřezávané vrstvě. [30]

Oblast MO znázorňuje počátek plastických deformací, oblast NO znázorňuje konec plastických deformací a δ_0 je nástrojový ortogonální úhel řezu. Pokud napětí nepřesáhne mez úměrnosti deformovaného materiálu, odebíraná vrstva se deformuje elasticky. Zvýšením napětí nad mez pružnosti se začne materiál odřezávané vrstvy deformovat plasticky a vzniká plastický skluz v určitých vhodně orientovaných krystalických plochách. [30]

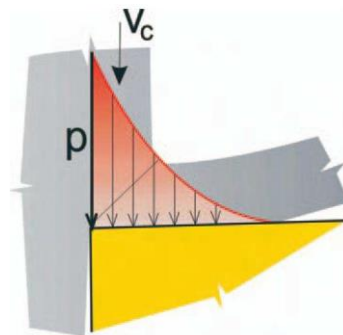
Zvýšením řezné rychlosti se deformační oblast zužuje a to tak, že úhly ϕ_M a ϕ_N rostou, přičemž ϕ_M roste rychleji. Při vysokých řezných rychlostech OM a ON prakticky splývají a ke vzniku třísky pak dochází vlivem plastického skluzu v rovině stříhu P_{sh} , jejíž poloha je dána úhlem roviny stříhu Φ . Úhel Φ je úhlem mezi směrem hlavního pohybu a průsečnicí roviny stříhu P_{sh} s pracovní boční rovinou P_{fe} . Úhel roviny stříhu Φ značí úhel polohy roviny stříhu a také úhel směru maximálních tečných napětí. Rovina stříhu P_{sh} je tvořena zónou mezi třískou a obrobkem, kdy se nejedná o ideální rovinu. [30]



9.2.2 Sekundární plastická deformace

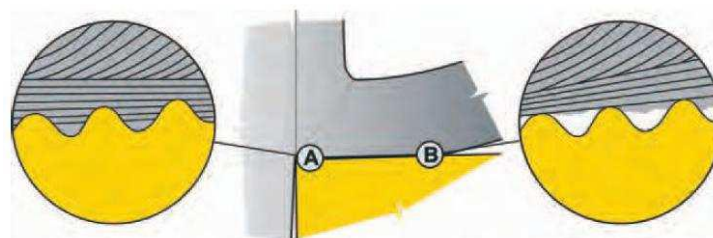
Tříška vzniklá primární plastickou deformací odchází čelem nástroje. Intenzivním třením třísky o čelo nástroje dochází k výrazné plastické deformaci tenké vrstvy třísky, tedy k sekundární plastické deformaci. [33]

Ve styčných plochách třísky s čelem nástroje působí vysoké tlaky ovlivňující specifický charakter tření. Tyto tlaky dosahují maximálních hodnot blízko ostří, ve směru pohybu třísky se snižují a na konci kontaktní plochy jsou nulové, což je patrné z obrázku č. 33.



Obr. 33.: Průběh tlaku ve styčné ploše mezi třískou a nástrojem. [31]

Vlivem těchto vysokých tlaků v blízkosti ostří a jejich rychlého snížení v kontaktní ploše ve směru pohybu třísky vznikají dva různé typy tření. Vnitřní tření A v oblasti ostří přibližně v polovině délky kontaktní plochy mezi třískou a čelem nástroje a oblast vnějšího tření B.



Obr. 34.: Vnitřní a vnější tření v kontaktní zóně. [31]

Vrcholky mikronerovností povrchu jsou plasticky deformovány, čímž dojde k popraskání oxidů na povrchu nástroje, ke styku čistých kovových ploch a vzniku adhezních sil. Vznikají mikroskopické adhezní svary, které jsou dalším pohybem obou ploch plynule odtrhávány. Tečné napětí nutné k odtržení těchto svarů



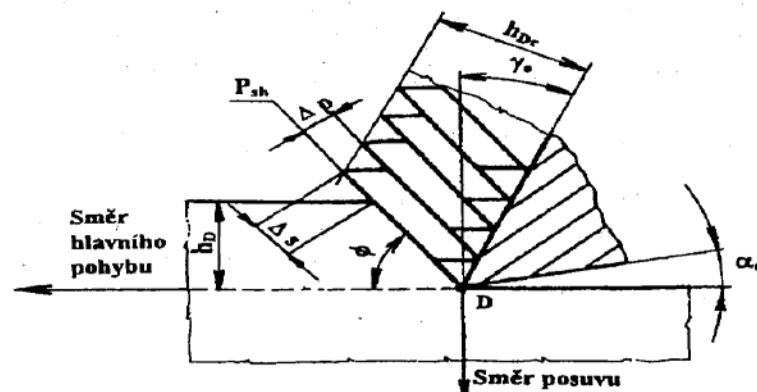
DIPLOMOVÁ PRÁCE **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**

je zpravidla větší než mez kluzu zpevněného materiálu třísky, dochází k sekundární plastické deformaci. [31]

Dalším pohybem třísky dojde k vnějšímu bodovému tření plasticky zdeformované mezní vrstvy třísky s čelem nástroje a ke vzniku abraze. Za určitých okolností může docházet u některých materiálů obrobků k nárůstu vázoucích vrstev materiálu třísky a k jejich vytvrzení na čele nástroje. Typicky se k nim řadí kombinace nástrojová ocel – ocel, slinutý karbid – ocel. Vznikne umělý břit neboli nárůstek. Změnou řezných podmínek lze zabránit vzniku nárůstku. U uhlíkových ocelí se nárůstek tvoří při teplotě řezání 300 °C a přestává se vytvářet okolo 600 °C. Při běžných podmínkách obrábění vzniká nárůstek při řezné rychlosti 18 m.min⁻¹ a mizí při řezné rychlosti 72 m.min⁻¹. [31]

V sekundární oblasti je vyšší stupeň plastické deformace než v oblasti primární plastické deformace, kde je plasticky deformován celý objem odřezávané vrstvy. Deformace velmi tenké vrstvy odcházející třísky zásadním způsobem ovlivňuje teplotu povrchových vrstev čela nástroje, což výrazně ovlivňuje opotřebení.

Materiál vpravo od roviny stříhu P_{sh} je již tvářenou třískou, jak znázorňuje pro zjednodušený dvojrozměrný model ortogonálního řezání obrázek č. 35. Snímek zachycuje pohled na pracovní rovinu P_{fc} v hlavním bodě ostří D , přičemž h_D je jmenovitá tloušťka řezu, h_{Dc} - tloušťka třísky, P_{sh} - rovina stříhu, Φ - úhel roviny stříhu, Δp - tloušťka elementu třísky a Δs je tloušťka elementu třísky. [30]



Obr. 35.: Zjednodušený model tvorby elementů třísky při ortogonálním řezání. [30]



9.2.3 Terciární plastická deformace

Terciární plastická deformace vzniká v tenké povrchové vrstvě obrobené plochy, čili v místě styku roviny hřbetu nástroje a obrobené plochy. Toto tření ovlivňuje teplotu povrchových vrstev hřbetu nástroje a jeho opotřebení. Z hlediska obrobku má terciární plastická deformace vliv na výslednou drsnost obrobeného povrchu. [33]

9.3 Tvorba třísky

Z hlediska tvorby třísky rozlišujeme vznik zejména dvou druhů třísek: soudržné (tvářené) a elementární. Soudržná tříska vzniká v důsledku tvárného lomu po plastické deformaci. Z hlediska rozložení plastické deformace je soudržná tříska plynulá nebo článkovitá. Plynulá tříska se vytváří u kovů a slitin s krychlovou prostorově nebo plošně středěnou krystalovou mřížkou s velkou tepelnou vodivostí a malou tvrdostí, jak je tomu například u slitin hliníku nebo ocelí s nízkým obsahem uhlíku. Tvorba článkovité třísky se vyskytuje u obrábění kovů s hexagonální těsnou krystalovou mřížkou, která má nízkou tepelnou vodivost a vysokou tvrdost, typicky u titanových a niklových slitin. [33]

Elementární tříska vzniká v důsledku křehkého lomu bez výrazné plastické deformace. Je obvyklá při obrábění skla, některých hornin a plastů. Druh vznikající třísky je ovlivněn materiálem obrobku (pevnost, tvrdost, tvar, velikost...), geometrií nástroje (například úhel nastavení hlavního ostří ovlivňuje délku, šířku a směr pohybu třísky) a řeznými podmínkami (zejména řezná rychlost). Při malé řezné rychlosti se může pro jeden obráběný materiál vytvářet plynulá soudržná tříska, od určité rychlosti pak soudržná článkovitá tříska a následně tříska elementární.

Vznik třísky článkovité nebo ve tvaru krátkých šroubovic je elementárním předpokladem moderního obrábění. Každá vyměnitelná břitová destička má geometrii, která v rozsahu stanovené oblasti posuvu a hloubky řezu zajišťuje u přiřazených materiálů obrobku kontrolovaný odvod třísky. [32]

9.4 Poznatky z tvorby třísky při suchém obrábění

Obrábění je energeticky nejvýhodnější a zatížení nástroje nejnižší, pokud je úhel roviny maximálních smykových napětí co největší. Zvýšení řezné rychlosti lze realizovat vysokorychlostním obráběním HSC, které umožňuje suché obrábění.



DIPLOMOVÁ PRÁCE Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

Vysokorychlostní obrábění má i své nevýhody, například málo odzkoušená technologická data pro všechny druhy materiálů, nutnost zvýšení nákladů na zajištění bezpečnosti obsluhujícího personálu, vyšší náklady na údržbu a vyšší opotřebení některých částí stroje.

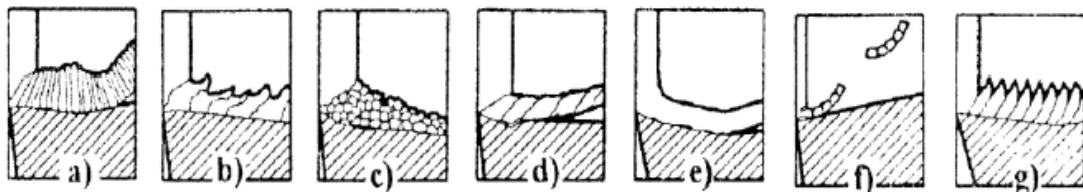
V případě suchého obrábění za řezných podmínek (zejména řezných rychlostí), které nedosahují parametrů HSC, má rozhodující vliv na velikost úhlu roviny maximálních smykových napětí geometrie nástroje a povrch nástroje. [32]

9.5 Třísky - Technologické charakteristiky

Třísky jsou vedlejším produktem řezného procesu. Jejich technologické charakteristiky výrazně vypovídají o průběhu procesu řezání z energetického hlediska i z hlediska řízeného odvodu třísek z řezné zóny.

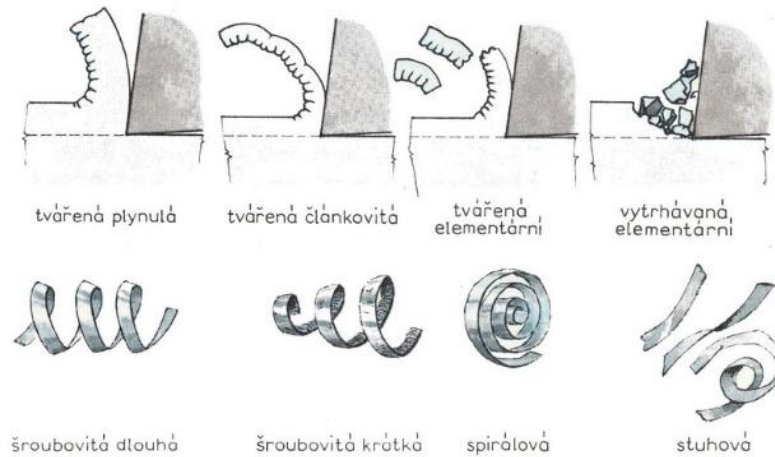
9.5.1 Druhy tvářených třísek

Tvar vzniklé třísky závisí na vlastnostech obráběného materiálu, jeho obrobitelnosti, geometrii nástroje a tvaru břitu (úhel čela, lamače, utvářeče třísky), dále pak na materiálu nástroje a v neposlední řadě na řezných podmínkách (řezné rychlosti, posuvu a hloubce řezu). V závislosti na průběhu řezného procesu mají třísky odlišný tvar, čehož si lze všimnout na následujících snímcích. [30]

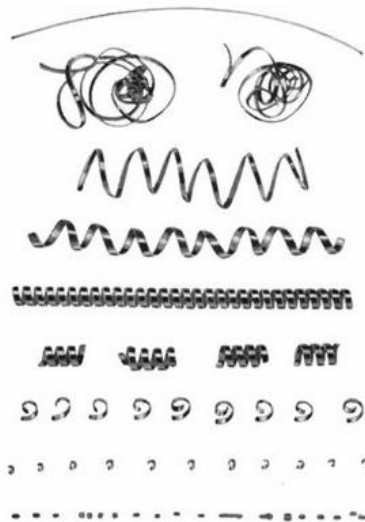


Obr. 36.: Základní druhy tvářených třísek při obrábění kovů. [30]

a - plynulá článkovitá soudržná tříska - většina ocelí; b - plynulá soudržná lamelová tříska - většina korozivzdorných ocelí; c - tvářená elementární tříska - většina litin; d - nepravidelně článkovitá plynulá tříska - většina vysoce legovaných materiálů; e - tvářená plynulá soudržná tříska – hliník, malé řezné síly; f - dělená segmentová tříska – tvrdé materiály, velké řezné síly a vysoké teploty řezání; g - plynulá segmentová tříska - titanu. [2]



Obr. 37.: Charakteristické tvary třísek. [33]



Obr. 38.: Třísky souvislé, dělené a elementární. [32]

9.5.2 Součinitel pěchování třísky

Vlivem plastických deformací v oblasti tvorby třísky dojde k pěchování třísky při jejím odchodu ze zóny řezu. Pro ortogonální řezání a rovnost objemů odřezávané vrstvy a realizované třísky platí:

$$A_{DC} \cdot v_c = A_D \cdot v_t \quad (1)$$

A_D - jmenovitá plocha řezu, A_{DC} - plocha průřezu třísky, v_t - rychlost třísky, v_c - řezná rychlost

Součinitel pěchování třísky k_s se vyjádří na základě úpravy vztahu

$$k_s = \frac{A_{DC}}{A_D} = \frac{v_c}{v_t} \geq 1 \quad (2)$$



DIPLOMOVÁ PRÁCE **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**

Plochy A_D a A_{Dc} se na základě příslušných rozměrů vyjádří ve tvaru:

$$A_d = h_d \cdot b_D; \quad A_{Dc} = h_{Dc} \cdot b_D \quad (3)$$

h_D - jmenovitá tloušťka řezu, h_{Dc} - tloušťka třísky, b_D - jmenovitá šířka řezu, b_{Dc} - šířka třísky

Z hlediska praktického řešení lze předpokládat, že $b_{Dc} \approx b_D$, takže platí:

$$k_s = \frac{h_{Dc}}{h_D} \quad (4)$$

V tomto případě se velikost h_{Dc} změří například mikrometrem a pro danou hodnotu h_D spočítáme součinitel přechování. Součinitel přechování lze vyjádřit i na základě délky relativní dráhy nástroje vůči obrobku Δl a korespondující délky třísky Δl_c :

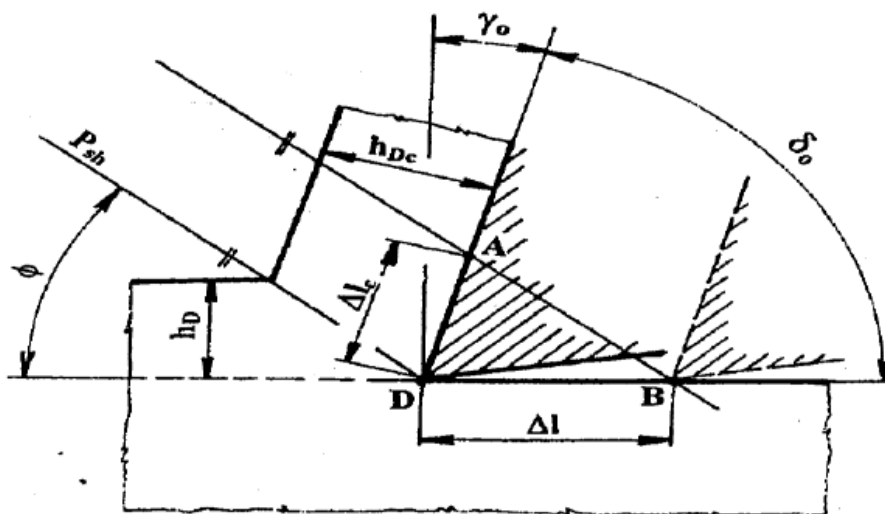
$$k_s = \frac{\Delta l}{\Delta l_c} \quad (5)$$

Pro stanovení hodnoty k_s lze vycházet z parametrů odřezávané třísky a použít vztah:

$$k_s = \frac{10^3 \cdot m_t}{l_c \cdot \rho_t \cdot A_D} \quad (6)$$

m_t - hmotnost třísky [g], l_c - délka třísky [mm], ρ_t - hustota materiálu třísky [$\text{kg} \cdot \text{dm}^{-3}$], A_D - jmenovitá plocha řezu [mm^2]

Pro známou hodnotu k_s a γ_0 lze také vyjádřit velikost úhlu střížné roviny Φ , kde vycházíme z geometrických souvislostí zřejmých z obrázku č. 39. [30]



Obr. 39.: Model geometrických souvislostí při přechování třísky – ortogonální řezání. [32]



DIPLOMOVÁ PRÁCE Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

Δl - element relativní dráhy nástroje vzhledem k obrobku

Δl_c - element délky odřezané třísky korespondující s Δl

Dle výše uvedené definice a vztahů pro obecný trojúhelník ABC platí:

$$k_s = \frac{\cos \gamma}{\operatorname{tg} \phi} + \sin \gamma \quad (7)$$

případně

$$k_s = \frac{\sin(180 - \phi - \delta)}{\sin \phi} = \frac{\sin(\phi - \delta)}{\sin \phi} \quad (8)$$

Úhel střížné roviny lze spočítat dle vztahu:

$$\phi = \operatorname{arctg} \left[\frac{\cos(\gamma_0)}{k_s - \sin(\gamma_0)} \right] \quad (9)$$



9.5.3 Objemový součinitel třísek

Třísky mají mít určité vlastnosti z hlediska rozměrů a tvaru bezprostředně po odchodu z oblasti jejich vzniku. Při odstraňování z prostoru obráběcího stroje a další dopravy a zpracování by měly mít třísky ideálně takový tvar, při kterém zaujímají co nejmenší objem. Tento nárok na třísky se zdůrazňuje zejména při obrábění na automatizovaných obráběcích strojích. [30]

Objemový součinitel třísek W umožňuje kvantifikovat stupeň dodržování obecných nároků na tvar třísek a lze ho vyjádřit vztahem:

$$W = \frac{V_t}{V_m} \quad (10)$$

V_t - objem volně ložených třísek, V_m - objem odebraného materiálu korespondující s V_t

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		

Obr. 40.: Hodnoty objemového součinitele třísek W pro vybrané typy třísek. [30]



10 Experimentální část – Vhodné utváření třísky při vrtání

Cílem experimentální části této práce je nalézt oblast vhodného utváření třísky při technologii vrtání, podobně jako je tomu u soustružení, a navrhnout odpovídající graf. Experiment je proveden na pětiosém svislém frézovacím centru Okuma MU – 400 V II. Tento sofistikovaný stroj pro technologii vrtání byl zvolen z důvodu dosažení potřebných výkonů. Cílem je vyvrtat do polotovaru z oceli S 960 QL sadu děr nejprve za sucha a poté s chladicí kapalinou a následně porovnat výsledky zejména z hlediska vhodného utváření třísky - nalézt vhodný tvar třísky, vyhodnotit spojitost třísky a průměr, do kterého se typické kornoutky při vrtání stáčí za dané sady posuvů a řezných rychlostí.

Předpokládáme, že vrtání s chladicí kapalinou by mělo snížit plasticitu třísky a posunout bod destrukce nástroje, přičemž optimální tříska by se tak měla nacházet v širším pásmu. Po odvrtání požadovaného počtu děr bude též provedeno vyhodnocení z hlediska drsnosti povrchu a porovnání drsností dosažených za sucha a s použitím chladicí kapaliny. Jako chladicí kapalina byla použita ve stroji Okuma MU – 400 V II průzračná 8 % emulze Synergy 735, vodou mísitelná, bez obsahu oleje. Tato chladicí emulze je určena pro obrábění kovů.

10.1 Pětiosé svislé frézovací centrum – Okuma MU – 400V II

Pro uskutečnění experimentu bylo vybráno pětiosé svislé frézovací centrum Okuma MU – 400V II, které se nachází v laboratořích strojní fakulty ČVUT. Stroje řady MU dosahují velmi přesných povrchů díky vysoce tuhé konstrukci stroje. MU-400V II má otočný stůl i kolíbkou polohovanou pomocí hypoidního převodu, který má v porovnání se šnekovým převodem vyšší účinnost, menší hlučnost a vyznačuje se větší kompaktností.

Řídicí systém s dotykovou obrazovkou OSP-P300MA je vlastním systémem firmy Okuma, což jí umožňuje zavádět funkce přímo určené jejím strojům.



10.1.1 Okuma MU – 400V II – Technická data

Pracovní stůl	
Průměr upínací plochy	400 (6x T 18H7) mm
Maximální rozměry obrobku	Ø 600 x H 400 mm
Maximální otáčky	50 ot/min
Maximální zatížení stolu	300 kg
Rozsah pojezdů os	
Osa X	762 mm
Osa Y	460 mm
Osa Z	460 mm
Osa A	+20 až -110 °
Osa C	360 (neomezeně) °
Posuvy	
Rychloposuv	X/Y/Z: 40/40/32 m/min
Rychloposuv rotačních os	A/C: 18.000/14.400 °/min
Maximální pracovní posuv	X/Y/Z: 32 m/min
Pracovní vřeteno	
Rozsah otáček	15 (20, 25, 35) tis. ot/min
Upínací kužel	MAS BT40 (HSK-A63, HSK-F63 ... 35 tis.)



DIPLOMOVÁ PRÁCE Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

Výkon motoru (10 min/trvale)	22/18,5 (15t), 30/22 (20t), 15/11 (25t), 15 (35t) kW
Vnitřní průměr ložiska	70 mm
Vzdálenost vřeteno-stůl	100 až 560 mm
Nástrojový zásobník	
Provedení	MAS BT40
Počet nástrojových míst	32 (48 řet., 64, 98, 132, 166, 200, 234 mat.)
Maximální průměr nástroje	90 mm
- při volných vedlejších místech	125 mm
Maximální délka nástroje (od konce vřetena)	240 mm
Maximální hmotnost nástroje	8 kg
Ostatní	
Objem nádrže chladicí kapaliny	170 l
Strojní data	
Výška	2946 mm
Šířka	2160 mm
Hloubka	2810 mm
Hmotnost	7700 kg

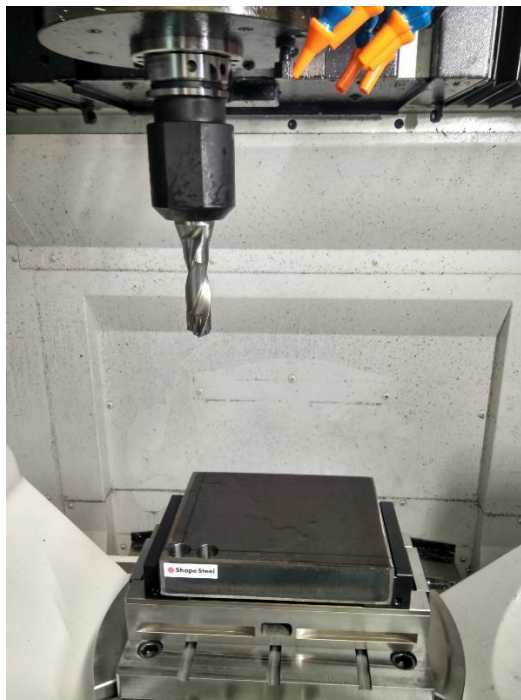
Tab. 4.: Okuma MU 400V – Technická data. [36]



Obr. 41.: Okuma MU – 400V II. [36]



Obr. 42.: Stroj MU - 400V II s upnutým polotovarem.

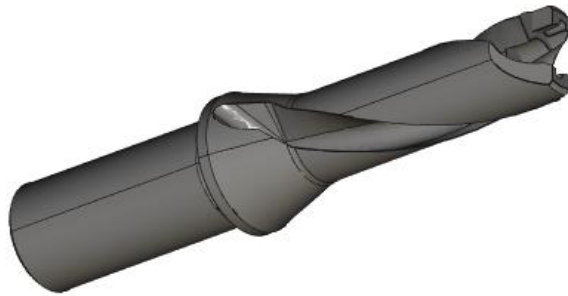


Obr. 43.: Okuma MU – 400V II – Pohled do pracovního prostoru stroje.

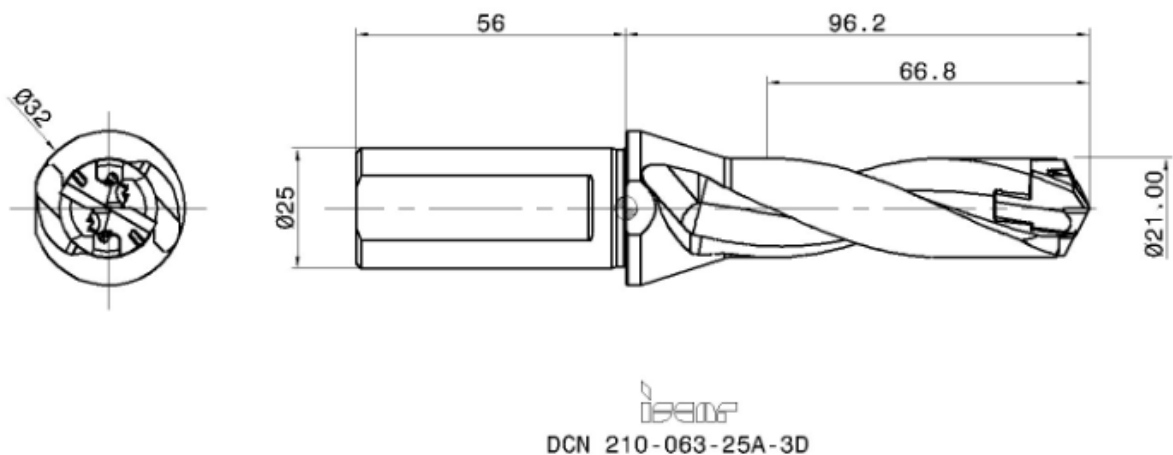


10.2 Vrták ISCAR Sumocham DCN A s korunkou ISCAR ICP 210

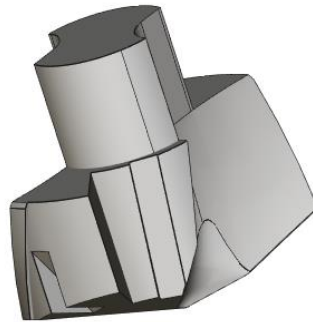
Pro vrtání děr za sucha i s chlazením chladicí kapalinou byl použit vrták ISCAR Sumocham DCN A. Podle toho, zda se vrtalo za sucha či s kapalinou se měnily dvě korunky rovněž dodané firmou ISCAR. Byly použity korunky ISCAR ICP 210 Sumocham.



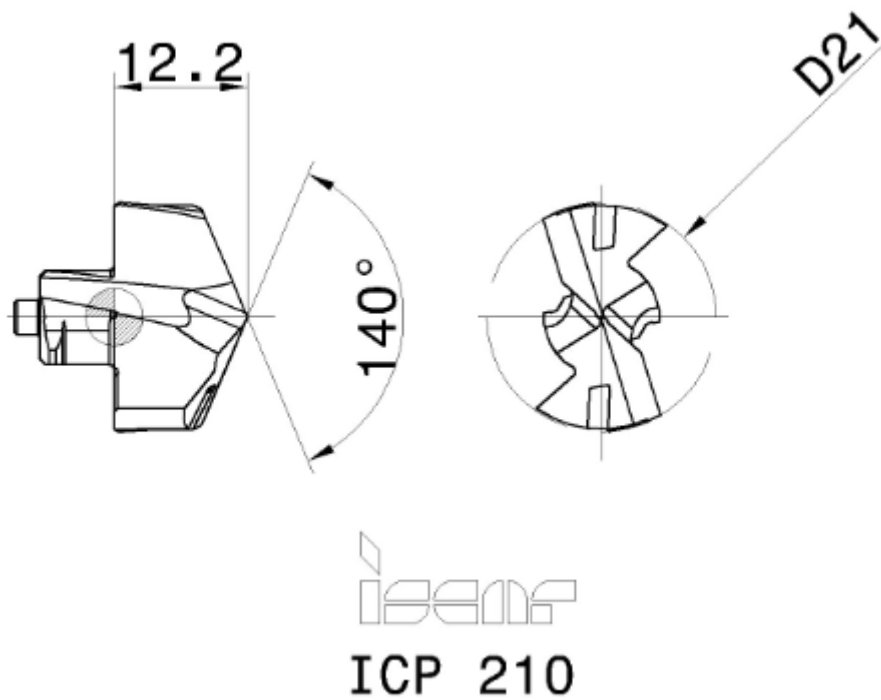
Obr. 44.: Vrták ISCAR Sumochaam DCN A – 3D model. [37]



Obr. 45.: Výkres vrtáku ISCAR Sumocham DCN A. [37]



Obr. 46.: Korunka ISCAR ICP 210 Sumocham – 3D model. [37]



Obr. 47.: Výkres korunky ISCAR ICP 210 Sumocham. [37]



10.3 Polotovar S 960 QL

Pro experiment byl využit polotovar S 960 QL s rozměry 40 x 214 x 162. Tento polotovar byl dodán firmou Shape Steel. Jedná se o ocel s následujícími vlastnostmi:

C (max %)	Si (max %)	Mn (max %)	P (max %)	S (max %)	Cr (max %)	Cu (max %)	Ni (max %)	Mo (max %)
0,2	0,5	1,6	0,02	0,01	0,8	0,3	2,0	0,7

Tab. 5: Ocel S 960 QL – Chemické složení

Tloušťka (mm)	Pevnost v tahu $R_{p0,2}$ (min MPa)	Pevnost v tahu R_m (MPa)	Tažnost A_5 (min %)
4 - 53	960	980 – 1150	12
53,1 - 100	850	900 - 1100	10

Tab. 5.: Ocel S 960 QL – Mechanické vlastnosti. [38]

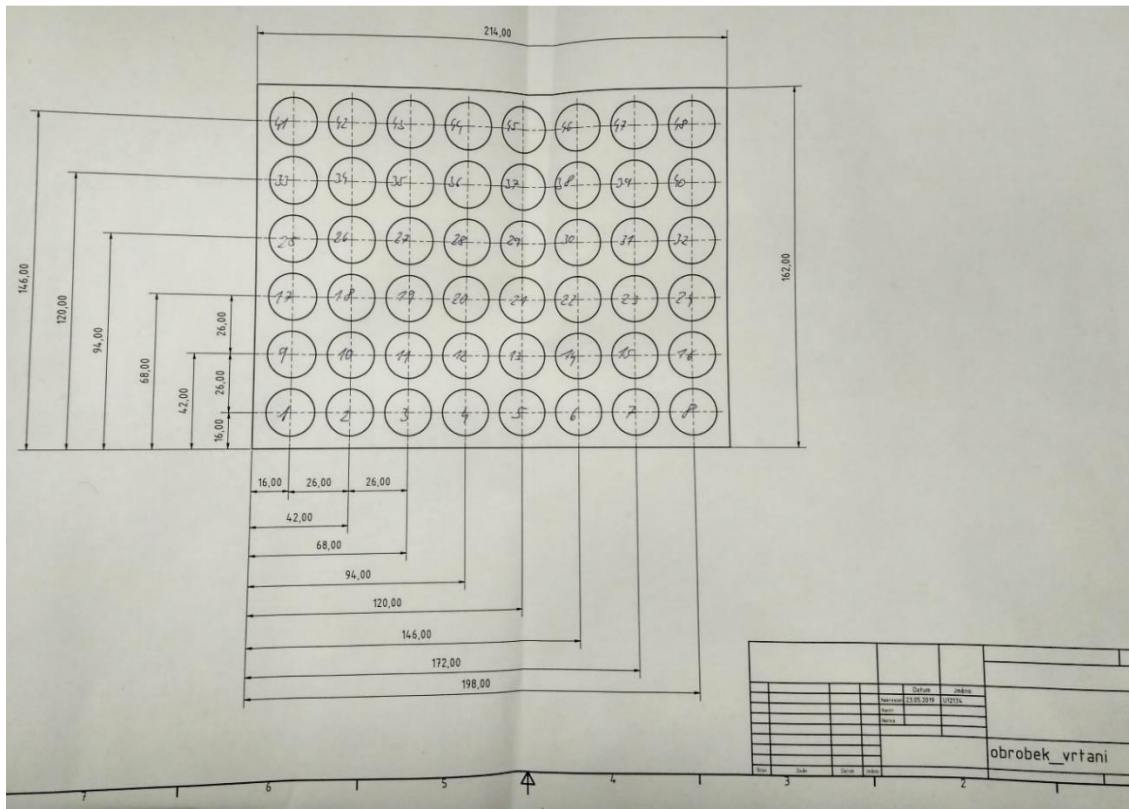


Obr. 48.: Upnutý polotovar S 960 QL s rozměry 40 x 214 x 162 v pracovním prostoru stroje.



10.4 Průběh experimentu

Celkem bylo navrženo odvrtat sadu 24 děr za sucha a 24 děr s chlazením chladicí kapalinou. Bylo žádoucí vytvořit model polotovaru, stanovit souřadnice děr a poté vygenerovat výkres polotovaru s danými souřadnicemi.



Obr. 49.: Výkres polotovaru s rozměry a souřadnicemi děr.

Tyto souřadnice děr bylo nutné, kromě dalších parametrů jako například posuvů na otáčku a řezných rychlostí, zadat do řídicího systému stroje Okuma při programování obráběcího procesu.



DIPLOMOVÁ PRÁCE Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

Posuvy a řezné rychlosti pro jednotlivé díry byly navrženy takto:

Vrtání za sucha – Číslování děr					
X	f (mm/ot)				
V _c (m/min)	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3
30	1	6	11	16	21
40	2	7	12	17	22
50	3	8	13	18	23
60	4	9	14	19	24
70	5	10	15	20	X

Tab. 6.: Vrtání za sucha – Výchozí mapa děr.

Vrtání s chladicí kapalinou – Číslování děr					
X	f (mm/ot)				
V _c (m/min)	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3
30	25	30	35	40	45
40	26	31	36	41	46
50	27	32	37	42	47
60	28	33	38	43	48
70	29	34	39	44	X

Tab. 7.: Vrtání s chladicí kapalinou – Výchozí mapa děr.

Posuvy na otáčku: f (mm/ot) – 0,1 0,15 0,2 0,25 0,3

Řezné rychlosti: v_c (m/min) – 30 40 50 60 70

Číslování děr: 1 – 48

Hloubky řezu a_p (hloubky děr) – 38 mm

Ve snaze vyhnout se příliš extrémním podmínkám, při kterých by mohlo dojít až k destrukci nástroje, jsme u vrtání za sucha i s chladicí kapalinou vynechali řezné podmínky za posuvu $f = 0,3$ a řezné rychlosti $v_c = 70$.



DIPLOMOVÁ PRÁCE Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie



Obr. 50.: Okuma MU – 400V II – Řídicí systém s dotykovou obrazovkou OSP–P300MA.



Obr. 51.: Upnutý polotovár před zahájením vrtání sady 24 děr za sucha.



Obr. 52.: Výsledný obrobek po odvrtání sady 24 děr za sucha.



Obr. 53.: Výsledný obrobek po odvrtání všech 48 děr (za sucha i s chladicí kapalinou).



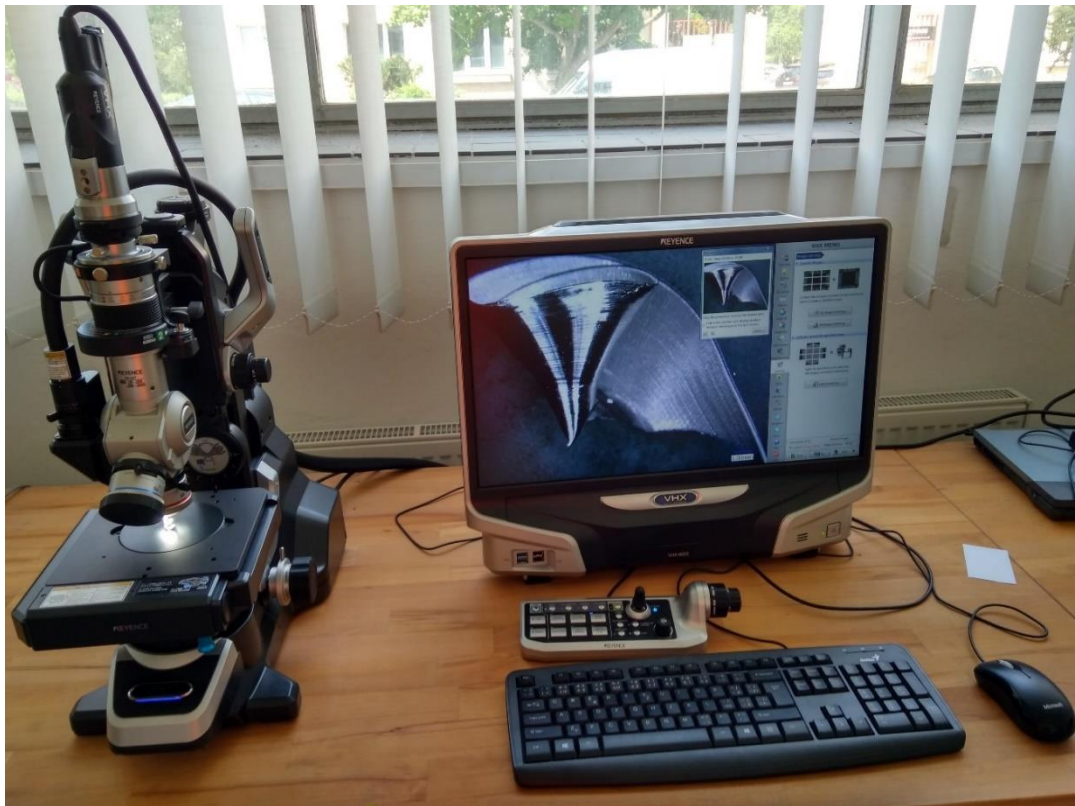
10.5 Digitální mikroskop Keyence VHX – 6000

Po odvtání všech 48 děr bylo využito mikroskopu Keyence VHX – 6000 pro vyhodnocení tvaru třísek a také pro vyhodnocení opotřebení korunek Iscar. Tento mikroskop se nachází v laboratoři strojní fakulty ČVUT. Bylo příhodné využít jeho předností, rozlišovacích schopností a pokročilých funkcí při vyhodnocování výsledků experimentu.

Digitální mikroskop Keyence VHX - 6000 umožňuje pozorovat objekty v zorném poli, pořizovat snímky, ukládat je a vyhodnocovat naměřená data. Jeho výhodou je automatické zaostřování, hloubka ostrosti až dvacetkrát větší než u běžných optických mikroskopů nebo velký dynamický rozsah (DHR+) umožňující pozorovat i málo kontrastní a lesklé předměty. Mezi jeho další přednosti patří optimalizace osvětlení pro pořízení co nejkvalitnějších snímků, funkce měření hloubky metodou DFD (Depth from Defocus) a možnost měnit úhel pozorování.

Mikroskop Keyence používá kameru se snímačem CMOS s rozlišením kamery minimálně 1920 x 1200 pixelů. Frekvence snímání je minimálně 50 snímků za vteřinu. Mikroskop Keyence používá stojan s motorizovaným stolcem, přičemž minimální rozsah motorizace pro měření je 100 x 100 x 30 mm (X, Y, Z). Motorizovaný pohyb je s krokem maximálně 0,1 μm v ose Z a 1 μm v osách X a Y. Dále je zde možnost náklonu svislé osy stojanu pod úhlem až 90°.

Keyence VHX – 6000 používá objektivy se zvětšením v rozsahu 0x až 2000x. Umožňuje také LED osvětlení (nad 5700 K) – vícenásobné (koaxiální, kruhové / segmentové), minimálně v rozsahu zvětšení 20x – 2000x. Nabízí také možnost pozorování v polarizovaném světle (zvětšení v rozsahu 20x – 2000x), možnost pozorování v průchozím osvětlení v celém rozsahu zvětšení nebo pozorování ve světlém i tmavém poli či v jejich kombinaci v rozsahu zvětšení 20x – 2000x. Digitální mikroskop automaticky rozpozná připojení objektivu, zvětšení a typ objektivu. Optika tohoto přístroje umožňuje 3D zobrazení v celém rozsahu zvětšení.



Obr. 54.: Vyhodnocování třisek pomocí mikroskopu Keyence VHX – 6000.



10.6 Korunka Iscar po vrtání za sucha – Měření na mikroskopu

Pro měření různých opotřebení či jiného poškození korunky Iscar byl využit digitální mikroskop Keyence VHX – 6000. Po odvrtání první sady 24 děr za sucha zaznamenala korunka jistých změn. Prozkoumáním na mikroskopu byly nalezeny zejména nárůstky na břitu, což bylo do určité míry způsobeno absencí chladicí kapaliny. Nárůstků bylo objeveno hned několik, ovšem nárůstky těchto rozměrů nemají zásadní vliv na funkci korunky. Lze konstatovat, že korunka při použití za sucha zvládla odvrtat sadu 24 děr bez výrazného poškození.



Obr. 55.: Korunka Iscar použitá při vrtání za sucha.



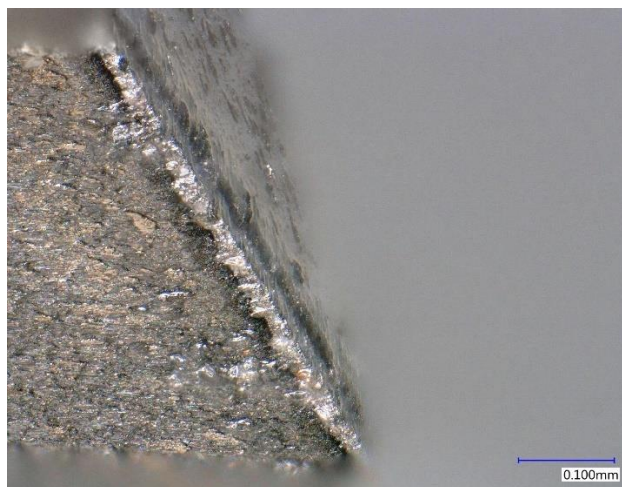
Obr. 56.: Korunka Iscar použitá při suchém vrtání (karbid typu P, \varnothing 21 mm) – Pohled shora.



Obr. 57.: Korunka Iscar použitá při vrtání za sucha – Pohled na břít.



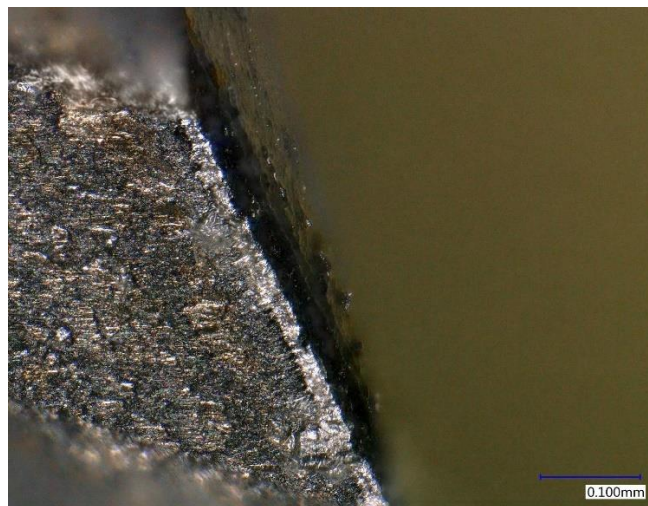
Obr. 58.: Korunka Iscar použitá při vrtání za sucha – Pohled na hřbet.



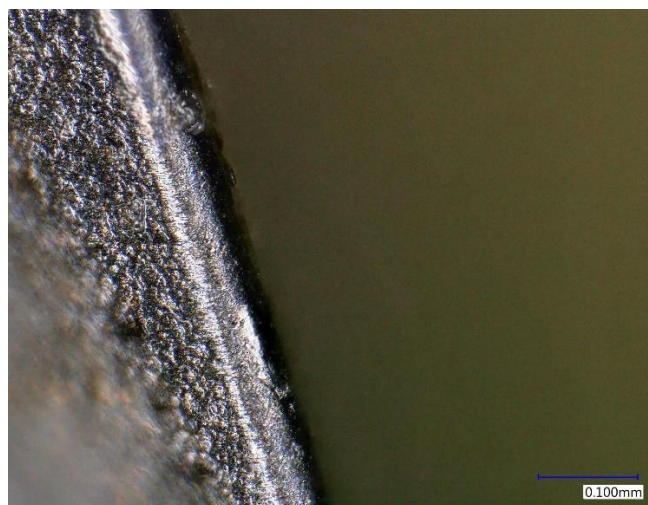
Obr. 59.: Korunka Iscar použitá při vrtání za sucha – Nárůstek na vedlejším břitu.



Obr. 60.: Korunka Iscar použitá při vrtání za sucha – Nárůstek na břítu.



Obr. 61.: Korunka Iscar použitá při vrtání za sucha – Nalezený nárůstek na břítu.

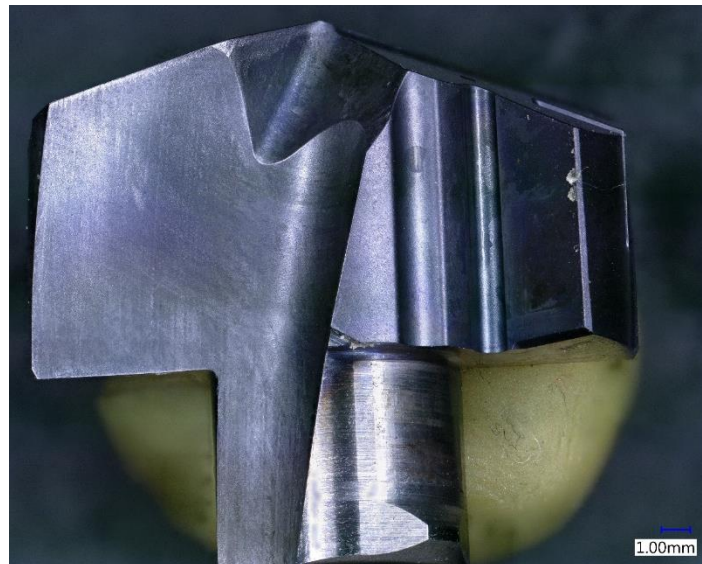


Obr. 62.: Korunka Iscar použitá při vrtání za sucha – Nalezený nárůstek na břítu – Detail.



10.7 Korunka Iscar po vrtání s chladicí kapalinou – Měření na mikroskopu

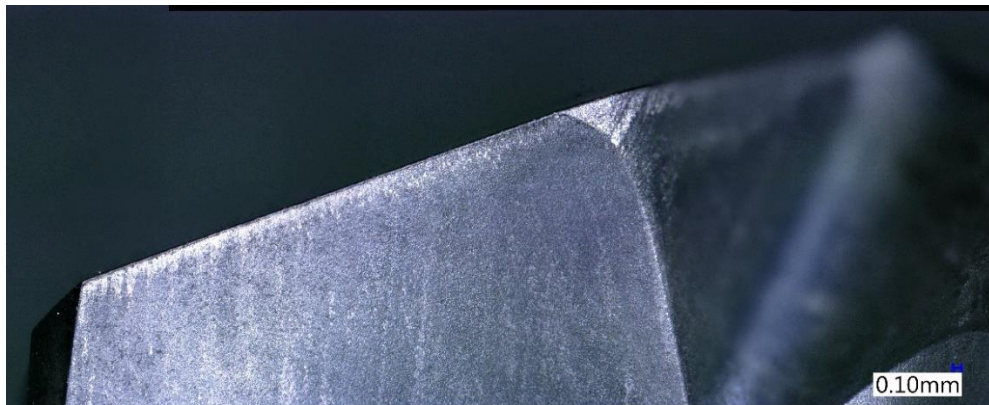
Tato korunka byla použita při vrtání 24 děr za použití chladicí kapaliny. Při měření na mikroskopu Keyence VHX – 6000 byl zkoumán profil korunky, její případné opotřebení, vznik nárůstků či dokonce trvalé poškození. Po prozkoumání korunky z několika pohledů a využitím pokročilých funkcí mikroskopu Keyence se na povrchu neobjevily výraznější nárůstky. Na hřbetu však bylo nalezeno abrazivní opotřebení. Každopádně lze konstatovat, že korunka použitá takto krátce a s přispěním účinků chladicí kapaliny, nezaznamenala výrazného narušení struktury povrchu.



Obr. 63.: Korunka Iscar použitá při vrtání s chladicí kapalinou.



Obr. 64.: Korunka Iscar použitá při vrtání s chladicí kapalinou – Pohled shora.



Obr. 65.: Korunka Iscar použitá při vrtání s chladicí kapalinou – Pohled na břít.



Obr. 66.: Korunka Iscar použitá při vrtání s chladicí kapalinou – Detail břitu.



Obr. 67.: Korunka Iscar použitá při vrtání s chladicí kapalinou – Abrasivní opotřebení na hřbetu.

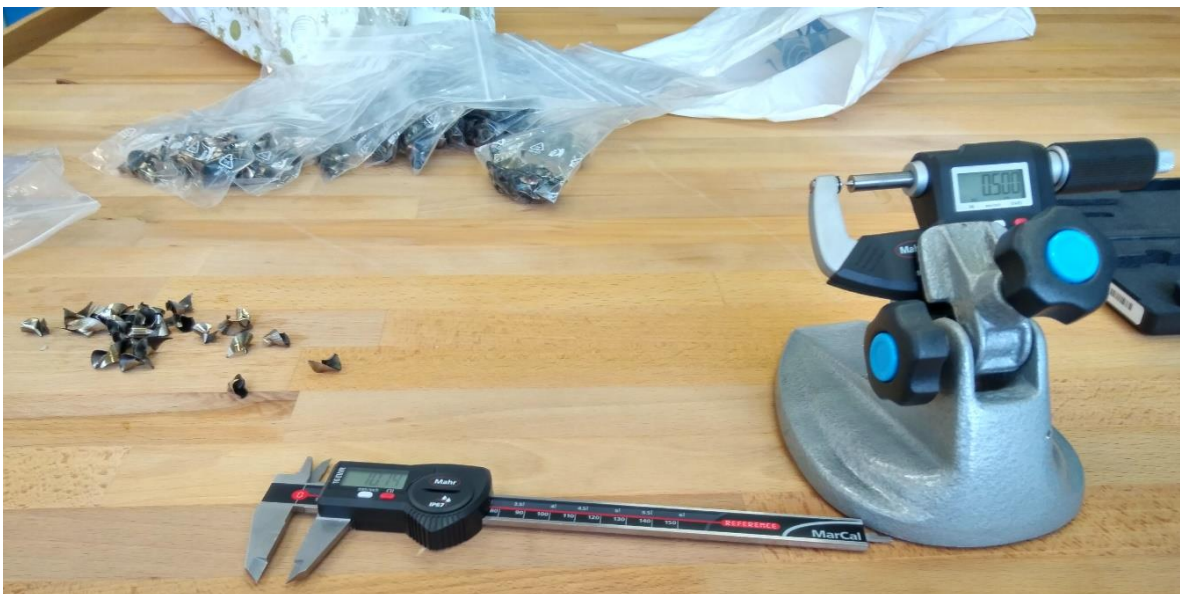


11 Měření tlouštěk třísek pomocí mikrometru Mahr

Následující měření se zabývá měřením tloušťky jednotlivých třísek. Z každé skupiny třísek vzniklých za stejných řezných podmínek jsem zvolil 3 třísky, provedl měření pomocí digitálního mikrometru Mahr, změřené hodnoty zprůměroval a poté vyexportoval z vytvořených tabulek do grafů, za účelem snazších porovnání výsledků měření v názorné grafické podobě.

Pro měření tlouštěk třísek byl využit digitální třmenový mikrometr 25 – 50 mm Mahr, typ EWR, IP 65, s výstupem dat. Tento mikrometr byl pro snazší měření upevněn ve stojanu. Mikrometr Mahr využívá například funkci ABS (přepnutí z relativního na absolutní měření), 0 (vynulování ukazatele pro relativní měření), přepínání mm/inch nebo PRESET (přednastavení míry).

Mikrometr Mahr obsahuje voděodolný měřicí systém, ochranné krytí dle IP65, a také kapacitní měřicí systém. Životnost baterie je přibližně 2 roky. Mikrometr Mahr disponuje vysoce kontrastním LC displejem s 8,5 mm vysokými číslicemi, doteky osazené TK plátky, tlačítka z materiálu UltradurR s vynikající chemickou odolností. Během měření umožňuje zároveň využití rychloposuvu.

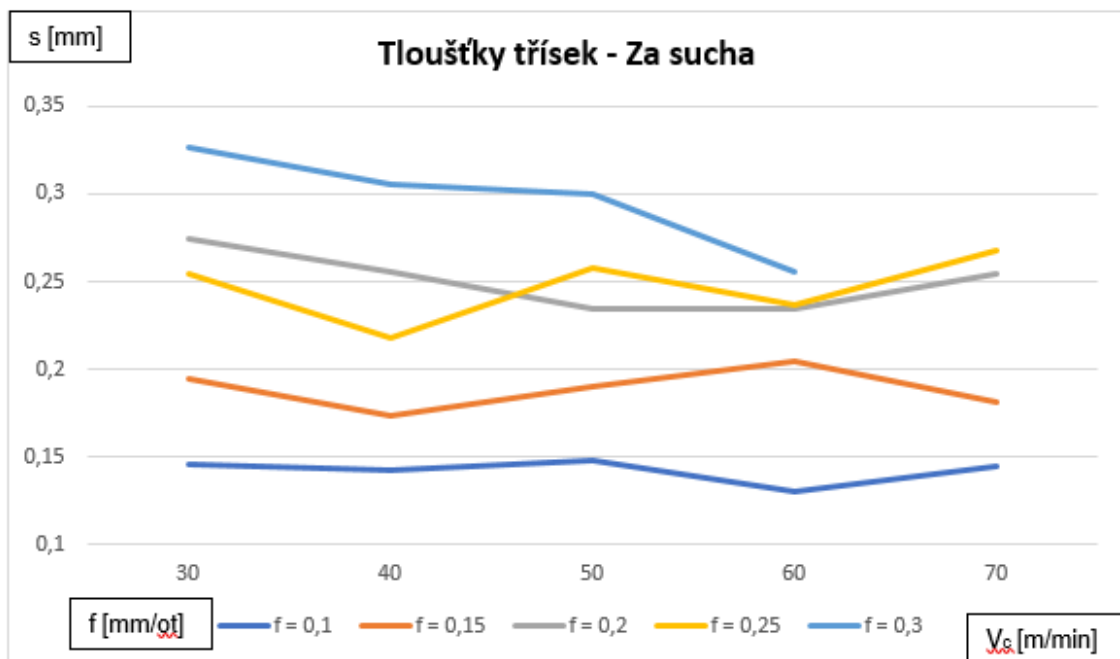


Obr. 68.: Digitální posuvné měřítko a digitální třmenový mikrometr Mahr se stojanem.



Tloušťky třísek - Za sucha - ϕ hodnota v mm					
X	f (mm/ot)				
V_c (m/min)	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3
30	0,146	0,195	0,274	0,254	0,327
40	0,142	0,173	0,255	0,218	0,306
50	0,148	0,19	0,235	0,258	0,3
60	0,13	0,205	0,235	0,237	0,256
70	0,145	0,181	0,254	0,268	X

Tab. 8.: Naměřené hodnoty tloušťek – Za sucha.

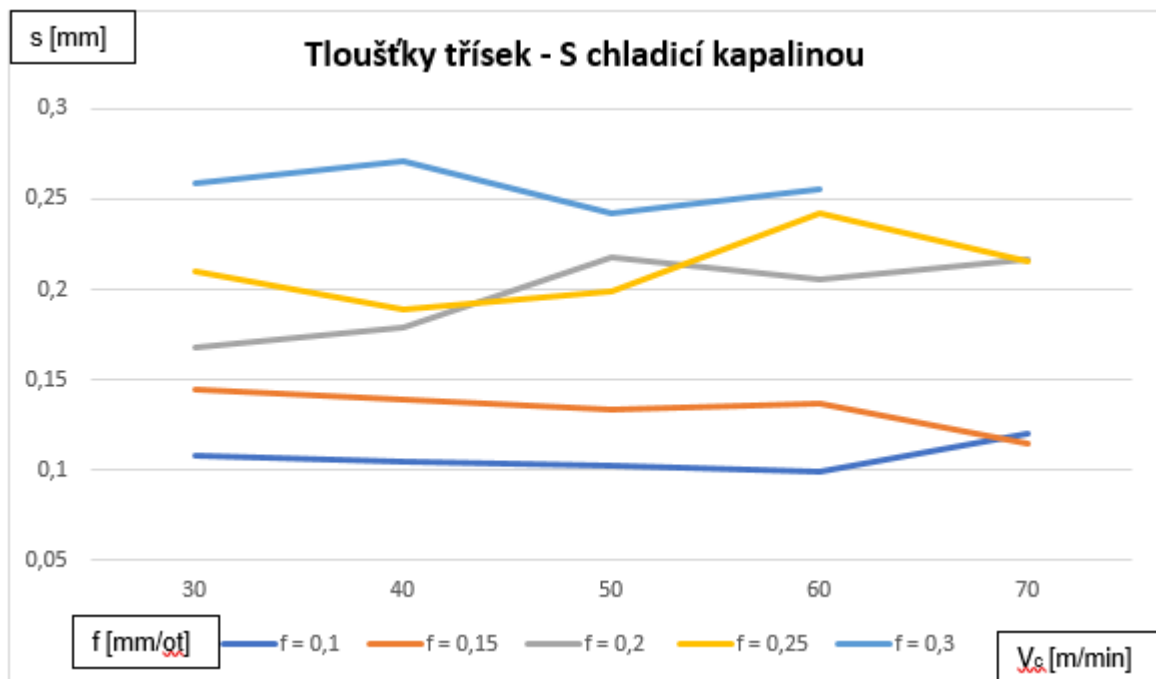


Obr. 69.: Tloušťky třísek v závislosti na f pro různá v_c – Za sucha.



Tloušťky třísek - S chladicí kapalinou - ϕ hodnota v mm					
X	f (mm/ot)				
V _c (m/min)	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3
30	0,108	0,145	0,168	0,21	0,259
40	0,104	0,139	0,179	0,189	0,271
50	0,102	0,133	0,218	0,199	0,242
60	0,099	0,137	0,206	0,242	0,256
70	0,12	0,115	0,217	0,216	X

Tab. 9.: Naměřené hodnoty tlouštěk třísek – S chladicí kapalinou.



Obr. 70.: Tloušťky třísek v závislosti na f pro různá v_c – S chladicí kapalinou.

Pro měření tlouštěk třísek bylo použito mikrometru Mahr upevněného ve stojanu. Hodnoty tlouštěk třísek vyšly mírně vyšší u vrtání za sucha. Lze říci, že u všech posuvů je za sucha tato hodnota vyšší přibližně o 0,05 mm. To je způsobeno vyšším koeficientem tření při vrtání bez rezné kapaliny a tedy docházelo k většímu pýchování.

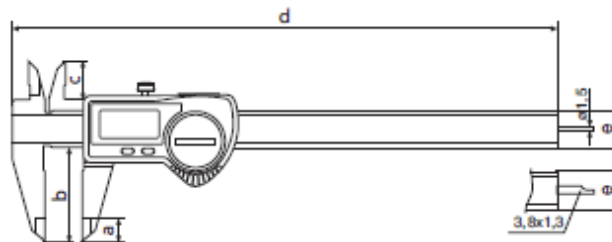


12 Měření průměrů třísek pomocí posuvného měřítka MarCal

Pro měření průměrů třísek bylo použito digitální posuvné měřítko MarCal. Digitální posuvné měřítko MarCal 16 EWR využívá okamžité měření díky systému Reference – systém. Maximální měřicí rychlost je 2,5 m/s (100"/s). Obsahuje vysoce kontrastní LCD displej s 8,5 mm vysokými číslicemi. Jezdec a vodící tyč je z kalené nerezové oceli.

Technické parametry:

- Rozsah měření: 200 mm
- Rozlišení: 0,01 mm
- Mezní chyba: 0,03 mm
- Hloubkoměr



Obr. 71.: Digitální posuvné měřítko MarCal 16 EWR.

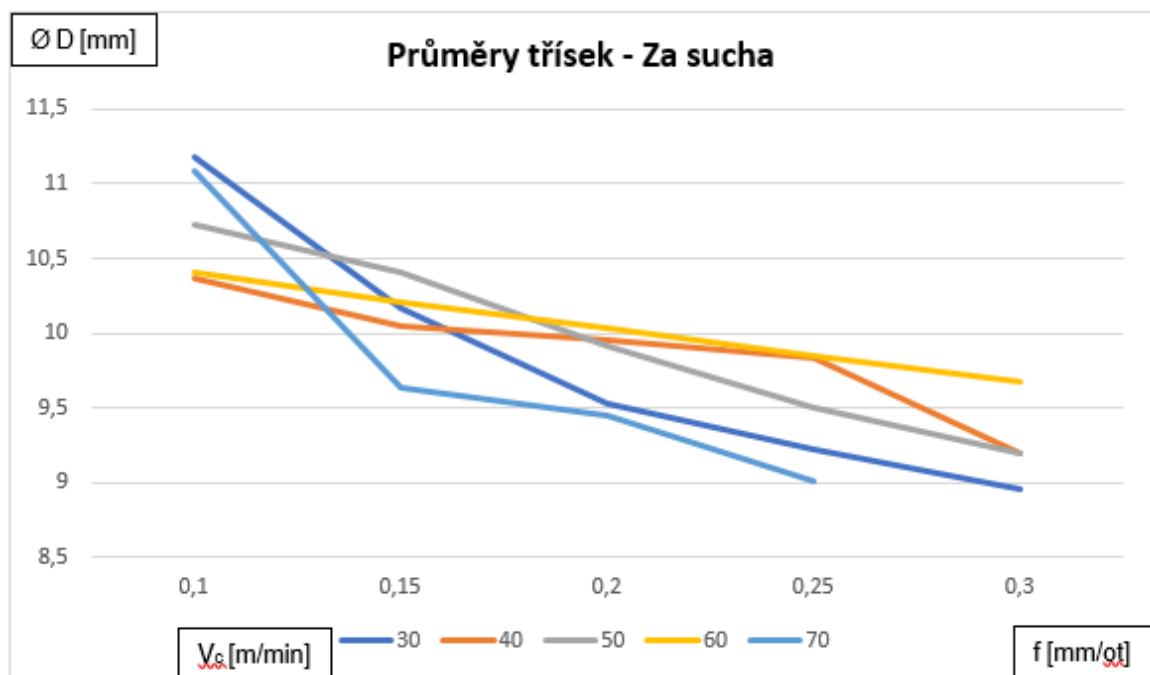
Rozměry:

$a = 10 \text{ mm}$, $b = 50 \text{ mm}$, $c = 19 \text{ mm}$, $d = 285 \text{ mm}$, $e = 16 \times 3,5 \text{ mm}$



Průměry třísek - Za sucha - ϕ hodnota v mm					
X	f (mm/ot)				
V_c (m/min)	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3
30	11,18	10,17	9,53	9,22	8,95
40	10,36	10,05	9,95	9,83	9,2
50	10,72	10,41	9,91	9,5	9,2
60	10,41	10,21	10,03	9,85	9,68
70	11,09	9,64	9,45	9,01	X

Tab. 10.: Naměřené hodnoty průměrů třísek – Za sucha.

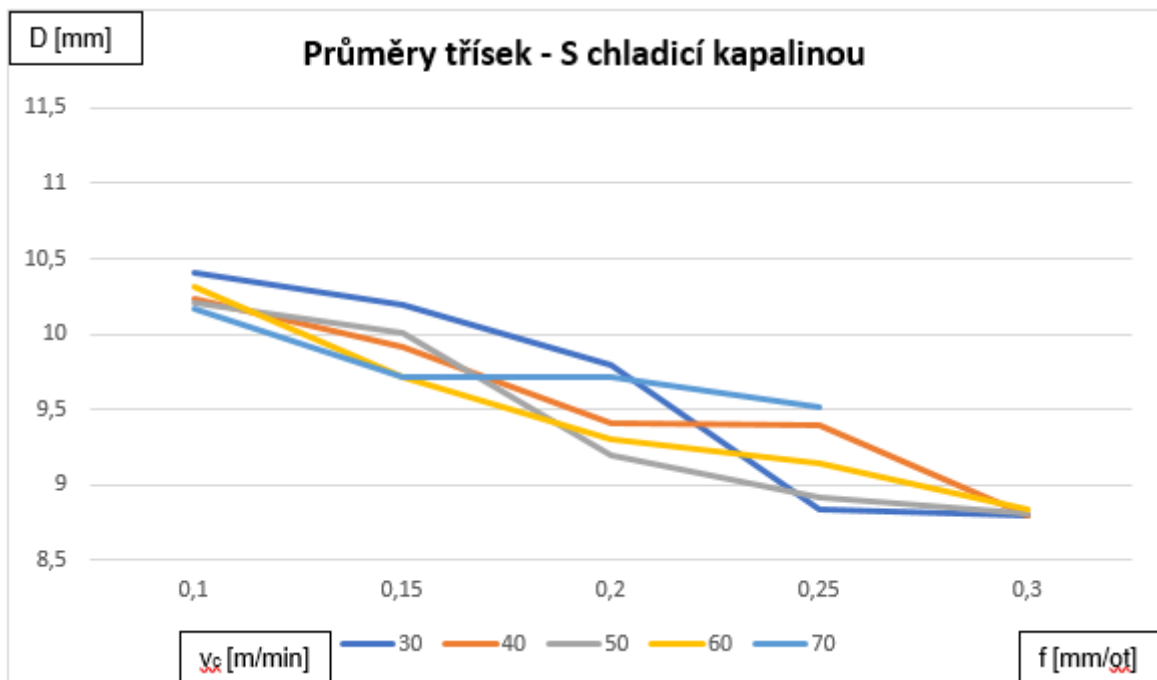


Obr. 72.: Průměry třísek v závislosti na f pro různá v_c – Za sucha.



Průměry třísek - S chladicí kapalinou - ϕ hodnota v mm					
X	f (mm/ot)				
V_c (m/min)	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3
30	10,4	10,2	9,8	8,84	8,79
40	10,24	9,91	9,41	9,4	8,8
50	10,21	10,01	9,19	8,91	8,81
60	10,31	9,72	9,3	9,14	8,84
70	10,17	9,72	9,71	9,51	X

Tab. 11.: Naměřené hodnoty průměrů třísek – S chladicí kapalinou.



Obr. 73.: Průměry třísek v závislosti na f pro různá v_c – S chladicí kapalinou.

Pro měření průměrů bylo použito digitální posuvné měřítko MarCal 16 EWR. Při porovnání výsledků měření průměrů třísek, respektive jejich největšího charakteristického kornoutku bylo zjištěno, že za extrémního posuvu $f = 0,3$ jsou hodnoty za sucha i s použitím chladicí kapaliny téměř identické. Totéž lze tvrdit i při posuvu nejmenším $f = 0,1$, kde se také pohybujeme v úzkém pásmu hodnot průměrů v rozmezí 10 - 11 mm. Při podmínkách $f = 0,2$ a $v_c = 40$ jsou hodnoty průměrů

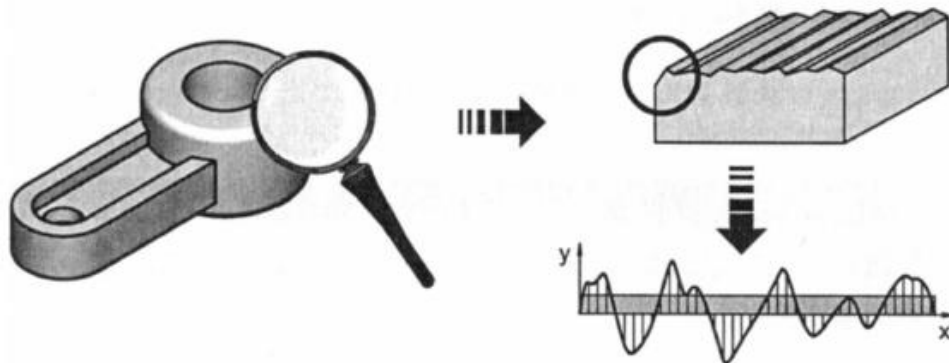


DIPLOMOVÁ PRÁCE **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**

téměř identické za sucha i s chladicí kapalinou, na průměr komoutku tedy ne/použití kapaliny nemá zjevný vliv. Z naměřených hodnot průměrů třísek a vynesných grafických závislostí obecně vyplývá, že s rostoucím posuvem se zmenšuje průměr třísek za sucha i s použitím chladicí kapaliny.

13 Měření drsnosti děr

Drsnost představuje souhrn nerovností povrchu s relativně malou vzdáleností, které vznikají v průběhu nebo vlivem výroby. Do drsnosti se nezahrnují vady povrchu, za něž považujeme náhodné nepravidelné nerovnosti s ojedinělým výskytem (risky, trhlinky, důlky...) vznikající vadami materiálu nebo poškozením. Drsnost povrchu se liší dle druhu, vzhladu a hloubky stop, které na povrchu součásti zanechává nástroj po obrábění. [34]



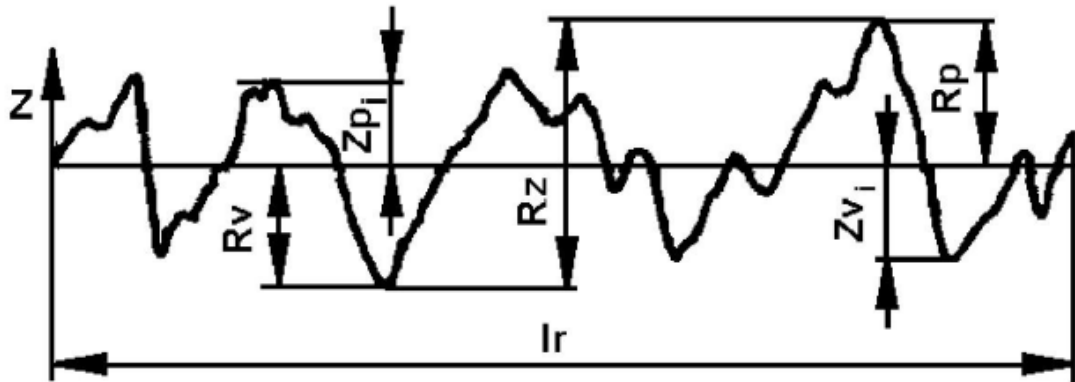
Obr. 74.: Profil obrobeného povrchu. [34]

Výsledná hodnota drsnosti závisí na nejrůznějších faktorech. Mezi nejdůležitější patří fyzikální a mechanické vlastnosti obráběného materiálu, geometrie břitu, velikost posuvu a řezná rychlost.



13.1 R - Parametry drsnosti

Parametry drsnosti se vyhodnocují na skutečných profilech, které se získávají jako průsečnice kolmé, případně šikmé roviny se skutečným povrchem.



Obr.75.: Zobrazení výšky profilu drsnosti. [34]

13.1.1 Rp - Největší výška výstupku profilu

Rp je největší výška výstupků profilu Zp v rozsahu základní délky lr. Zp se definuje jako vzdálenost mezi střední čarou a nejvyšším bodem výstupku profilu.

13.1.2 Rv - Největší hloubka prohlubně profilu

Rv je délka Zv nejnižší prohlubně profilu v rozsahu základní délky lr. Zv se definuje jako vzdálenost mezi střední čarou a nejnižším bodem prohlubně profilu.

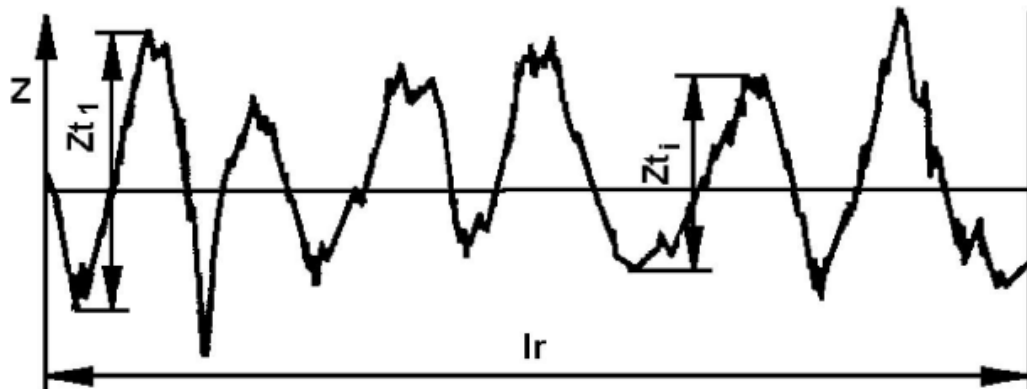
13.1.3 Rz - Největší výška profilu

Největší výška profilu Rz je součtem nejvyššího výstupku Zp a nejnižší prohlubně profilu Zv v rozsahu základní délky lr.

13.1.4 Rc - Průměrná výška prvků profilu

Rc je průměrná hodnota výšek Zt prvků profilu v rozsahu základní délky. Výška prvku profilu Zt je definována jako součet výšky výstupku a hloubky prohlubně prvku profilu.

$$R_c = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Z_{t_i} \quad (11)$$



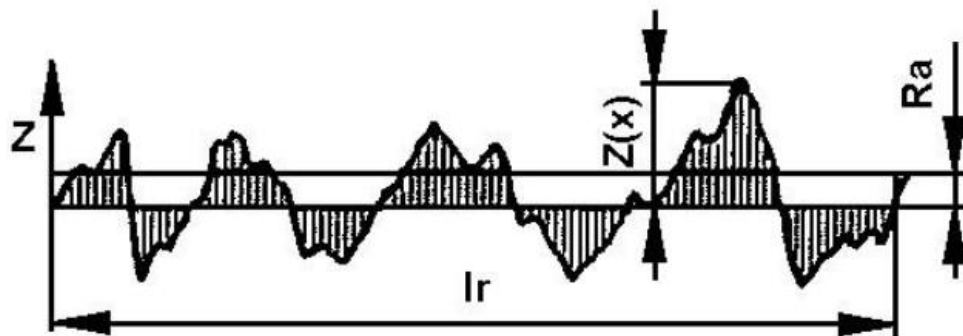
Obr. 76.: Parametry pro stanovení Rc. [34]

13.1.5 Rt - Celková výška profilu

Rt je součet nejvyššího výstupku profilu Z_p a nejnižší prohlubně profilu Z_v v rozsahu vyhodnocované délky l_n . [34]

13.1.6 Ra - Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu

Střední aritmetická úchylka profilu R_a je nejpoužívanější metodou pro hodnocení drsnosti povrchu v České republice. K měření drsnosti se využívá kritérium středního prvku, takzvané střední čáry profilu – čáry nejmenších čtverců. Jde o aritmetický průměr absolutních hodnot pořadnic $Z(x)$ v rozsahu základní délky.



Obr. 77.: Parametry pro stanovení Rc. [34]

Střední čára profilu má tvar geometrického povrchu (například přímky, kružnice nebo evolventy), je paralelní s hlavním směrem profilu a rozděluje zjištěný povrch tak, že v rozsahu základní délky je minimální součet čtverců úchylek tohoto profilu od střední čáry m . Na grafickém záznamu povrchu profilu se střední čára prokládá tak, aby součty ploch po obou jejích stranách byly v rozsahu základní délky stejné. [35]

$$S_1 + S_2 + \dots + S_n = S'_1 + S'_2 + \dots + S'_n \quad (12)$$



DIPLOMOVÁ PRÁCE Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

Vztahy pro výpočet střední aritmetické úchyly R_a :

$$\text{Integrální metoda určení } R_a: \quad R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx \quad (13)$$

$$\text{Statistická metoda určení } R_a: \quad R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y(x)| \quad (14)$$

R_a je výškový parametr, který udává střední hodnotu vzdáleností zkoumaného povrchu od střední čáry daného profilu. Jedná se pouze o statistickou hodnotu, a proto nemusí být vždy efektivní při hodnocení drsnosti povrchu. Například dva povrchy se stejnou hodnotou R_a mohou mít zcela odlišný tvar profilu povrchu a také se mohou vyznačovat jiným chováním z hlediska funkčnosti nebo životnosti součásti. Je to způsobeno tím, že dle definice se při stanovení parametru R_a nerozlišuje mezi výstupky a prohlubněmi. Přesto tento parametr patří k jednomu z nejpoužívanějších pro hodnocení drsnosti povrchu. [35]

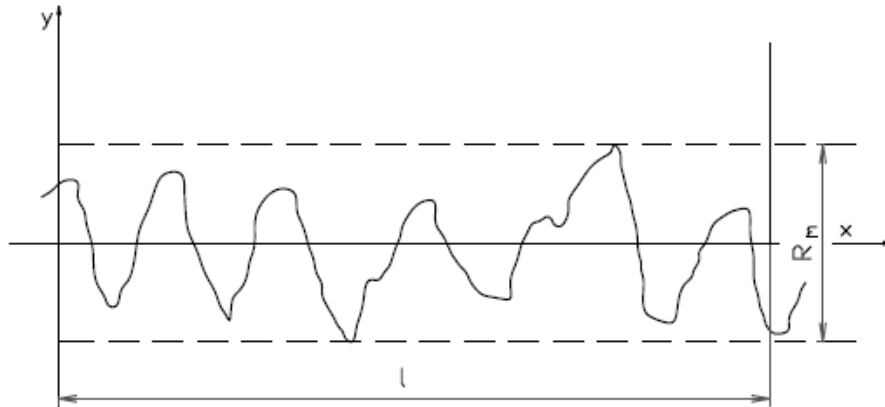
Hodnoty drsnosti R_a v μm	Způsob výroby
1,6	ruční pilování jemné
1,6 až 0,2	soustružení
1,6 až 0,4	vrtání, vyvrtávání
0,4 až 0,025	broušení do kulata
0,4 až 0,025	broušení vnitřní
0,4	broušení na plocho
3,2 až 1,6	hoblování
0,8	protahování jemné
0,8	vystružování
3,2 až 0,8	frézování
0,1 až 0,05	lapování
3,2 až 0,025	hoblování a superfiniš

Tab. 12.: Doporučené hodnoty střední aritmetické úchyly R_a .



13.1.7 R_m (R_{max}) - Největší výška nerovnosti

Největší výška nerovností R_m je součtem vrcholu největšího výstupku a nejnižšího bodu prohlubně v absolutních hodnotách.



Obr. 78.: Parametr stanovení R_m (R_{max}). [35]

$$R_m = |Y_{r \max}| + |Y_{p \max}| \quad (15)$$

Y_{max} – Vrchol největšího výstupku

$Y_{p \max}$ – Nejnižší bod prohlubně

13.2 Měření drsnosti děr pomocí drsnoměru Marsurf PS 10

Měření drsnosti děr v obrobku z materiálu S 960 QL předcházelo důkladné vyčištění prostoru uvnitř děr, aby měření bylo přesnější a zbytky třísek nebo chladicí kapaliny neulpívaly uvnitř děr. Pro měření byl využit přenosný drsnoměr Marsurf PS 10. Před měřením bylo zapotřebí ještě zkalibrovat přístroj, přičemž kalibrační etalon je umístěn přímo v drsnoměru. Měřily se celkem tři parametry – R_a , R_z a R_m . Měření každé díry proběhlo celkem třikrát a pokaždé v trochu jiném místě. Tyto hodnoty byly zprůměrovány a vyneseny do tabulek, následně pak do grafů pro větší názornost.

Přenosný drsnoměr Marsurf PS 10 je určen k mobilnímu využití. Jeho ovládání je intuitivní, podobně jako ovládání chytrého telefonu. Drsnoměr disponuje velkým podsvíceným TFT dotykovým displejem velikosti 4,3". Tlačítko Start slouží současně jako tlačítko k přímému přechodu na výchozí obrazovku. Drsnoměr umožňuje ukládání dat jako soubor ve formátu TXT, X3P, CSV a PDF. Přístroj je flexibilní a s vyjímatelnou posuvovou jednotkou.

Drsnoměr Marsurf umožňuje měřit 31 parametrů. Měřené veličiny jsou například: R_a , R_q , R_z , R_{max} , R_p , R_k , R_{vk} , R_t , R_{Pc} , R_{mr} , R_{Sm} , R_{Sk} , R_S nebo R_x .



DIPLOMOVÁ PRÁCE Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

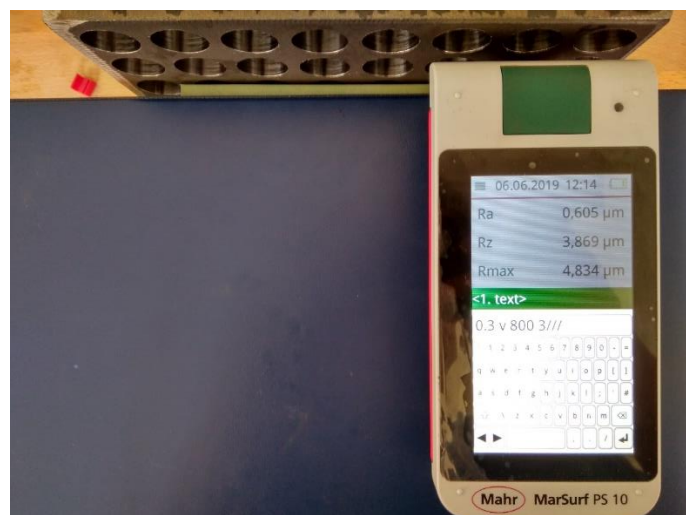
Pro účely této práce jsem vyhodnocoval 3 z 31 možných parametrů: Ra, Rz a Rmax. Drsnoměr Marsurf PS 10 využívá snímací hrot o velikosti 2 μm , přičemž rozsah měření je 350 μm .



Obr. 79.: Drsnoměr MarSurf PS 10.



Obr. 80.: MarSurf PS 10.

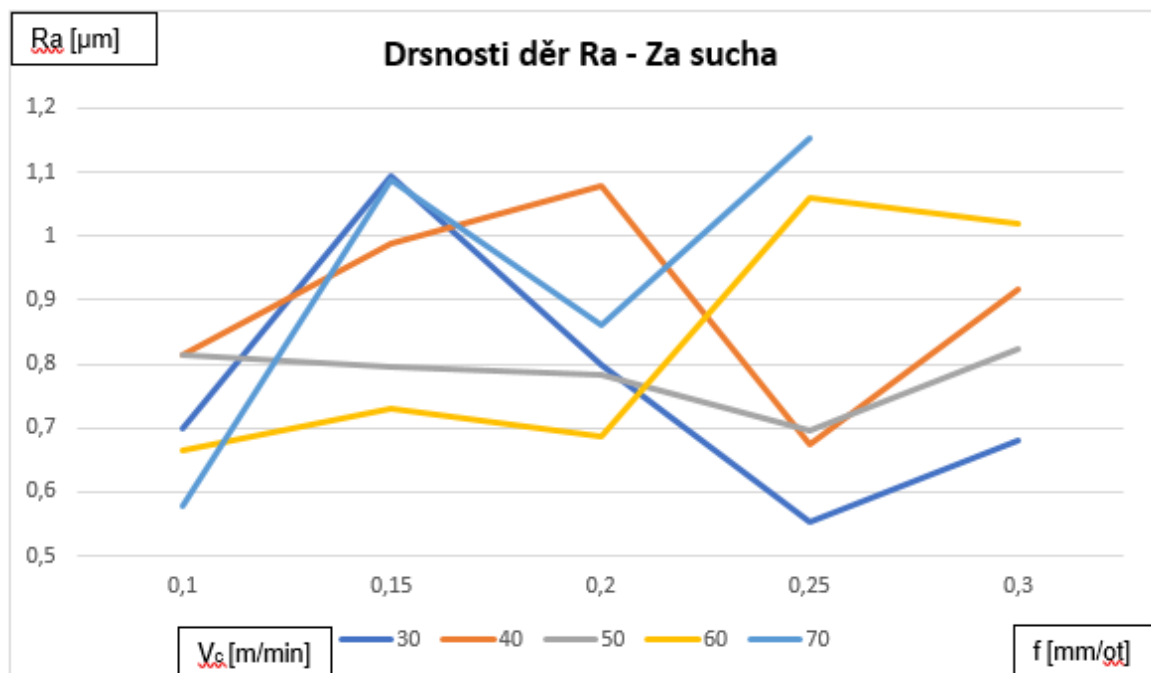


Obr. 81.: Přenosný drsnoměr MarSurf PS 10 při měření odvrтанých děr v obrobku.



Drsnosti děr Ra - Za sucha - ø hodnota v μm					
X	f (mm/ot)				
Vc (m/min)	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3
30	0,698	1,094	0,798	0,554	0,68
40	0,815	0,987	1,079	0,675	0,916
50	0,814	0,797	0,782	0,695	0,824
60	0,664	0,729	0,686	1,061	1,018
70	0,579	1,087	0,86	1,152	X

Tab. 13.: Naměřené hodnoty Ra – Za sucha.

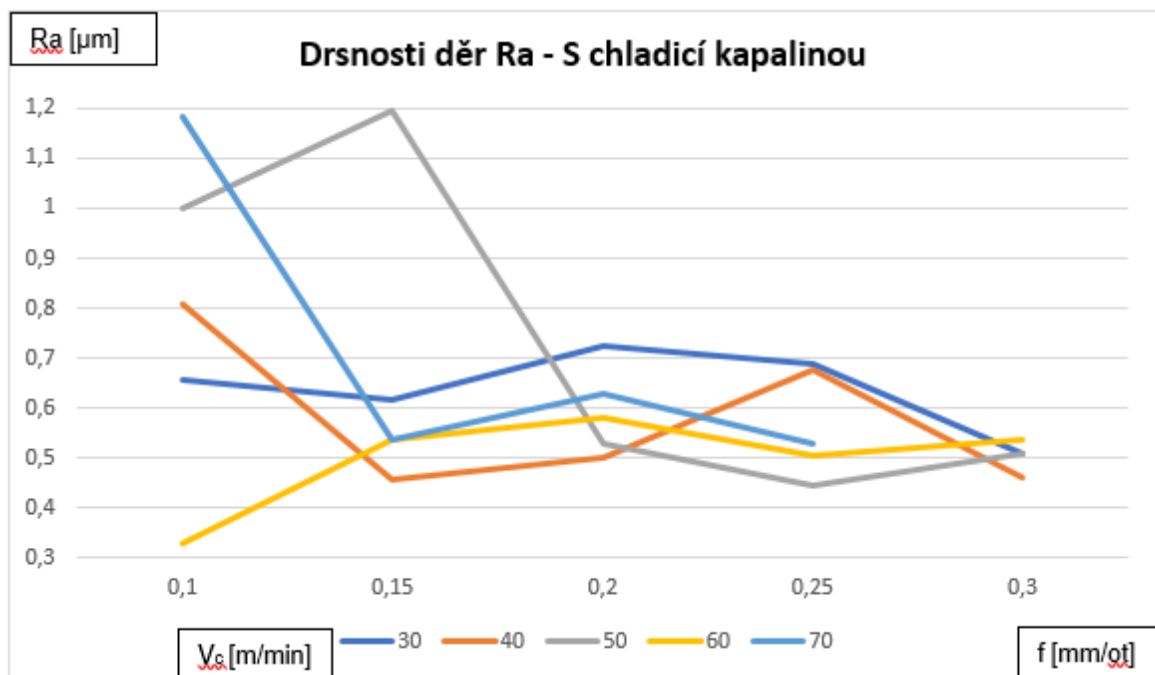


Obr. 82.: Drsnosti děr Ra v závislosti na f pro různá v_c – Za sucha.



Drsnosti děr Ra - S chladicí kapalinou - ø hodnota v μm					
X	f (mm/ot)				
Vc (m/min)	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3
30	0,656	0,617	0,725	0,69	0,51
40	0,808	0,455	0,5	0,675	0,459
50	1,001	1,195	0,527	0,444	0,509
60	0,328	0,538	0,58	0,503	0,538
70	1,184	0,537	0,627	0,53	X

Tab. 14.: Naměřené hodnoty Ra – S chladicí kapalinou.



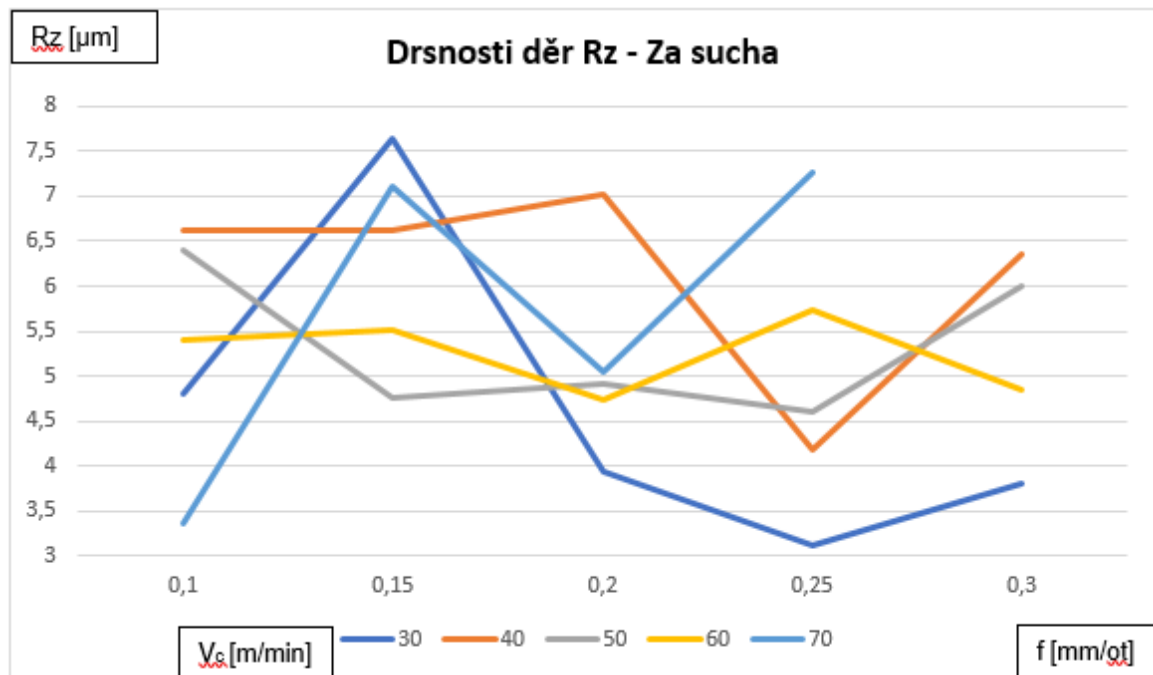
Obr. 83.: Drsnosti děr Ra v závislosti na f pro různá v_c – S chladicí kapalinou.

Jako ideální řezné podmínky z pohledu utváření a odchodu třísky jsem určil $f = 0,2$ mm/ot. a $v_c = 40$ m/min. Za těchto podmínek se příkon stroje pohyboval na stabilní hodnotě a nekolísal, tříska hladce odcházela z místa řezu a nehromadila se ve šroubovici. Zvukový projev řezného procesu byl hladký a bez náhodných vybočení tónu a lomození.



Drsnosti děr Rz - Za sucha - ø hodnota v μm					
X	f (mm/ot)				
Vc (m/min)	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3
30	4,808	7,653	3,93	3,115	3,792
40	6,625	6,615	7,017	4,172	6,354
50	6,389	4,758	4,904	4,6	5,998
60	5,406	5,501	4,736	5,734	4,835
70	3,348	7,103	5,05	7,266	X

Tab. 15.: Naměřené hodnoty Rz – Za sucha.

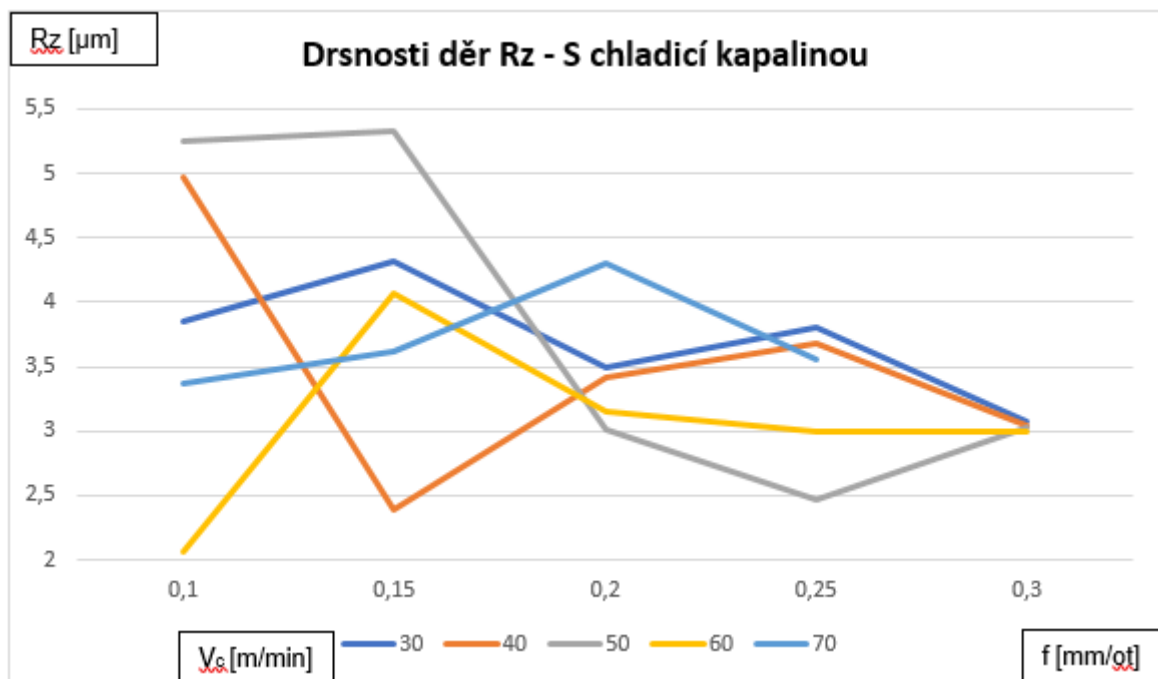


Obr. 84.: Drsnosti děr Rz v závislosti na f pro různá v_c – Za sucha.



Drsnosti děr Rz – S chladicí kapalinou - \varnothing hodnota v μm					
X	f (mm/ot)				
Vc (m/min)	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3
30	3,854	4,319	3,488	3,806	3,067
40	4,978	2,391	3,41	3,68	3,035
50	5,244	5,329	3,014	2,467	3,028
60	2,068	4,068	3,156	2,996	3,002
70	3,369	3,621	4,295	3,562	X

Tab. 16.: Naměřené hodnoty Rz – S chladicí kapalinou.



Obr. 85.: Drsnosti děr Rz v závislosti na f pro různá v_c – S chladicí kapalinou.

Pokud budeme u porovnání hodnot Rz opět uvažovat ideální podmínky pro tvorbu třísky ($f = 0,2$ a $v_c = 40$) zjistíme, že stejně jako u Ra je hodnota Rz výrazně vyšší za sucha než s chlazením chladicí kapalinou. Jak u Ra, tak i u Rz je hodnota při těchto podmínkách v podstatě dvojnásobná. U vrtání za sucha při posuvu $f = 0,25$ Rz výrazně roste s řeznou rychlostí, naopak s chladicí kapalinou je Rz stabilnější.

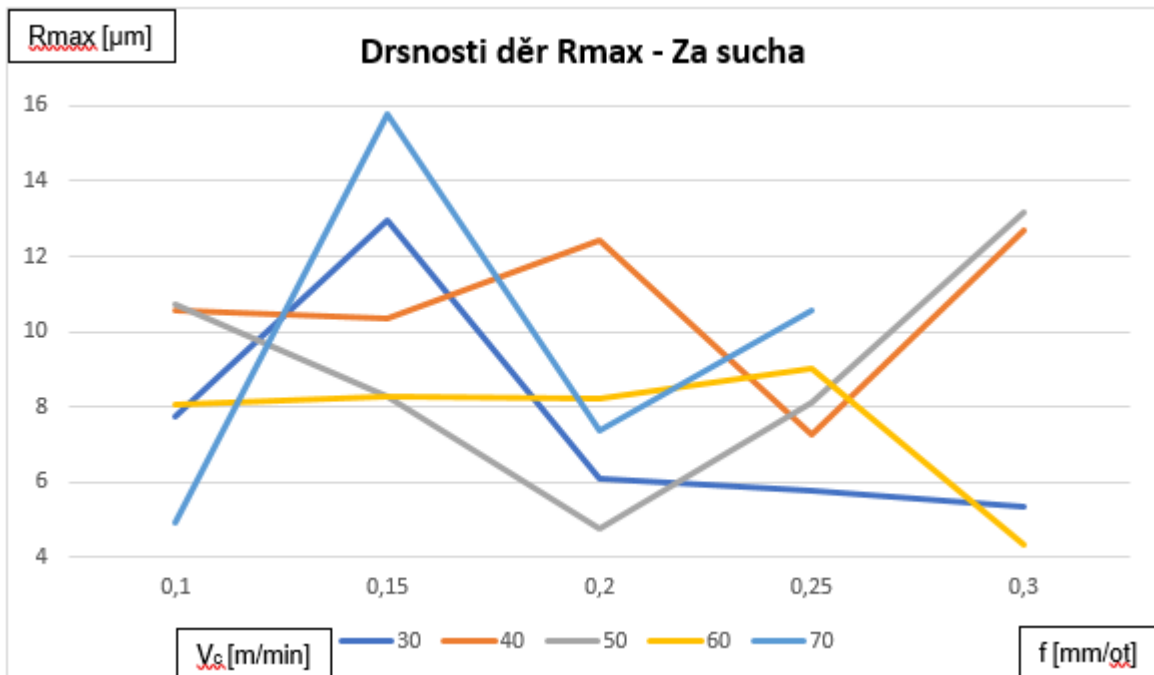


DIPLOMOVÁ PRÁCE Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

Budeme-li uvažovat řezné podmínky, za kterých se tvoří ideální tříška ($f = 0,2 \text{ mm/ot}$ a $v_c = 40 \text{ m/min}$) je evidentní, že za těchto podmínek je drsnost povrchu R_a výrazně vyšší u vrtání za sucha. Totéž platí i pro extrémní posuv $f = 0,3$. Při tomto posuvu je ještě drsnost R_a velice proměnlivá u vrtání za sucha, u vrtání s chladicí kapalinou jsou hodnoty R_a stabilnější.

Drsnosti děr R_{max} - Za sucha - ϕ hodnota v μm					
X	f (mm/ot)				
V_c (m/min)	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3
30	7,728	12,938	6,085	5,789	5,348
40	10,562	10,346	12,418	7,252	12,694
50	10,698	8,28	4,759	8,095	13,185
60	8,069	8,29	8,204	9,031	4,325
70	4,899	15,789	7,361	10,569	X

Tab. 17.: Naměřené hodnoty R_{max} – Za sucha.

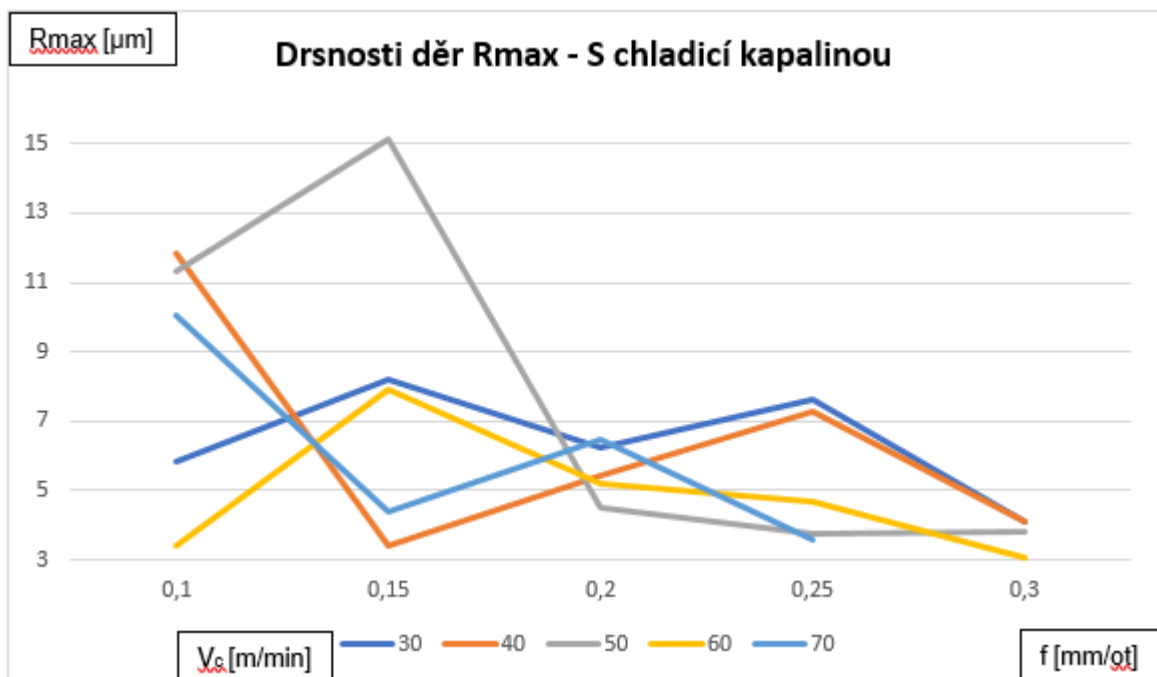


Obr. 86.: Drsnosti děr R_{max} v závislosti na f pro různá v_c – Za sucha.



Drsnosti děr R_{max} – S chladicí kapalinou - ϕ hodnota v μm					
	f (mm/ot)				
V_c (m/min)	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3
30	5,847	8,183	6,234	7,6	4,121
40	11,844	3,398	5,422	7,253	4,101
50	11,343	15,119	4,504	3,78	3,834
60	3,428	7,935	5,177	4,654	3,042
70	10,036	4,386	6,483	3,609	X

Tab. 18.: Naměřené hodnoty R_{max} – S chladicí kapalinou.



Obr. 87.: Drsnosti děr R_{max} v závislosti na f pro různá v_c – S chladicí kapalinou.

Uvažujeme-li u vyhodnocování hodnoty R_m (R_{max}) opět ideální podmínky pro tvorbu třísky ($f = 0,2$ a $v_c = 40$), dojdeme k obdobným závěrům jako u R_a a R_z . Hodnota R_{max} je za sucha více než dvojnásobná. Při extrémním posuvu $f = 0,3$ je opět evidentní, že za sucha se hodnoty R_{max} výrazně mění, naopak s chlazením jsou hodnoty R_{max} stálejší.



13.3 Zhodnocení měření drsnosti – Ra, Rz a Rmax

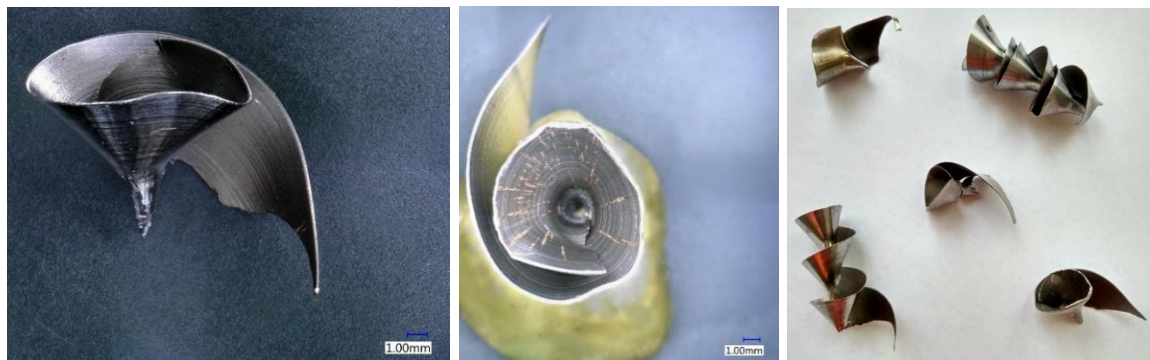
Měření drsnosti probíhalo v laboratorních podmínkách pomocí přenosného drsnoměru Marsurf PS 10 určeného k mobilnímu využití. Celkem bylo vyvrtáno 48 děr – 24 za sucha a 24 za použití chladicí kapaliny. Bylo nutné změřit všechny díry, což jsem provedl třikrát a následně vyhodnotil průměrné hodnoty Ra, Rz a Rm, které jsem zanesl do tabulek a grafů.

Po porovnání grafů za sucha a s chlazením vždy vycházelo u Ra, Rz i Rmax, že hodnoty při ideálních podmínkách pro tvorbu třísky ($f = 0,2$ a $v_c = 40$) jsou za sucha přibližně dvojnásobně větší. Vyšší hodnoty drsnosti povrchu po obrábění za sucha jsou způsobeny vlivem tření, které je u obrábění za sucha větší než s kapalinou. Zhoršení drsnosti povrchu bez kapaliny rovněž souvisí s horším odchodem třísky z místa řezu. Chladicí kapalina třísky snáze odvádí ze zóny řezu a má v tomto případě pozitivní vliv na tvorbu povrchu. Vzhledem k naměřeným údajům je zřejmé, že vrtání je značně komplikované z hlediska tvorby vhodného povrchu. Drsnosti vycházely různorodé, velice záleželo na citlivosti přístroje a zvoleném místě v díře, kde se drsnosti měřily. Technologie vrtání je v mnoha ohledech, například v docílení výsledné drsnosti povrchu, komplikovanější než například technologie soustružení. Proto bylo měření drsností značně subjektivní a hodnoty s rostoucím posuvem nevykazovaly jednoznačný trend, jak by se zejména u technologie soustružení dalo očekávat.



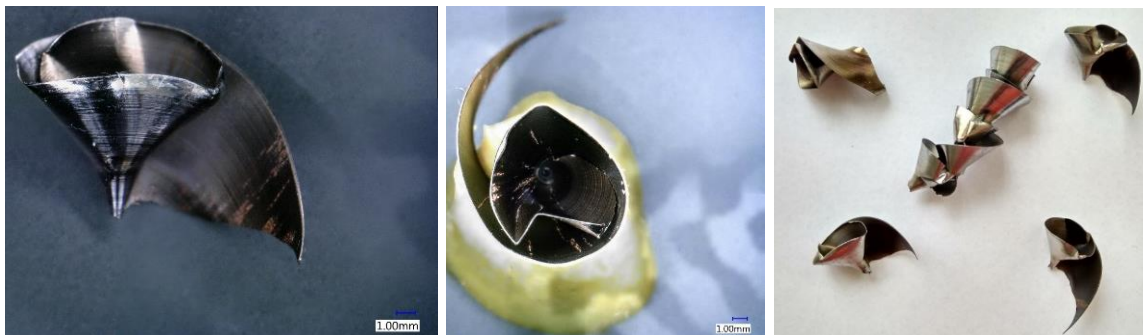
14 Experiment – Třísky utvářené při vrtání sady děr za sucha

Cílem této části experimentu je vyvrtat prvních 24 děr bez použití řezné kapaliny. Pro účely experimentu se využije pětiosé svíslé frézovací centrum Okuma MU - 400V II. K vrtání se použije vrták ISCAR Sumocham DCN A s korunkou ISCAR ICP 210 o průměru 21 mm. Tloušťka polotovaru je 40 mm a vyvrtané díry nejsou průchozí. Hloubka děr je 38 mm, tudíž se nejedná o hluboké vrtání. Snahou je pozorovat proces vrtání a proces utváření třísky, následně vyhodnotit třísky pod mikroskopem Keyence VHX – 6000 a poté zjistit oblast vhodného utváření třísky. Pro každou vrtanou díru byly zvoleny jiné řezné podmínky, aby bylo možné snadněji zaznamenávat změny a vzájemně porovnávat tvar třísky a její odchod ze zóny řezu.



Obr. 88.: Tříska vzniklá při $f = 0,1$ a $v_c = 30$ (díra 1).

Za podmínek minimálního posuvu $f = 0,1$ a nejmenší řezné rychlosti $v_c = 30$ bylo vyzorováno, že tříska po prvotním nájezdu nástroje do obrobku vytvářela charakteristické spojité vinuté třísky. Takto stočená tříska se jeví jako nevhodná pro obrábění.

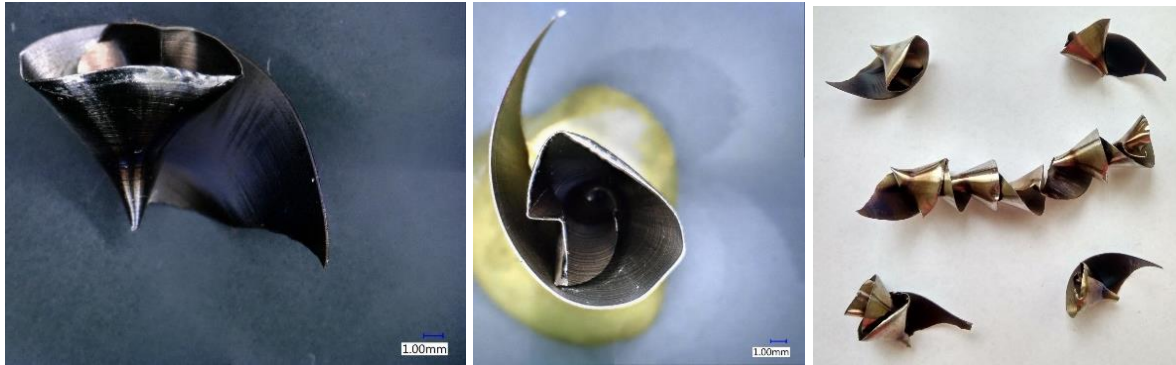


Obr. 89.: Tříska vzniklá při $f = 0,1$ a $v_c = 40$ (díra 2).



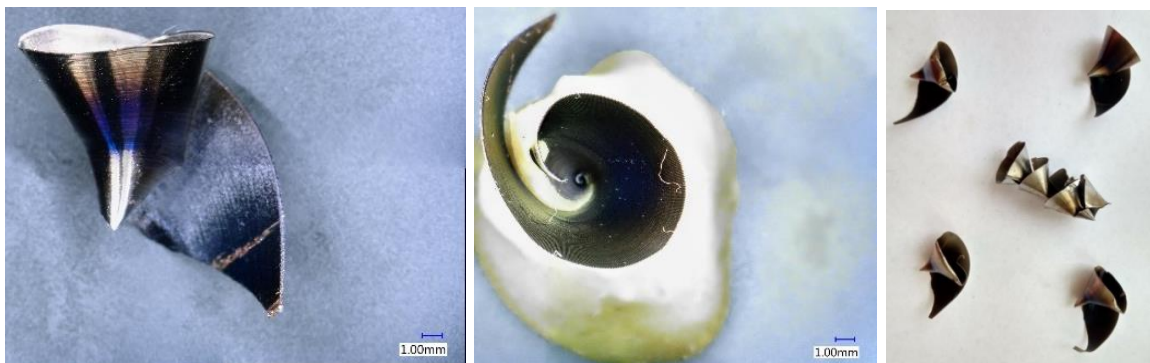
DIPLOMOVÁ PRÁCE **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**

Zvýšením řezné rychlosti ze 30 na 40 m/min se výsledná tříska zkrátila. Na pohled je více zdeformovaná. Odchod třísky z místa řezu není zcela ideální, ale díky kratším elementům je odchod snazší, než u řezné rychlosti 30 m/min.



Obr. 90.: Tříška vzniklá při $f = 0,1$ a $v_c = 50$ (díra 3).

Průběh tvorby třísky při $f = 0,1$ a $v_c = 50$ se opět komplikuje tvorbou spojitě dlouhé vinuté třísky.



Obr. 91.: Tříška vzniklá při $f = 0,1$ a $v_c = 60$ (díra 4).

Za řezných podmínek $f = 0,1$ a $v_c = 60$ se třísky již tolik nestáčí do charakteristického kornoutku jako tomu bylo v předchozích případech a rovněž nedochází k tak výrazným tvarovým deformacím. Tříška je však stále spojitá.

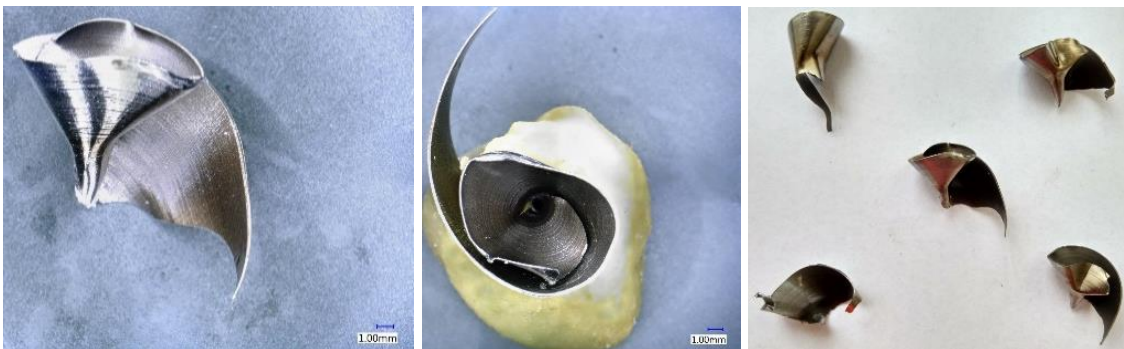


DIPLOMOVÁ PRÁCE **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**

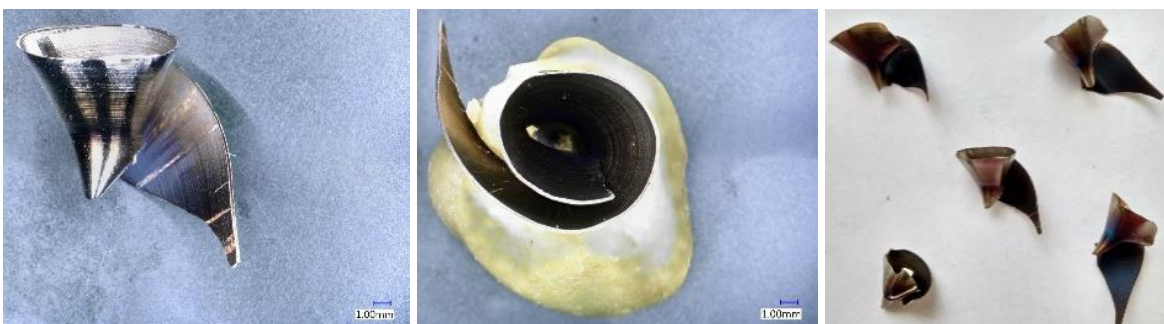


Obr. 92.: Tříška vzniklá při $f = 0,1$ a $v_c = 70$ (díra 5).

Při pozorování procesu vrtání bylo zjištěno, že při podmínkách $f = 0,1$ a $v_c = 70$ je odchod třísky komplikovanější. Třísky jsou vinuté a hůře se lámou, což komplikuje proces vrtání. Vidíme, že kombinace nejnižšího posuvu a nejvyšší řezné rychlosti je nevhodná.



Obr. 93.: Tříška vzniklá při $f = 0,15$ a $v_c = 30$ (díra 6).



Obr. 94.: Tříška vzniklá při $f = 0,15$ a $v_c = 40$ (díra 7).



Obr. 95.: Tříška vzniklá při $f = 0,15$ a $v_c = 50$ (díra 8).



Obr. 96.: Tříška vzniklá při $f = 0,15$ a $v_c = 60$ (díra 9).



Obr. 97.: Tříška vzniklá při $f = 0,15$ a $v_c = 70$ (díra 10).

Při $f = 0,15$ a $v_c = 70$ vzniká velké množství tepla, proto jsou třísky výrazně zbarvené. Existuje zde riziko rychlejšího opotřebení nástroje při dlouhodobější aplikaci těchto řezných podmínek, jelikož se nástroj více zahřívá.



DIPLOMOVÁ PRÁCE **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**



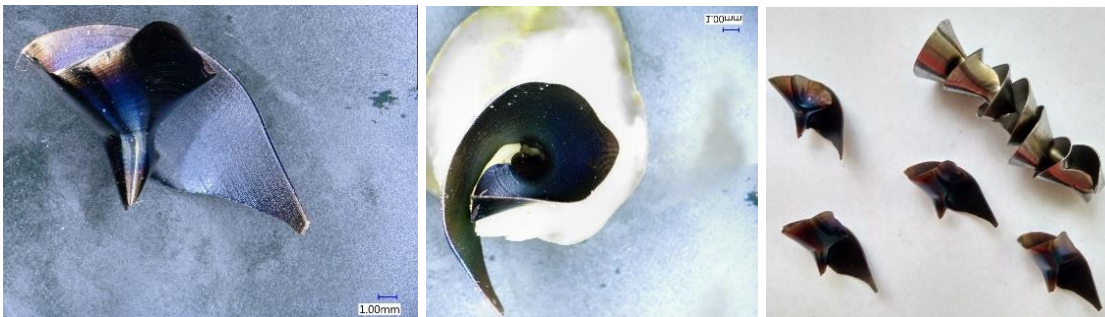
Obr. 98.: Tříška vzniklá při $f = 0,2$ a $v_c = 30$ (díra 11).

Při podmínkách $f = 0,2$ a $v_c = 30$ se tříška dělí bezprostředně po nájezdu nástroje do polotovaru a netvoří se tak charakteristická prvotní vinutá tříška. Za těchto podmínek tříška odchází z řezu bez větších problémů, avšak vzhledem k větší délce dělení a delší koncové části je zde větší riziko zasekávání třísky ve šroubovici.



Obr. 99.: Tříška vzniklá při $f = 0,2$ a $v_c = 40$ (díra 12).

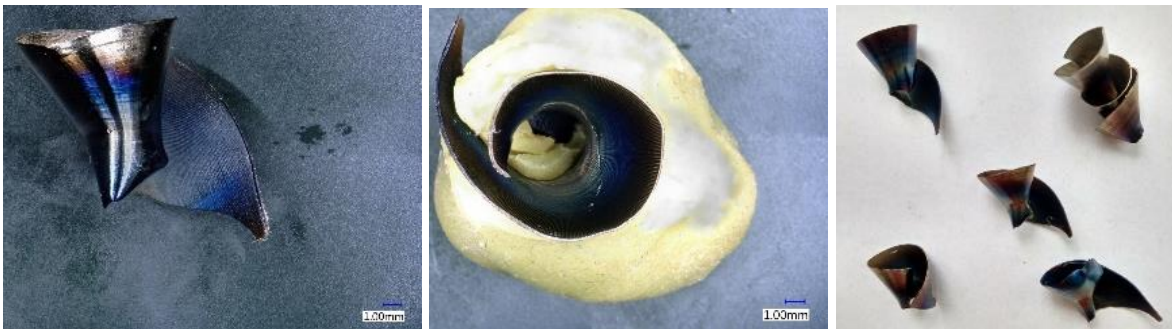
Jako vhodné podmínky pro vznik ideální špony, která má vhodný tvar se jeví posuv $f = 0,2$ a řezná rychlost $v_c = 40$. Tříška netvoří spirály a velice dobře odchází z místa řezu, čímž usnadňuje celý proces v oblasti řezání a nedochází k nadměrnému opotřebení nástroje.



Obr. 100.: Tříška vzniklá při $f = 0,2$ a $v_c = 50$ (díra 13).



Obr. 101.: Tříška vzniklá při $f = 0,2$ a $v_c = 60$ (díra 14).



Obr. 102.: Tříška vzniklá při $f = 0,2$ a $v_c = 70$ (díra 15).

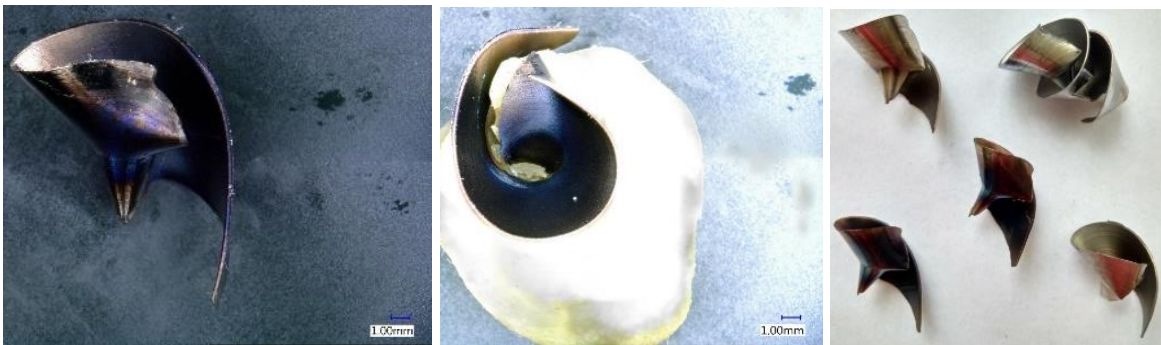
Za těchto řezných podmínek je na tříškách zjevné velké množství vznikajícího tepla. To se projevuje nejen zbarvením, ale také na tvaru, kdy mají třísky delší koncovou část danou větší houževnatostí materiálu v důsledku vzniklého tepla.

Obr. 103.: Třísky vzniklé při $f = 0,2$ a $v_c = 70$ (díra 15).



Obr. 104.: Tříška vzniklá při $f = 0,25$ a $v_c = 30$ (díra 16).

Při posuvu $f = 0,25$ a $v_c = 30$ nevzniká velké množství tepla, což je patrné ze světlého zbarvení třísek. Za těchto podmínek vznikají relativně malé třísky, které se dobře lámou, ale méně se stáčí do tvaru typického kornoutku.



Obr. 105.: Tříška vzniklá při $f = 0,25$ a $v_c = 40$ (díra 17).



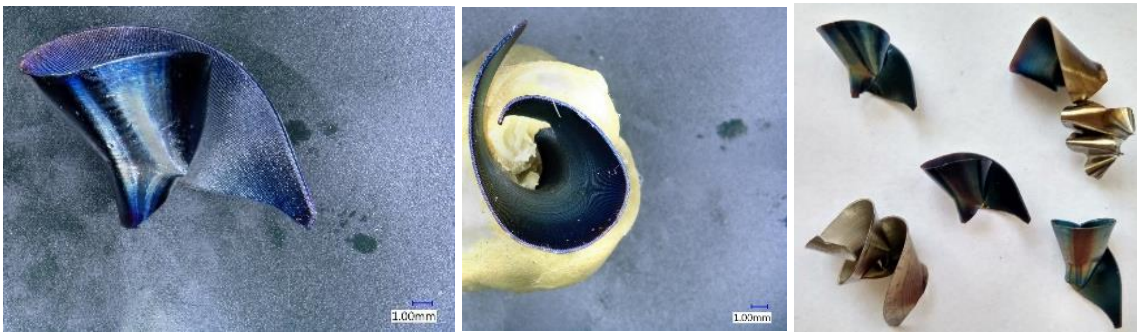
Obr. 106.: Tříška vzniklá při $f = 0,25$ a $v_c = 50$ (díra 18).

Třísky vzniklé při $f = 0,25$ a $v_c = 50$ mají proměnlivý charakter a některé třísky jsou delší, většinou ale byly vhodné z hlediska odchodu ze šroubovice vrtáku.



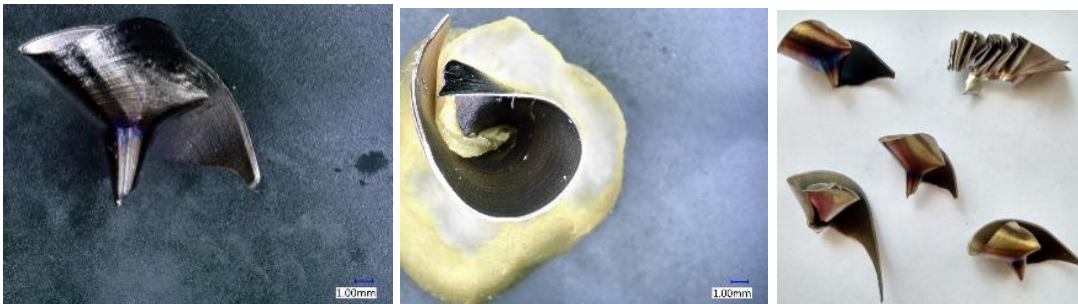
Obr. 107.: Tříška vzniklá při $f = 0,25$ a $v_c = 60$ (díra 19).

Třísky se při aplikaci řezných podmínek $f = 0,25$ a $v_c = 60$ málo stáčí do kornoutku a vzniká větší množství tepla, což je patrné z duhového zbarvení třísek a dochází k většímu prohřátí nástroje.



Obr. 108.: Tříška vzniklá při $f = 0,25$ a $v_c = 70$ (díra 20).

Při posuvu $f = 0,25$ a $v_c = 70$ vzniká velké množství tepla, což je patrné ze zbarvení třísek. Při dlouhodobější aplikaci těchto řezných podmínek by mohlo docházet k prohřátí nástroje a jeho rychlejšímu opotřebení. Na některých třískách je patrné, že se již neformují do typického tvaru kornoutku, ale mačkají se v nepravidelné tvary.



Obr. 109.: Tříška vzniklá při $f = 0,3$ a $v_c = 30$ (díra 21).

Bylo vyzorováno, že při řezných podmínkách $f = 0,3$ a $v_c = 30$ mají třísky již výrazně vyšší teplotu, než tomu bylo zejména v případě nižších posuvů. Nadměrná teplota v řezu je nežádoucím jevem. Zároveň dochází ke značným tvarovým deformacím třísek.

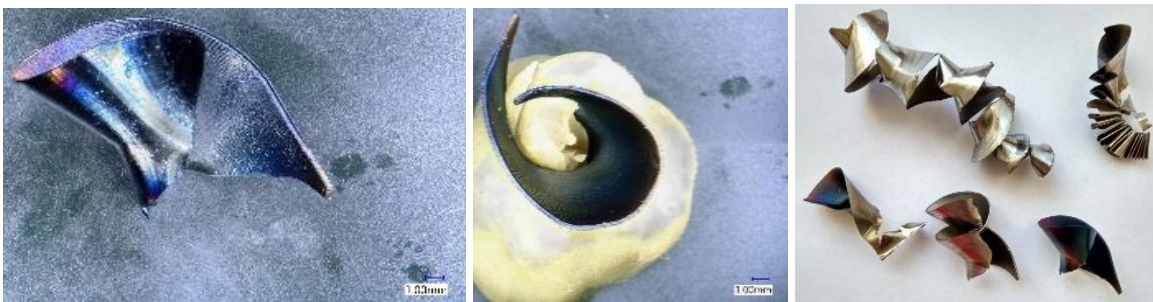


DIPLOMOVÁ PRÁCE **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**



Obr. 110.: Tříška vzniklá při $f = 0,3$ a $v_c = 40$ (díra 22).

Při posuvu $f = 0,3$ a řezné rychlosti $v_c = 40$ jsme zaznamenali, že vrtání je již značně hlučné, což je zpravidla projevem vibrací řezného procesu. Tříška hůře odchází z místa řezu. Vrtání za těchto podmínek je tak zatěžující hlavně z hlediska opotřebení nástroje a výsledné kvality povrchu.



Obr. 111.: Tříška vzniklá při $f = 0,3$ a $v_c = 50$ (díra 23).

Při řezných podmínkách $f = 0,3$ a $v_c = 50$ vznikají třísky různých tvarů, ale povětšinou se příliš nestáčí, naopak jsou v částečném rozvinu a netvoří tak jednotný charakteristický kornoutek. Tyto podmínky nejsou vhodné pro vznik optimální třísky.



Obr. 112.: Tříška vzniklá při $f = 0,3$ a $v_c = 60$ (díra 24).

Za posuvu $f = 0,3$ a řezné rychlosti $v_c = 60$ vidíme značně zdeformované třísky, které se utvářejí vysokou rychlostí a příliš se nestáčí, naopak jsou v ještě větším rozvinu než u předchozího případu, kdy $f = 0,3$ a $v_c = 50$.



14.1 Vrtání sady děr za sucha – Zhodnocení

V první části experimentu bylo použito chlazení pouze proudem vzduchu, nikoliv pomocí chladicí kapaliny, čímž byl chladicí účinek mnohonásobně nižší. Při změnách řezných podmínek pro jednotlivé díry se postupovalo dle výše uvedené mapy v tabulce č. 7. Pozornost byla zaměřena na způsob, jakým dochází k utváření třísky, jaký má daná tříska tvar a jak se tříska láme a odchází z místa řezu. Bylo zjištěno, že při podmínkách $f = 0,1$ a $v_c = 70$ je odchod třísky komplikovanější. Naopak při podmínkách $f = 0,2$ a $v_c = 30$ se tříska dělí bezprostředně po nájezdu nástroje do polotovaru a netvoří se charakteristická prvotní vinutá jako za jiných pozorovaných podmínek. Jako vhodné podmínky pro vznik ideální třísky, která má příhodný tvar a dobře odchází z místa řezu se jeví kombinace posuvu $f = 0,2$ mm/ot a řezné rychlosti $v_c = 40$ m/min. Dále bylo vyzorováno, že při podmínkách $f = 0,3$ a $v_c = 30$ mají špony již výrazně vyšší teplotu, než v případě nižších posuvů. Při $f = 0,3$ a $v_c = 40$ je již vrtání značně hlučné, což značí horší dělení třísky a horší odvod třísky z místa řezu. Hluk při procesu vrtání bývá často zapříčiněn také vibracemi. Ty vznikají právě z důvodu špatného a nepravidelného dělení a odchodu třísky. Při vrtání za sucha bylo na stroji zaznamenáno zatížení vřetene v % uvedené v následující tabulce č. 19. Dále byly vypočítány výkony na vřetenu, které uvádí tabulka č. 20. Počítalo se s nominálním výkonem vřetena $P = 22$ kW.



Zatížení na vřetenu - Za sucha - hodnota v %					
X	f (mm/ot)				
Vc (m/min)	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3
30	14	19	21	26	31
40	15	20	21	26	31
50	16	20	22	27	31
60	19	23	27	32	38
70	20	26	31	39	X

Tab. 19.: Zatížení na vřetenu při vrtání děr - Za sucha.

Výkon na vřetenu - Za sucha - hodnota v kW					
X	f (mm/ot)				
Vc (m/min)	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3
30	3,08	4,18	4,62	5,72	6,82
40	3,3	4,4	4,62	5,72	6,82
50	3,52	4,4	4,84	5,94	6,82
60	4,18	5,06	5,94	7,04	8,36
70	4,4	5,72	6,82	8,58	X

Tab. 20.: Výkon na vřetenu při vrtání děr - Za sucha.



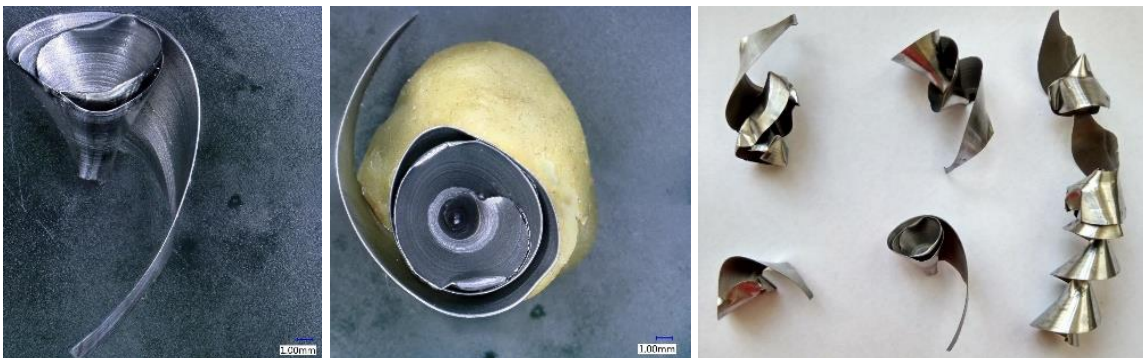
15 Experiment – Třísky utvářené při vrtání sady děr s použitím chladicí kapaliny

Poté co byla odvrtnána první sada 24 děr za sucha, následovalo vrtání dalších 24 děr, tentokrát s chlazením pomocí chladicí kapaliny. Jako chladicí kapalina byla použita ve stroji Okuma MU – 400 V II průzračná, vodou mísitelná, 8 % emulze Synergy 735, bez obsahu oleje. Dá se předpokládat, že při použití této chladicí kapaliny bude odchod třísek poněkud snadnější a nebude docházet k takovému zahřívání třísek, nástroje a obrobku jako za sucha. I případné poškození nástroje mělo být méně rizikové při vrtání takto mělkých děr za použití vrtáku o průměru 21 mm.



Obr. 113.: Tříška vzniklá při $f = 0,1$ a $v_c = 30$ (díra 25).

Třísky vzniklé při řezných podmínkách $f = 0,1$ a $v_c = 30$ jsou nevhodné z hlediska tvaru. Třísky jsou značně zdeformované, což může způsobit problémy s odchodem z místa řezu nebo například s výslednou kvalitou povrchu.

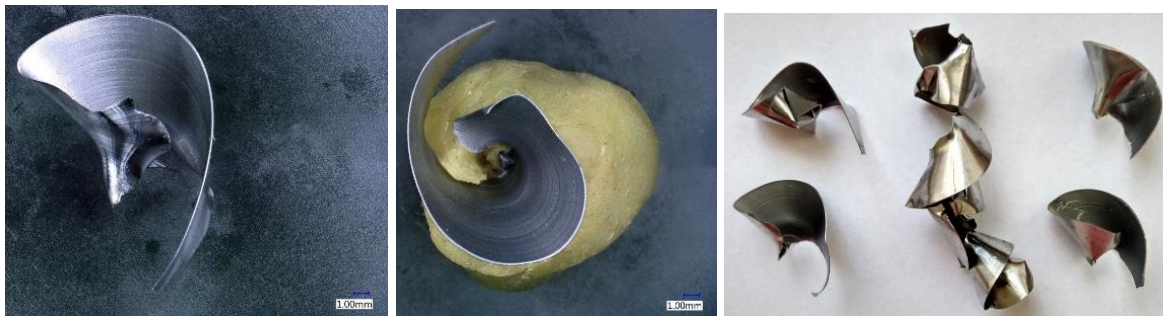


Obr. 114.: Tříška vzniklá při $f = 0,1$ a $v_c = 40$ (díra 26).

Aplikací řezných podmínek $f = 0,1$ a $v_c = 40$ se vytvářely velice různorodé třísky. Tato tvarová nejednotnost a zdeformovanost je nevhodná, třísky se nestáčí v kornoutky, spíše tvoří vinuté třísky, což může být problematické z hlediska kvality povrchu, odchodu třísky nebo například opotřebení nástroje.



DIPLOMOVÁ PRÁCE **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**



Obr. 115.: Tříška vzniklá při $f = 0,1$ a $v_c = 50$ (díra 27).

Použitím řezných podmínek $f = 0,1$ a $v_c = 50$ se tvořily třísky malé a zároveň málo stočené. Třísky jsou spíše v rozvinu a tvarově zdeformované.



Obr. 116.: Tříška vzniklá při $f = 0,1$ a $v_c = 60$ (díra 28).

Třísky vzniklé při $f = 0,1$ a $v_c = 60$ jsou tvarově zdeformované a jejich koncová část je dlouhá a ostrá, což způsobuje komplikace při odchodu třísky ze zóny řezu. Za těchto podmínek vznikaly rovněž nežádoucí vibrace, utváření třísky bylo nerovnoměrné.



Obr. 117.: Tříška vzniklá při $f = 0,1$ a $v_c = 70$ (díra 29).

Při řezných podmínkách $f = 0,1$ a $v_c = 70$ není špona optimální. Negativním jevem byl charakteristický zvuk, pískot při utváření třísky, který vzniká v důsledku vibrací. Vibrace vznikají nerovnoměrným utvářením, dělením a odchodem třísky z místa řezu. Řezná rychlost je vyšší, což není při nízkém posuvu vhodné.



DIPLOMOVÁ PRÁCE **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**



Obr. 118.: Tříška vzniklá při $f = 0,15$ a $v_c = 30$ (díra 30).

Třísky vzniklé při $f = 0,15$ a $v_c = 30$ jsou tvarově různorodé. Za těchto podmínek nedochází k výraznému prohřívání nástroje, třísky nejsou výrazně zbarvené. Vzniklé třísky mají dlouhou koncovou část, která způsobuje problémy s kvalitou povrchu nebo odchodem třísky z místa řezu.



Obr. 119.: Tříška vzniklá při $f = 0,15$ a $v_c = 40$ (díra 31).

Při aplikaci řezných podmínek $f = 0,15$ a $v_c = 40$ se třísky tvořily tvarově navzájem podobnější, než při $f = 0,15$ a $v_c = 30$. Tvarová podobnost ve tvaru kornoutku je vhodná z hlediska odchodu třísky z místa řezu, výsledné kvality povrchu, opotřebení nástroje nebo odvodu tepla ze zóny řezu.



Obr. 120.: Tříška vzniklá při $f = 0,15$ a $v_c = 50$ (díra 32).

Při $f = 0,15$ a $v_c = 50$ vznikají třísky nejrůznějších tvarů. Třísky mají relativně velký objem a vznikají komplikace při odvádění třísky z oblasti řezu.

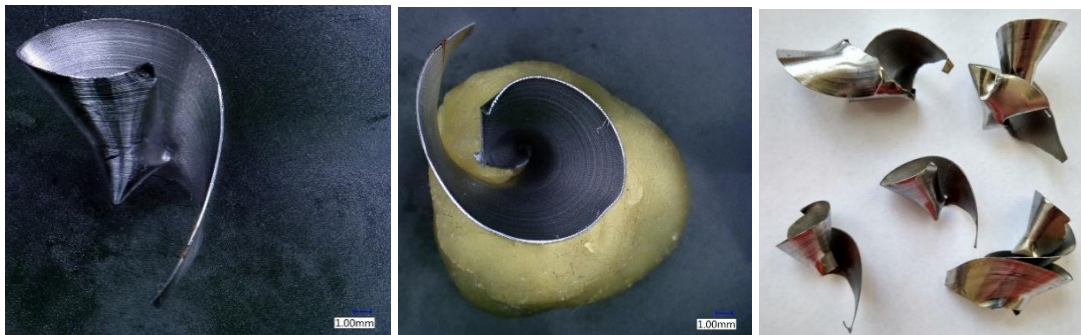


DIPLOMOVÁ PRÁCE **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**



Obr. 121.: Tříska vzniklá při $f = 0,15$ a $v_c = 60$ (díra 33).

Při řezných podmínkách $f = 0,15$ a $v_c = 60$ bylo zjištěno, že se tříska hůře dělí, je delší i v hloubce, čímž se komplikuje její odchod z místa řezu. Takto utvářené třísky jsou tvarově velmi různorodé, komplikované a nežádoucí.



Obr. 122.: Tříska vzniklá při $f = 0,15$ a $v_c = 70$ (díra 34).

Třísky vzniklé při $f = 0,15$ a $v_c = 70$ jsou tvarově nevhodné, vinuté a hůře odcházejí z místa řezu. Za těchto podmínek rovněž vznikaly nežádoucí vibrace.

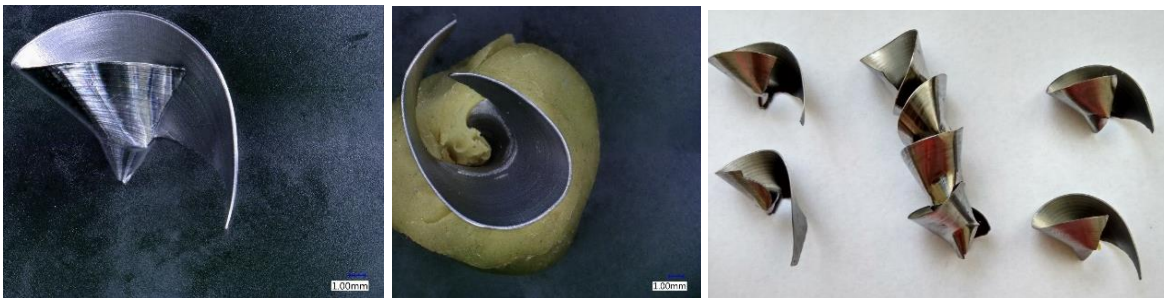


Obr. 123.: Tříska vzniklá při $f = 0,2$ a $v_c = 30$ (díra 35).

Při aplikaci řezných podmínek $f = 0,2$ a $v_c = 30$ nevznikalo velké množství tepla, třísky měly světlé zbarvení a příliš se nestáčely do charakteristického kornoutku. Nicméně při prvotním kontaktu nástroje s materiálem se tříska utvářela vinutá.

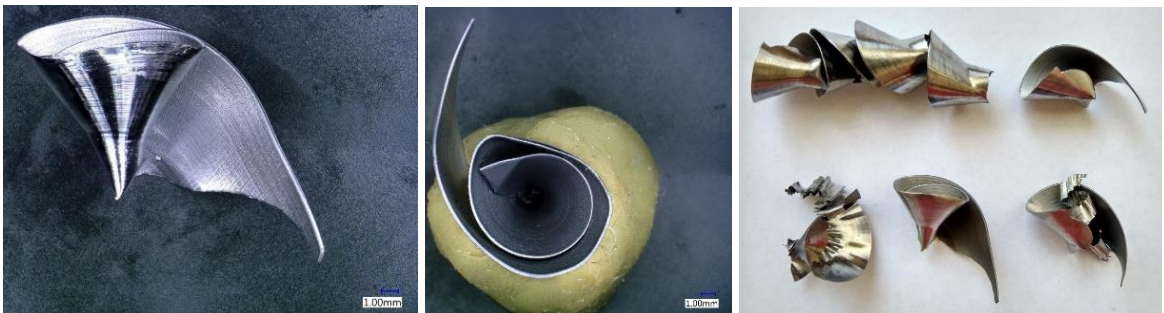


DIPLOMOVÁ PRÁCE **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**



Obr. 124.: Tříška vzniklá při $f = 0,2$ a $v_c = 40$ (díra 36).

Při posuvu $f = 0,2$ a řezné rychlosti $v_c = 40$ je odchod třísek ideální, jejich tvar je vhodný a žádoucí pro usnadnění procesu vrtání.



Obr. 125.: Tříška vzniklá při $f = 0,2$ a $v_c = 50$ (díra 37).

Za posuvu $f = 0,2$ a řezné rychlosti $v_c = 50$ je odchod utvářených třísek ideální podobně jako v předchozím případě, kdy $f = 0,2$ a $v_c = 40$. Nicméně třísky jsou za těchto podmínek do jisté míry různorodé.

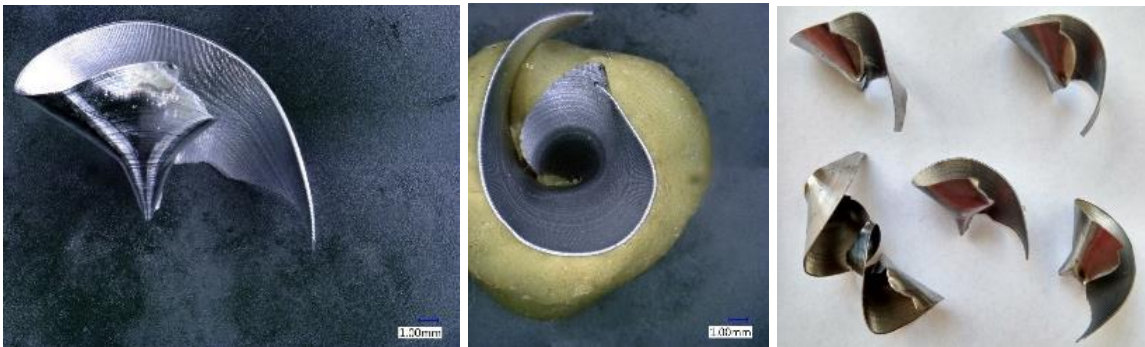


Obr. 126.: Tříška vzniklá při $f = 0,2$ a $v_c = 60$ (díra 38).

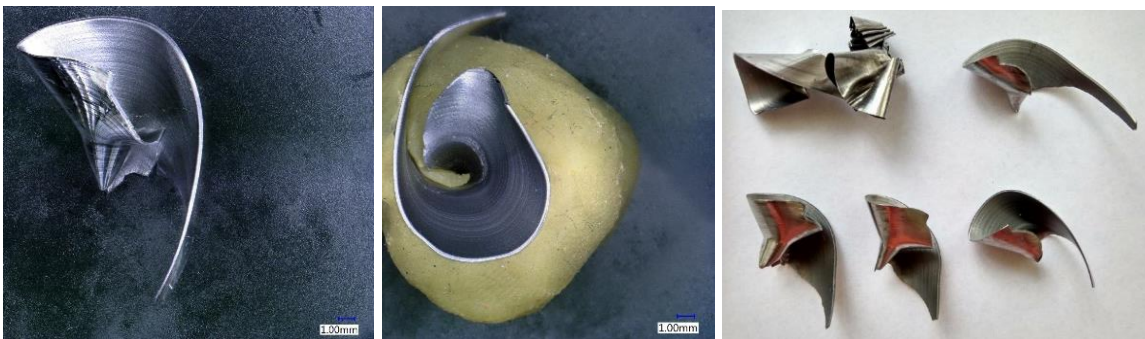
Při $f = 0,2$ a $v_c = 60$ se tvořily třísky tenké, malé a měly tudíž menší objem. Třísky se málo stáčely do kornoutku a za těchto řezných podmínek bylo obrábění značně hlučné, vznikaly nežádoucí vibrace.



DIPLOMOVÁ PRÁCE **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**

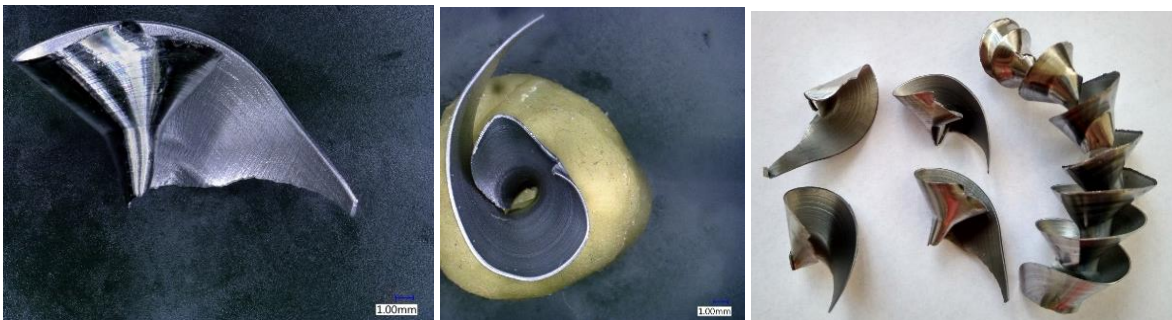


Obr. 127.: Tříska vzniklá při $f = 0,2$ a $v_c = 70$ (díra 39).

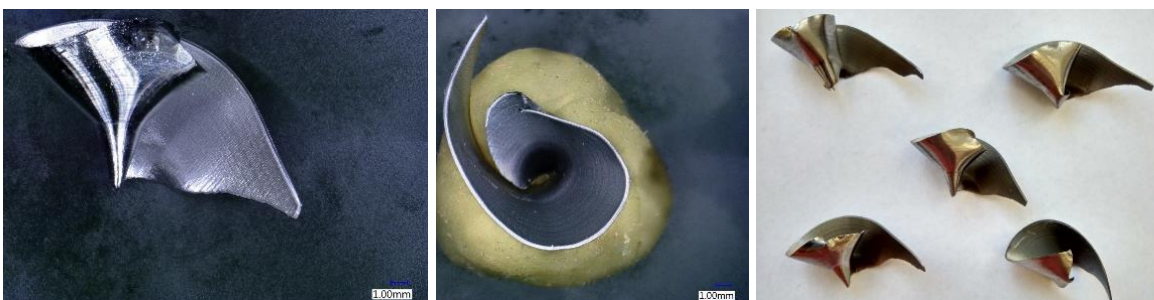


Obr. 128.: Tříska vzniklá při $f = 0,25$ a $v_c = 30$ (díra 40).

Při řezných podmínkách $f = 0,25$ a $v_c = 30$ vznikají třísky v částečném rozvinu s dlouhými koncovými částmi, které znesnadňují odchod třísek z místa řezu.



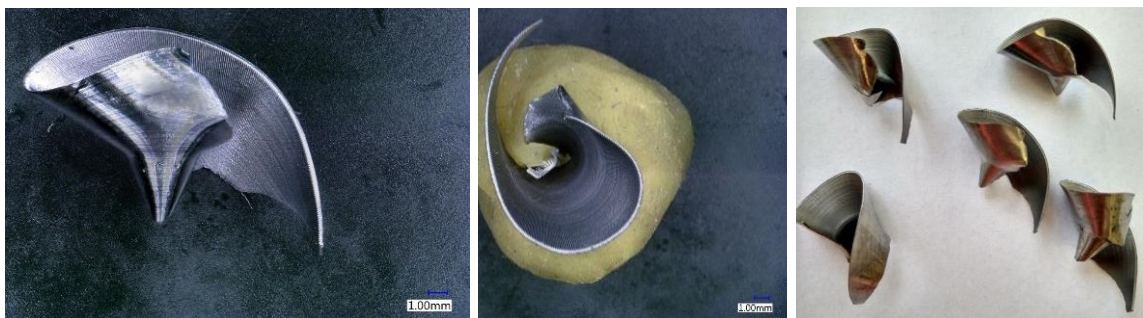
Obr. 129.: Tříska vzniklá při $f = 0,25$ a $v_c = 40$ (díra 41).



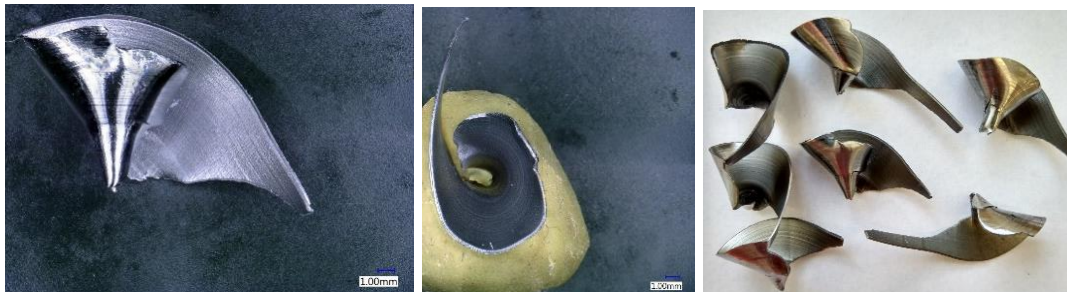
Obr. 130.: Tříska vzniklá při $f = 0,25$ a $v_c = 50$ (díra 42).



Obr. 131.: Tříška vzniklá při $f = 0,25$ a $v_c = 60$ (díra 43).

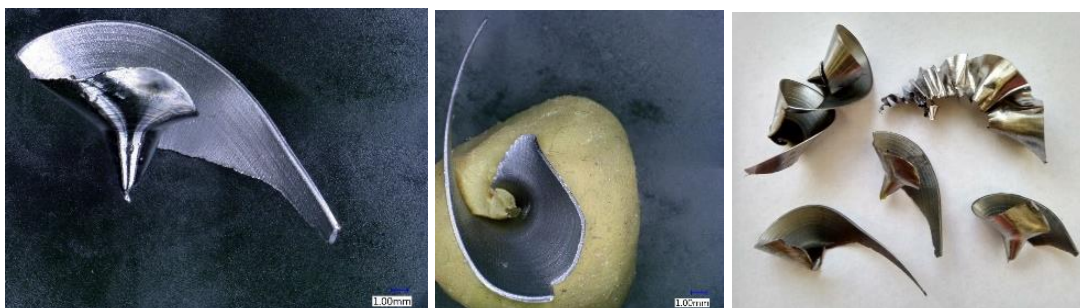


Obr. 132.: Tříška vzniklá při $f = 0,25$ a $v_c = 70$ (díra 44).

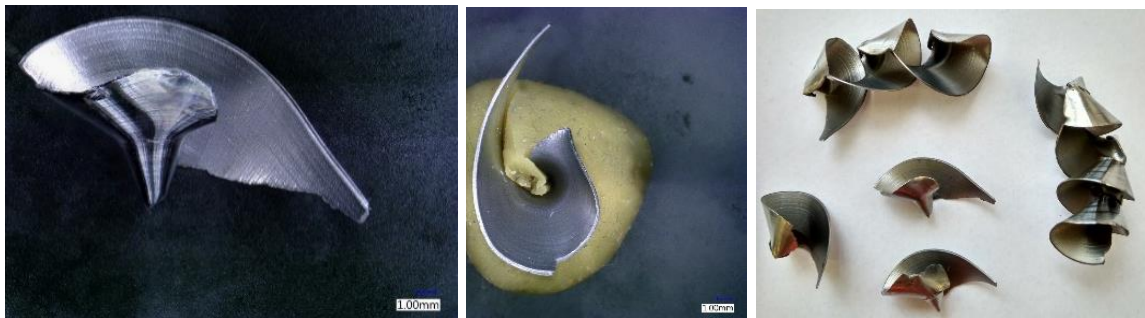


Obr. 133.: Tříška vzniklá při $f = 0,3$ a $v_c = 30$ (díra 45).

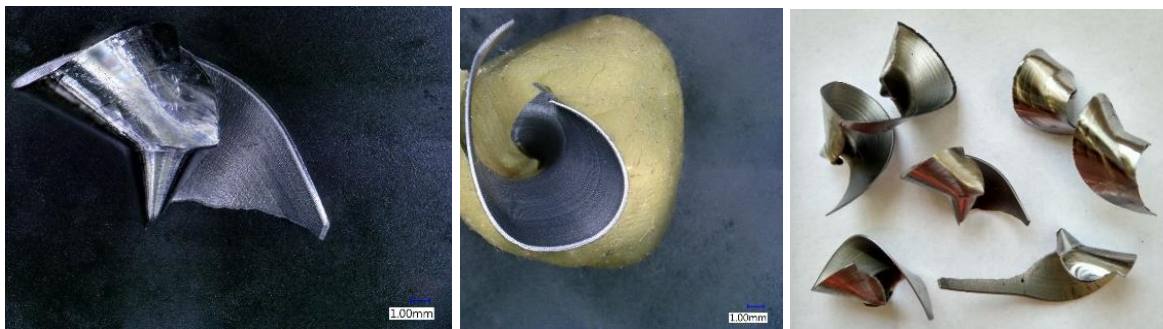
Při posuvu $f = 0,3$ a řezné rychlosti $v_c = 30$ jsou třísky dlouhé a málo se stáčí do kornoutku. Takovýto tvar třísek je nevhodný, neboť se snadno zasekávají ve šroubovici vrtáků a znesnadňuje odchod třísky.



Obr. 134.: Tříška vzniklá při $f = 0,3$ a $v_c = 40$ (díra 46).



Obr. 135.: Tříška vzniklá při $f = 0,3$ a $v_c = 50$ (díra 47).



Obr. 136.: Tříška vzniklá při $f = 0,3$ a $v_c = 60$ (díra 48).

Třísky utvářené při posuvu $f = 0,3$ a řezné rychlosti $v_c = 60$ jsou tvarově zdeformované a utvářejí se vysokou rychlostí. Třísky se příliš nestáčí, naopak jsou spíše v rozvinu. Jejich dlouhá koncová část znesnadňuje odchod třísek z místa řezu a může se zasekávat ve šroubovici. Tyto podmínky nejsou vhodné pro vznik optimální třísky.

15.1 Vrtání sady děr s použitím chladicí kapaliny – Zhodnocení

V druhé části prováděného experimentu se přikročilo k použití chlazení pomocí chladicí kapaliny, čímž byl chladicí účinek mnohem vyšší než za sucha. Při změnách řezných podmínek pro jednotlivé díry se postupovalo dle výše uvedené mapy v tabulce č. 8.

Za řezných podmínek $f = 0,15$ a $v_c = 60$ bylo zjištěno, že se tříška hůře dělí, je delší i v hloubce a tím se komplikuje její odchod z místa řezu. Takto utvářené třísky jsou tvarově velmi různorodé, komplikované a nežádoucí.

Při posuvu $f = 0,2$ a řezné rychlosti $v_c = 40$ je odchod špon ideální, jejich tvar je vhodný a žádoucí pro usnadnění procesu vrtání.

Za posuvu $f = 0,2$ a řezné rychlosti $v_c = 50$ je odchod utvářených třísek ideální podobně jako v případě, kdy $f = 0,2$ a $v_c = 40$. Třísky jsou však za těchto podmínek do jisté míry různorodé.



DIPLOMOVÁ PRÁCE Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

Při posuvu $f = 0,3 \text{ mm/ot}$ se obecně třísky utváří delší a méně zabalené (zatočené do kornoutku), takovýto tvar je žádoucí. Při vrtání s použitím chladicí kapaliny bylo na stroji zaznamenáno zatížení vřetene v % uvedené v následující tabulce č. 21. Dále byly vypočítány výkony na vřetenu, které uvádí tabulka č. 22. Počítalo se s nominálním výkonem vřetena $P = 22 \text{ kW}$.

Zatížení na vřeteni – S chladicí kapalinou - hodnota v %					
X	f (mm/ot)				
Vc (m/min)	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3
30	14	19	22	26	30
40	14	19	22	25	30
50	15	19	23	26	31
60	18	23	27	32	37
70	21	27	32	38	X

Tab. 21.: Zatížení na vřeteni při vrtání děr - S chladicí kapalinou.

Výkon na vřetenu – S chladicí kapalinou - hodnota v kW					
X	f (mm/ot)				
Vc (m/min)	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3
30	3,08	4,18	4,84	5,72	6,6
40	3,08	4,18	4,84	5,5	6,6
50	3,3	4,18	5,06	5,72	6,82
60	3,96	5,06	5,94	7,04	8,14
70	4,62	5,94	7,04	8,36	X

Tab. 22.: Výkon na vřetenu při vrtání děr - S chladicí kapalinou.



16 Oblast vhodného utváření třísky při vrtání

Cílem experimentální části této práce bylo nastínit oblast vhodného utváření třísky při vrtání. S ohledem na vzorky třísek odebraných z pracovního prostoru stroje po obrábění jednotlivých děr a proměření jejich tvaru, velikosti a dalších charakteristik na mikroskopu, digitálním posuvném měřítku, mikrometru a drsnoměru se dospělo k následujícím souhrnným grafům.



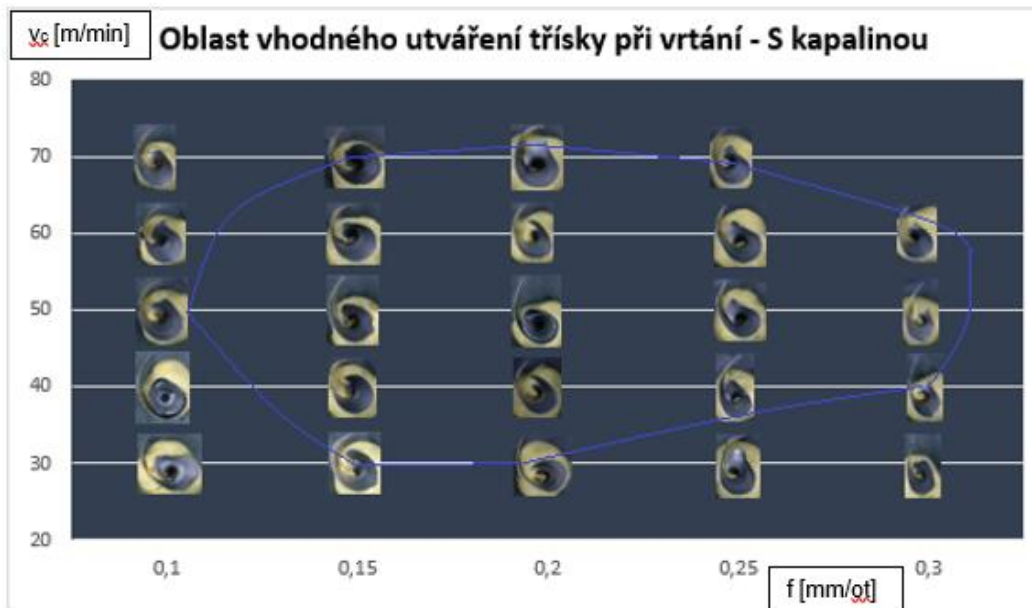
Obr. 137.: Oblast vhodného utváření třísky při vrtání – Za sucha.



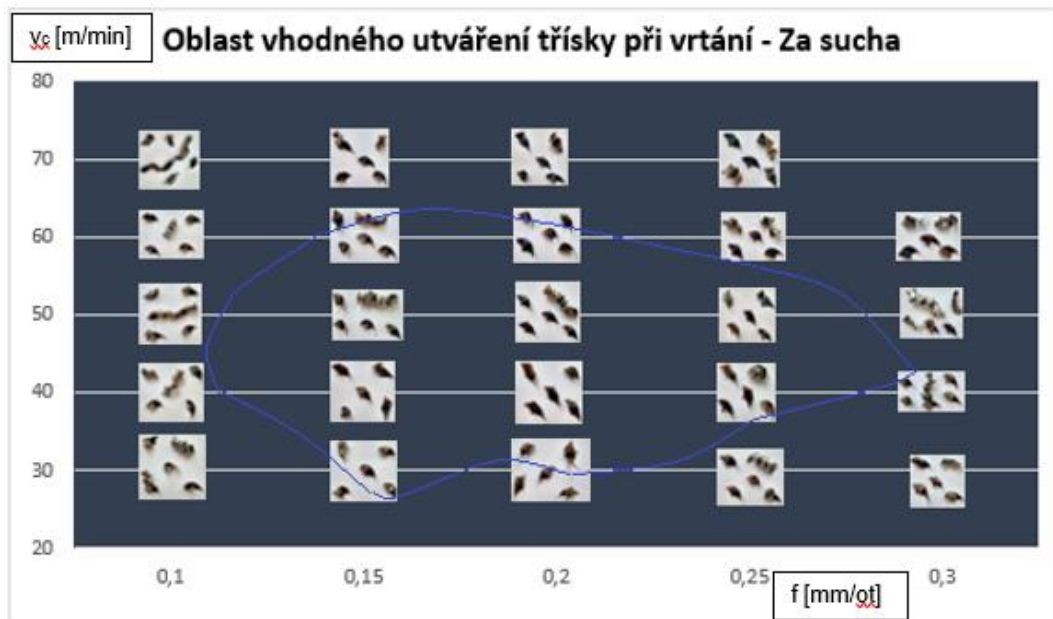
Obr. 138.: Oblast vhodného utváření třísky při vrtání – S kapalinou.



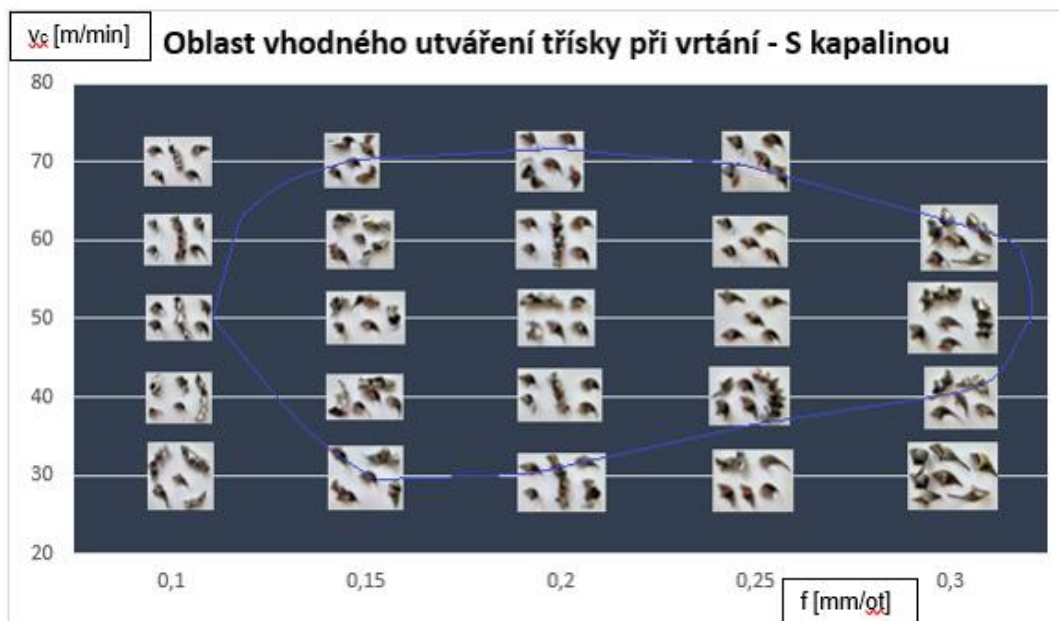
Obr. 139.: Oblast vhodného utváření třísky při vrtání – Za sucha – Pohled shora.



Obr. 140.: Oblast vhodného utváření třísky při vrtání – S kapalinou - Pohled shora.



Obr. 141.: Oblast vhodného utváření třísky při vrtání – Za sucha – Skupina třísek.



Obr. 142.: Oblast vhodného utváření třísky při vrtání – S kapalinou – Skupina třísek.



16.1 Oblast vhodného utváření třísky při vrtání - Zhodnocení

Za účelem názorného zobrazení vhodné oblasti utváření třísky při vrtání jsou na obrázcích č. 232 - 237 uvedeny jak jednotlivé třísky, tak i skupiny třísek. Jsou zde vidět i šroubovice utvářené typicky při prvotním nájezdu nástroje do polotovaru. Z výše uvedeného a ze souhrnných skupin třísek na obrázcích č. 235 – 236 vyplývá, že při nejvyšším posuvu a nejnižší řezné rychlosti ($f = 0,3$ a $v_c = 30$) se třísky lámou více a příliš se nestáčí. Při nejnižším posuvu $f = 0,1$ a nejvyšší řezné rychlosti $v_c = 70$ se třísky výrazně stáčí a málo se odlamují. Jako rizikové jsme na základě sledování řezného procesu vyhodnotili řezné podmínky $f = 0,3$ a $v_c = 70$, kde by mohla hrozit při dalším zvyšování řezné rychlosti i poškození nástroje.

Ohraničená oblast uvnitř se jeví jako vhodná oblast pro utváření třísky při vrtání. Dospěl jsem rovněž k závěrům, že jako ideální podmínky pro vznik a odchod třísky z místa řezu se jeví kombinace posuvu $f = 0,2$ a řezné rychlosti $v_c = 50$ m/min. Podobně vhodné jsou i podmínky, kdy $f = 0,2$ a $v_c = 40$ m/min. Třísky se za těchto podmínek dobře lámou, stáčí se do charakteristického kornoutku a nejsou problematické z hlediska odchodu třísek z místa řezu. Za těchto podmínek rovněž nevzniká velké teplo v místě řezu a nedochází k nadměrnému opotřebení nástroje.



17 Závěr

Tato práce se zabývá obráběním kovových materiálů bez použití řezné kapaliny, tedy obráběním za sucha. Jedním z hlavních přínosů suchého obrábění je snížení nákladů na pořízení procesních kapalin, jejich následnou filtraci, recyklaci a likvidaci. Suchým obráběním lze dosáhnout značných úspor poklesem výrobních i provozních nákladů. Zkracuje se tak vedlejší výrobní čas a snižuje riziko vzniku alergických reakcí pracovníků u obráběcích strojů. Obrábění za sucha se ale doporučuje pouze tam, kde lze zaručit stejnou jakost obrobku, trvanlivost nástroje a čas obrábění jako při použití procesních kapalin.

V další části této práce byl proveden experiment, jehož prostřednictvím došlo ke zjištění podmínek vhodných pro utváření třísek při technologii vrtání. Vytvořený graf vhodného utváření třísky při vrtání ukázal jako ideální podmínky pro tvorbu třísky kombinaci posuvu $f = 0,2$ mm/ot a řezné rychlosti $v_c = 40$ m/min.

Zkoumání použitých vrtákových výměnných korunek pod mikroskopem Keyence VHX – 6000 odhalilo tvorbu nárůstků u korunky použité při vrtání za sucha a abrazivní opotřebení u korunky použité při vrtání s chladicí kapalinou. Při experimentu byla použita chladicí kapalina 8 % emulze Synergy 735. Obrábělo se na stroji Okuma MU – 400V II za použití vrtáků a korunek Iscar Sumocham o průměru 21 mm. Celkem bylo odvrtáno 48 děr do oceli S 960 QL.

Dále se měřily tloušťky třísek pomocí digitálního třmenového mikrometru Mahr a průměry třísek digitálním posuvným měřítkem MarCal 16 EWR. Na základě měření tlouštěk lze konstatovat, že u všech posuvů je za sucha tato hodnota třísek vyšší přibližně o 0,05 mm. Z měření průměrů třísek vyplývá, že jsou tyto hodnoty téměř identické za sucha i s chladicí kapalinou.

Měření drsnosti děr se hodnotilo pomocí drsnoměru Marsurf PS 10. Porovnáním hodnot R_a , R_z i R_{max} za sucha a s chlazením vždy vycházelo, že hodnoty při ideálních podmínkách pro tvorbu třísky ($f = 0,2$ a $v_c = 40$) jsou za sucha dvojnásobně větší.

Náklady na aplikaci procesních kapalin mohou být někdy i vyšší než náklady na řezné nástroje. Proto se v současnosti objevují snahy minimalizovat náklady vydané na procesní kapaliny a více využívat technologii suchého obrábění, potažmo technologii MQL. Z mého experimentu vyplývá, že vrtání do vysoce pevného



DIPLOMOVÁ PRÁCE Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

ocelového materiálu bez řezné kapaliny je v určitém rozsahu možné. Další vývoj a experimenty by na mou práci mohly navázat v oblasti výzkumu trvanlivosti nástroje za zvolených řezných podmínek do takovýchto materiálů za sucha a při použití řezné kapaliny.



Seznam použité literatury

- [1] [online]. [cit. 2018-10-10]. Dostupné z:
http://projekty.fs.vsb.cz/019/dokumenty/Progresivni_metody_v_obrabeni_FINA_L.pdf
- [2] [online]. [cit. 2018-10-10]. Dostupné z:
https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=5490
- [3] [online]. [cit. 2018-05-10]. Dostupné z:
http://www.mmspektrum.com/clanek/suche-obrabeni-snizuje-vyrobní_naklady.html
- [4] [online]. [cit. 2018-15-10]. Dostupné z:
http://www.mmspektrum.com/clanek/obrabeni-za_sucha-ano-ci-ne.html
- [5] JANÁČ, A. a B. BÁTORA. Technología obrábania. STU Bratislava, 2004. ISBN 80-2031-3
- [6] [online]. [cit. 2018-12-10]. Dostupné z:
<http://americanmachinist.com/cutting-tools/10-commandments-dry-high-speed-machining>
- [7] HOFMANN, P. Obrábění za sucha ano či ne? MM Průmyslové spektrum 11/2001. Kompletní desetiletý archiv jednotlivých vydání MM Průmyslového spektra 1997-2006.
- [8] [online]. [cit. 2018-13-10]. Dostupné z:
<http://www.skf.com/files/347989.pdf>
- [9] [online]. [cit. 2018-20-10]. Dostupné z:
<https://core.ac.uk/download/pdf/30292477.pdf>
- [10] [online]. [cit. 2018-11-10]. Dostupné z:
<http://www.mmspektrum.com/clanek/uspora-casu-a-nakladu-s-technologie-mql.html>
- [11] BUMBÁLEK, B. Obrábění s chlazením nebo za sucha? Ekologie obrábění. Brno, 2000. 91 s. ISBN 80-7044-232-8.
- [12] ŠÍMA, M., ZINDULKA, O. Měření vlastností povlaků na nástrojích. MM Průmyslové spektrum 06/2004. Kompletní desetiletý archiv jednotlivých vydání MM Průmyslového spektra 1997-2006.



DIPLOMOVÁ PRÁCE Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

- [13] [online]. [cit. 2018-25-10]. Dostupné z:
<http://www.sciencedirect.com>
- [14] [online]. [cit. 2018-19-10]. Dostupné z:
http://www.shm-cz.cz/wp-content/uploads/2013/03/2004_09.pdf
- [15] [online]. [cit. 2018-26-10]. Dostupné z:
http://www.zerspanungstechnik.at/detail/drachenhaut-im-test_106704
- [16] [online]. [cit. 2018-26-10]. Dostupné z:
<http://www.mmspektrum.com/clanek/nastrojove-novinky.html>
- [17] KOČMAN, K., PROKOP, J. Technologie obrábění. Brno. Akademické nakladatelství CERM, 2005. ISBN 80-214-3068-0
- [18] LIEMERT, G. Teorie obrábění. SNTL Praha, 1970. ISBN 80-7099-429-0
- [19] [online]. [cit. 2018-15-10]. Dostupné z:
<http://www.sciencedirect.com/>
- [20] [online]. [cit. 2018-20-10]. Dostupné z:
<http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/?page=opory>
- [21] HUMÁR, Anton. Výrobní technologie II. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2002, 84 s.
- [22] KOČMAN, K. Technologické procesy - obrábění. CERM, únor 2011, s.328, ISBN 978-80-7204-722-2.
- [23] [online]. [cit. 2018-10-11]. Dostupné z:
<https://www.ionbond.com>
- [24] JANOVEC, Jiří, Petr ZUNA a Karel MACEK. Fyzikální metalurgie. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-01-02935-2.
- [25] SKOPEČEK, T., SVOBODA, J., ŘEHOŘ. J., HOFMAN, P. Experimentální studium tvorby třísky při HSC – tvrdém frézování. MM Průmyslové spektrum 12/2003. Kompletní desetiletý archiv jednotlivých vydání MM Průmyslového spektra 1997-2006.
- [26] MARŠÍČEK, R., ZIMA, L. Enviromentalizace řezného procesu a obrábění za sucha. MM Průmyslové spektrum 04/2004. Kompletní desetiletý archiv jednotlivých vydání MM Průmyslového spektra 1997-2006.



DIPLOMOVÁ PRÁCE Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

- [27] [online]. [cit. 2019-05-07]. Dostupné z:
<http://www.mmspektrum.com/clanek/duleziteaspektyvysokorychlostnihoobrabení>
- [28] [online]. [cit. 2019-05-07]. Dostupné z:
<http://www.sciencedirect.com/>
- [29] [online]. [cit. 2019-03-07]. Dostupné z:
<http://www.sciencedirect.com/>
- [30] [online]. [cit. 2019-05-07]. Dostupné z:
<http://www.mmspektrum.com/clanek/tvorba-trisky-privysokorychlostnim-obrabení>
- [31] [online]. [cit. 2019-04-07] Dostupné z:
<http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/?page=opory>
- [32] [online]. [cit. 2019-04-07]. Dostupné z:
<http://web.tuke.sk/fvtpo/casopis/pdf08/2-str-05-07.pdf>
- [33] Svoboda, J. Tvorba třísky při vysokorychlostním obrábění. MM Průmyslové spektrum, Praha, 2003, č.4, s.18-19. ISSN 1212-2572.
- [34] VESELÝ B. Komparace normativů v grafické komunikaci ČSN, EN a ISO, Kurz 4. Práce s technickým výkresem, Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, 2008
- [35] TICHÁ Š. Strojírenská metrologie část 1, Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Ostrava, 2004
- [36] [online]. [cit. 2019-06-07]. Dostupné z:
<http://www.misan.cz>
- [37] [online]. [cit. 2019-06-07]. Dostupné z:
<http://www.iscar.com>
- [38] [online]. [cit. 2019-06-07]. Dostupné z:
<https://www.totalmateria.com>



Seznam obrázků

Obr. 1.: Soustružení za sucha. [19].....	4
Obr. 2.: MQL – Mazání externě. [8].....	6
Obr. 3.: MQL – Mazání vnitřkem nástroje. [8].....	6
Obr. 4.: Náklady na procesní kapalinu a nástroje při výrobě. [19].....	7
Obr. 5.: Závislost oxidační odolnosti různých povlaků na teplotě. [20].....	13
Obr. 6.: Nástroje (VBD) s povlakem TiAlN. [23].....	15
Obr. 7.: VBD s povlakem Duratomic. [15].....	16
Obr. 8.: Vliv teploty na jednotlivé mechanismy opotřebení nástroje. [20]	17
Obr. 9.: Vliv řezných podmínek na opotřebení nástroje. [20]	17
Obr. 10.: Průběh opotřebení v čase. [17].....	18
Obr. 11.: Formy opotřebení nástroje ze slinutých karbidů. [17].....	19
Obr. 12.: Plastická deformace. [21].....	20
Obr. 13.: Opotřebení hřbetu. [17].....	20
Obr. 14.: Opotřebení hřbetu ve tvaru vrubu. [17].....	20
Obr. 15.: Opotřebení čela ve tvaru žlábků. [17].....	21
Obr. 16.: Hřebenovité trhliny na ostří. [17]	21
Obr. 17.: Vydrolování ostří. [17]	21
Obr. 18.: Lom břitu. [17].....	22
Obr. 19.: Křehký lom. [21].....	22
Obr. 20.: Únavový lom. [17].....	22
Obr. 21.: Schématické zobrazení druhů opotřebení. [21].....	23
Obr. 22.: Abrazivní opotřebení. [21]	24
Obr. 23.: Schéma mechanismu abrazivního opotřebení. [24].....	24
Obr. 24.: Adhezní opotřebení. [21].....	25
Obr. 25.: Schéma mechanismu adhezivního opotřebení. [24].....	25
Obr. 26.: Difuzní otěr. [17]	26
Obr. 27.: Schéma oxidačního opotřebení. [17]	26
Obr. 28.: Ortogonální (a) a obecné řezání (b). [30]	27
Obr. 29.: Oblasti plastických deformací v kořenu třísky. [31]	28
Obr. 30.: Vznik třísky při obrábění. [32].....	29
Obr. 31.: Tvorba třísek. [31].....	29



DIPLOMOVÁ PRÁCE Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

Obr. 32.: Oblast plastických deformací v odřezávané vrstvě. [30]	30
Obr. 33.: Průběh tlaku ve styčné ploše mezi třískou a nástrojem. [31]	31
Obr. 34.: Vnitřní a vnější tření v kontaktní zóně. [31].....	31
Obr. 35.: Zjednodušený model tvorby elementů třísky při ortogonálním řezání. [30] ..	32
Obr. 36.: Základní druhy tvářených třísek při obrábění kovů. [30]	34
Obr. 37.: Charakteristické tvary třísek. [33].....	35
Obr. 38.: Třísky souvislé, dělené a elementární. [32]	35
Obr. 39.: Model geometrických souvislostí při pěchování třísky – ortogonální řezání. [32]	36
Obr. 40.: Hodnoty objemového součinitele třísek W pro vybrané typy třísek. [30]	37
Obr. 41.: Okuma MU – 400V II. [36]	41
Obr. 42.: Stroj MU - 400V II s upnutým polotovarem.....	41
Obr. 43.: Okuma MU – 400V II – Pohled do pracovního prostoru stroje.	41
Obr. 44.: Vrták ISCAR Sumochaam DCN A – 3D model. [37].....	42
Obr. 45.: Výkres vrtáku ISCAR Sumocham DCN A. [37].....	42
Obr. 46.: Korunka ISCAR ICP 210 Sumocham – 3D model. [37].....	43
Obr. 47.: Výkres korunky ISCAR ICP 210 Sumocham. [37]	43
Obr. 48.: Upnutý polotovar S 960 QL s rozměry 40 x 214 x 162 v pracovním prostoru stroje.	44
Obr. 49.: Výkres polotovaru s rozměry a souřadnicemi děr.	45
Obr. 50.: Okuma MU – 400V II – Řídicí systém s dotykovou obrazovkou OSP–P300MA.	47
Obr. 51.: Upnutý polotovar před zahájením vrtání sady 24 děr za sucha	47
Obr. 52.: Výsledný obrobek po odvrtání sady 24 děr za sucha.	48
Obr. 53.: Výsledný obrobek po odvrtání všech 48 děr (za sucha i s chladicí kapalinou).	48
Obr. 54.: Vyhodnocování třísek pomocí mikroskopu Keyence VHX – 6000.	50
Obr. 55.: Korunka Iscar použitá při vrtání za sucha.....	51
Obr. 56.: Korunka Iscar použitá při suchém vrtání (karbid typu P, \varnothing 21 mm) – Pohled shora.	51
Obr. 57.: Korunka Iscar použitá při vrtání za sucha – Pohled na břit.	52
Obr. 58.: Korunka Iscar použitá při vrtání za sucha – Pohled na hřbet.....	52



DIPLOMOVÁ PRÁCE Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

Obr. 59.: Korunka Iscar použitá při vrtání za sucha – Nárůstek na vedlejším břitu.	52
Obr. 60.: Korunka Iscar použitá při vrtání za sucha – Nárůstek na břitu.....	53
Obr. 61.: Korunka Iscar použitá při vrtání za sucha – Nalezený nárůstek na břitu.	53
Obr. 62.: Korunka Iscar použitá při vrtání za sucha – Nalezený nárůstek na břitu – Detail.	53
Obr. 63.: Korunka Iscar použitá při vrtání s chladicí kapalinou.	54
Obr. 64.: Korunka Iscar použitá při vrtání s chladicí kapalinou – Pohled shora.....	54
Obr. 65.: Korunka Iscar použitá při vrtání s chladicí kapalinou – Pohled na břit.....	55
Obr. 66.: Korunka Iscar použitá při vrtání s chladicí kapalinou – Detail břitu.....	55
Obr. 67.: Korunka Iscar použitá při vrtání s chladicí kapalinou – Abrazivní opotřebením na hřbetu.....	55
Obr. 68.: Digitální posuvné měřítko a digitální třmenový mikrometr Mahr se stojanem.	56
Obr. 69.: Tloušťky třísek v závislosti na f pro různá v_c – Za sucha.....	57
Obr. 70.: Tloušťky třísek v závislosti na f pro různá v_c – S chladicí kapalinou.	58
Obr. 71.: Digitální posuvné měřítko MarCal 16 EWR.....	59
Obr. 72.: Průměry třísek v závislosti na f pro různá v_c – Za sucha.....	60
Obr. 73.: Průměry třísek v závislosti na f pro různá v_c – S chladicí kapalinou.	61
Obr. 74.: Profil obrobeného povrchu. [34].....	62
Obr.75.: Zobrazení výšky profilu drsnosti. [34]	63
Obr. 76.: Parametry pro stanovení R_c . [34]	64
Obr. 77.: Parametry pro stanovení R_c . [34]	64
Obr. 78.: Parametr stanovení R_m (R_{max}). [35].....	66
Obr. 79.: Drsnoměr MarSurf PS 10.....	67
Obr. 80.: MarSurf PS 10.....	67
Obr. 81.: Přenosný drsnoměr MarSurf PS 10 při měření odvrtných děr v obrobku...	67
Obr. 82.: Drsnosti děr R_a v závislosti na f pro různá v_c – Za sucha.	68
Obr. 83.: Drsnosti děr R_a v závislosti na f pro různá v_c – S chladicí kapalinou.....	69
Obr. 84.: Drsnosti děr R_z v závislosti na f pro různá v_c – Za sucha.	70
Obr. 85.: Drsnosti děr R_z v závislosti na f pro různá v_c – S chladicí kapalinou.....	71
Obr. 86.: Drsnosti děr R_{max} v závislosti na f pro různá v_c – Za sucha.	72
Obr. 87.: Drsnosti děr R_{max} v závislosti na f pro různá v_c – S chladicí kapalinou.....	73



DIPLOMOVÁ PRÁCE Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

Obr. 88.: Tříška vzniklá při $f = 0,1$ a $v_c = 30$ (díra 1).	75
Obr. 89.: Tříška vzniklá při $f = 0,1$ a $v_c = 40$ (díra 2).	75
Obr. 90.: Tříška vzniklá při $f = 0,1$ a $v_c = 50$ (díra 3).	76
Obr. 91.: Tříška vzniklá při $f = 0,1$ a $v_c = 60$ (díra 4).	76
Obr. 92.: Tříška vzniklá při $f = 0,1$ a $v_c = 70$ (díra 5).	77
Obr. 93.: Tříška vzniklá při $f = 0,15$ a $v_c = 30$ (díra 6).	77
Obr. 94.: Tříška vzniklá při $f = 0,15$ a $v_c = 40$ (díra 7).	77
Obr. 95.: Tříška vzniklá při $f = 0,15$ a $v_c = 50$ (díra 8).	78
Obr. 96.: Tříška vzniklá při $f = 0,15$ a $v_c = 60$ (díra 9).	78
Obr. 97.: Tříška vzniklá při $f = 0,15$ a $v_c = 70$ (díra 10).	78
Obr. 98.: Tříška vzniklá při $f = 0,2$ a $v_c = 30$ (díra 11).	79
Obr. 99.: Tříška vzniklá při $f = 0,2$ a $v_c = 40$ (díra 12).	79
Obr. 100.: Tříška vzniklá při $f = 0,2$ a $v_c = 50$ (díra 13).	79
Obr. 101.: Tříška vzniklá při $f = 0,2$ a $v_c = 60$ (díra 14).	80
Obr. 102.: Tříška vzniklá při $f = 0,2$ a $v_c = 70$ (díra 15).	80
Obr. 103.: Tříšky vzniklé při $f = 0,2$ a $v_c = 70$ (díra 15).	80
Obr. 104.: Tříška vzniklá při $f = 0,25$ a $v_c = 30$ (díra 16).	80
Obr. 105.: Tříška vzniklá při $f = 0,25$ a $v_c = 40$ (díra 17).	81
Obr. 106.: Tříška vzniklá při $f = 0,25$ a $v_c = 50$ (díra 18).	81
Obr. 107.: Tříška vzniklá při $f = 0,25$ a $v_c = 60$ (díra 19).	81
Obr. 108.: Tříška vzniklá při $f = 0,25$ a $v_c = 70$ (díra 20).	82
Obr. 109.: Tříška vzniklá při $f = 0,3$ a $v_c = 30$ (díra 21).	82
Obr. 110.: Tříška vzniklá při $f = 0,3$ a $v_c = 40$ (díra 22).	83
Obr. 111.: Tříška vzniklá při $f = 0,3$ a $v_c = 50$ (díra 23).	83
Obr. 112.: Tříška vzniklá při $f = 0,3$ a $v_c = 60$ (díra 24).	83
Obr. 113.: Tříška vzniklá při $f = 0,1$ a $v_c = 30$ (díra 25).	86
Obr. 114.: Tříška vzniklá při $f = 0,1$ a $v_c = 40$ (díra 26).	86
Obr. 115.: Tříška vzniklá při $f = 0,1$ a $v_c = 50$ (díra 27).	87
Obr. 116.: Tříška vzniklá při $f = 0,1$ a $v_c = 60$ (díra 28).	87
Obr. 117.: Tříška vzniklá při $f = 0,1$ a $v_c = 70$ (díra 29).	87
Obr. 118.: Tříška vzniklá při $f = 0,15$ a $v_c = 30$ (díra 30).	88
Obr. 119.: Tříška vzniklá při $f = 0,15$ a $v_c = 40$ (díra 31).	88



DIPLOMOVÁ PRÁCE Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

Obr. 120.: Tříška vzniklá při $f = 0,15$ a $v_c = 50$ (díra 32).	88
Obr. 121.: Tříška vzniklá při $f = 0,15$ a $v_c = 60$ (díra 33).	89
Obr. 122.: Tříška vzniklá při $f = 0,15$ a $v_c = 70$ (díra 34).	89
Obr. 123.: Tříška vzniklá při $f = 0,2$ a $v_c = 30$ (díra 35).	89
Obr. 124.: Tříška vzniklá při $f = 0,2$ a $v_c = 40$ (díra 36).	90
Obr. 125.: Tříška vzniklá při $f = 0,2$ a $v_c = 50$ (díra 37).	90
Obr. 126.: Tříška vzniklá při $f = 0,2$ a $v_c = 60$ (díra 38).	90
Obr. 127.: Tříška vzniklá při $f = 0,2$ a $v_c = 70$ (díra 39).	91
Obr. 128.: Tříška vzniklá při $f = 0,25$ a $v_c = 30$ (díra 40).	91
Obr. 129.: Tříška vzniklá při $f = 0,25$ a $v_c = 40$ (díra 41).	91
Obr. 130.: Tříška vzniklá při $f = 0,25$ a $v_c = 50$ (díra 42).	91
Obr. 131.: Tříška vzniklá při $f = 0,25$ a $v_c = 60$ (díra 43).	92
Obr. 132.: Tříška vzniklá při $f = 0,25$ a $v_c = 70$ (díra 44).	92
Obr. 133.: Tříška vzniklá při $f = 0,3$ a $v_c = 30$ (díra 45).	92
Obr. 134.: Tříška vzniklá při $f = 0,3$ a $v_c = 40$ (díra 46).	92
Obr. 135.: Tříška vzniklá při $f = 0,3$ a $v_c = 50$ (díra 47).	93
Obr. 136.: Tříška vzniklá při $f = 0,3$ a $v_c = 60$ (díra 48).	93
Obr. 137.: Oblast vhodného utváření třísky při vrtání – Za sucha.....	95
Obr. 138.: Oblast vhodného utváření třísky při vrtání – S kapalinou.....	95
Obr. 139.: Oblast vhodného utváření třísky při vrtání – Za sucha – Pohled shora.	96
Obr. 140.: Oblast vhodného utváření třísky při vrtání – S kapalinou - Pohled shora...	96
Obr. 141.: Oblast vhodného utváření třísky při vrtání – Za sucha – Skupina třísek.	97
Obr. 142.: Oblast vhodného utváření třísky při vrtání – S kapalinou – Skupina třísek.	97



Seznam tabulek

Tab. 1.: Tvrdost různých typů povlaků. [20].....	12
Tab. 2.: Koeficienty tření různých typů povlaků. [20].....	13
Tab. 3.: Srovnání různých vlastností povlaků. [20].....	14
Tab. 4.: Okuma MU 400V – Technická data. [36].....	40
Tab. 5.: Ocel S 960 QL – Mechanické vlastnosti. [38].....	44
Tab. 6.: Vrtání za sucha – Výchozí mapa děr.....	46
Tab. 7.: Vrtání s chladicí kapalinou – Výchozí mapa děr.	46
Tab. 8.: Naměřené hodnoty tloušťek – Za sucha.	57
Tab. 9.: Naměřené hodnoty tloušťek třísek – S chladicí kapalinou.....	58
Tab. 10.: Naměřené hodnoty průměrů třísek – Za sucha.....	60
Tab. 11.: Naměřené hodnoty průměrů třísek – S chladicí kapalinou.....	61
Tab. 12.: Doporučené hodnoty střední aritmetické úchyly Ra.....	65
Tab. 13.: Naměřené hodnoty Ra – Za sucha.	68
Tab. 14.: Naměřené hodnoty Ra – S chladicí kapalinou.....	69
Tab. 15.: Naměřené hodnoty Rz – Za sucha.....	70
Tab. 16.: Naměřené hodnoty Rz – S chladicí kapalinou.	71
Tab. 17.: Naměřené hodnoty Rmax – Za sucha.	72
Tab. 18.: Naměřené hodnoty Rmax – S chladicí kapalinou.....	73
Tab. 19.: Zatížení na vřetenu při vrtání děr - Za sucha.....	84
Tab. 20.: Výkon na vřetenu při vrtání děr - Za sucha.....	84
Tab. 21.: Zatížení na vřeteni při vrtání děr - S chladicí kapalinou.....	93
Tab. 22.: Výkon na vřetenu při vrtání děr - S chladicí kapalinou.....	93