

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra materiálu a strojírenské technologie



Bakalářská práce

Parametry obrábění ovlivňující drsnost povrchu

Jaroslav Žalud

© 2024 ČZU v Praze

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jaroslav Žalud

Inženýrství údržby

Název práce

Parametry obrábění ovlivňující drsnost povrchu

Název anglicky

Processing parameters affecting surface roughness

Cíle práce

Cílem bakalářské práce je shromáždit a analyzovat aktuální poznatky o parametrech ovlivňujících drsnost povrchu při obrábění. Na základě závěrů z literárního rozboru předmětné problematiky stanoví bakalář přínos práce.

Metodika

Současný stav řešeného problému (literární rešerše).

Cíle práce a metody jejího vypracování.

Přínos a závěry práce.

Doporučený rozsah práce

cca 30 stran

Klíčová slova

Obrábění, drsnost, posuv, parametry, obráběcí stroje

Doporučené zdroje informací

ALLEN, T.: Particle Size Measurement. Vol. 2, Surface area and pore size determination. London, 1997.
Časopisy: Manufacturing technology, MM průmyslové spektrum, Strojárstvo – Strojírénství, Strojírénská technologie, Technický týdeník, Technik.
Modern metal cutting: A practical handbook. Sandviken: Sandvik Coromant, 1994.
RYBÍN, P., RAFAJ, J.: Obsluha a programování CNC strojů. Praha, ČVUT, 1995.
SCHUNK, P.: Kraftspannfutter für CNC-Drehmaschinen : ROTA NCO. Lauffen/Neckar, Schunk, 2003.
SMID, P.: CNC programming techniques : an insider s guide to effective methods and applications. New York, Industrial Press, 2006.
ŠTULPA, M.: CNC : obráběcí stroje a jejich programování, Praha: BEN, 2006.

Předběžný termín obhajoby

2023/2024 LS – TF

Vedoucí práce

Bc. Ing. Petr Hrabě, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra materiálu a strojírénské technologie

Elektronicky schváleno dne 17. 1. 2023

prof. Ing. Miroslav Müller, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 8. 3. 2023

doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 16. 11. 2023

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci "Parametry obrábění ovlivňující drsnost povrchu" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 25.03.2024

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval panu Bc. Ing. Petru Hraběti, Ph.D. za provedené konzultace na téma bakalářské práce nebo jiná témata úzce spjatá s řešenou problematikou a také za samotné odborné vedení bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval Ondřeji Heřmanovi z firmy CSEN s.r.o. za poskytnutou exkurzi, názorné ukázky řešené problematiky a možnost provedení první části experimentu zaměřeného na zkoumání parametrů obrábění ovlivňující drsnost povrchu.

Parametry obrábění ovlivňující drsnost povrchu

Abstrakt

Cílem mé bakalářské práce je shromáždit, popsat a následně experimentálně změřit údaje o parametrech, které ovlivňují drsnost povrchu při obrábění. V úvodu práce definuji obrábění, popisuji základní terminologii obrábění a zkoumám parametry rezného nástroje. V dalších kapitolách popisuji tvorbu třísky při obrábění a její druhy, deformační oblasti, tvorbu nárůstku a definuji proces řezání. Dále na to navazuji definicí, co to samotná drsnost povrchu a integrita povrchu je a popisuji její značení. Závěr teoretické části mé bakalářské práce je věnován samotným parametrům obrábění ovlivňující drsnost povrchu a jejich definici. Ve firmě CSEN s.r.o. jsem prokonzultoval řešenou problematiku a zjištěné poznatky jsem aplikoval do praktického experimentu. Veškeré výsledné hodnoty měření jsou zanesené v grafech a tabulkách. Závěrem mé bakalářské práce byla dvě zjištění. Určení hlavních parametrů ovlivňujících drsnost povrchu vyplývajících z teoretické části práce a závislost hloubky řezu, posuvu za otáčku a rezné rychlosti při ovlivňování drsnosti povrchu obrobku.

Klíčová slova: Obrábění; parametry; drsnost povrchu; rychlost posuvu; hloubka řezu; soustružení; rezná rychlost; tříska

Processing parameters affecting surface roughness

Abstract

The target of my bachelor's thesis is to collect, describe and then experimentally measure data of parameters that affect surface roughness during machining. At the beginning of the thesis, I defined machining, described the basic terminology of machining and examined the parameters of the cutting tool. In other chapters, I described the formation of chips during machining and its types, deformation areas, the formation of growth and defined the cutting process. Then I followed it up with a definition of what surface roughness and surface integrity are and described its symbols. I devoted the conclusion of the theoretical part of my bachelor's thesis to the machining parameters affecting surface roughness and their definition. In the company CSEN s.r.o. I consulted the solved issue and applied the findings in a practical experiment. All the resulting measurement values are recorded in graphs and tables. The conclusion of my bachelor thesis was based on two findings. Determination of the main parameters affecting the surface roughness resulting from the theoretical part of the work and the dependence of the depth of cut, feed per revolution and cutting speed influencing the surface roughness of the workpiece.

Keywords: Machining; parameters; surface roughness; feed rate; depth of cut; turning; cutting speed; chip

Obsah

1 Úvod.....	1
1.1 Cíl práce a metodika.....	2
2 Proces obrábění.....	3
2.1 Základní terminologie procesu obrábění.....	3
2.1.1 Plochy obrobku.....	4
2.1.2 Geometrie řezného nástroje.....	5
2.2 Řezný nástroj a jeho opotřebení.....	5
2.2.1 Proces řezání.....	6
2.2.2 Síly vznikající při řezání.....	7
2.2.3 Tvorba třísky.....	8
2.2.3.1 Druhy třísek.....	9
2.2.4 Plastické deformace v oblasti řezu.....	10
2.2.5 Tvorba nárůstku.....	12
2.2.5.1 Vliv řezných podmínek na tvorbu nárůstku.....	13
2.2.6 Materiály řezných nástrojů.....	14
3 Charakteristika řešeného problému.....	16
3.1 Integrita povrchu.....	16
3.2 Metody měření drsnosti povrchu.....	16
3.2.1 Elektronické přístroje.....	17
3.2.2 Optické typy měření drsnosti povrchu.....	17
3.3 Parametry drsnosti povrchu.....	18
3.3.1 Výškové parametry amplitudy.....	19
3.3.2 Parametry rozteče amplitudy.....	20
3.3.3 Hybridní parametry amplitudy.....	20
3.4 Značení drsnosti povrchu.....	20
3.5 Závislost obráběcího procesu na drsnosti povrchu.....	21
4 Parametry obrábění ovlivňující drsnost povrchu.....	22
4.1 Řezné podmínky.....	23
4.1.1 Rychlost posuvu.....	23
4.1.2 Hloubka řezu.....	23
4.1.3 Řezná rychlost.....	24
4.2 Úhel nastavení hlavního ostří.....	24
4.3 Úhel nastavení vedlejšího ostří.....	25
4.4 Geometrie břitu.....	25
4.5 Poloměr špičky.....	25
5 Experimentální měření drsnosti povrchu.....	26

5.1	Představení firmy CSEN s.r.o.	26
5.2	Použitá výměnná břitová destička.....	26
5.2.1	Materiál polotovaru.....	27
5.2.2	Povlak výměnné břitové destičky	28
5.3	Použitý stroj	28
5.4	Použité zařízení k měření drsnosti povrchu	28
5.5	Postup měření.....	29
5.6	Výsledky měření	30
5.7	Zhodnocení výsledků měření	32
6	Závěr.....	35
7	Seznam použitých zdrojů	37
7.1	Přílohy	40

Seznam obrázků

Obr. 1 Úhly hřbetu a čela nástroje [přeloženo autorem] [7]	8
Obr. 2 Části a plochy rezného nástroje [přeloženo autorem] [7]	6
Obr. 3 Ortogonální řezání [přeloženo autorem] [7]	7
Obr. 4 Šikmé řezání [přeloženo autorem] [7]	7
Obr. 5 Vznik třísky u ortogonálního řezání [přeloženo autorem] [8]	7
Obr. 6 Vektorový obrazec sil působících v šikmém řezání [8]	8
Obr. 7 Trhaná (diskontinuální) tříska [8]	9
Obr. 8 Plynulá tříska [8]	10
Obr. 9 Elementární tříska [8]	10
Obr. 10 Článková tříska [7]	10
Obr. 11 Oblasti deformací [8]	11
Obr. 12 Zjednodušené modely formovacích zón třísky [8]	11
Obr. 13 Tvorba nárůstku s nestabilní částí ovlivňující drsnost povrchu [7]	12
Obr. 14 Vliv mechanických vlastností nástrojového materiálu na rezné podmínky [11]	14
Obr. 15 Rozdílný rozptyl vlnovek způsobený rozdílnou výškou [15]	18
Obr. 16 Směr posuzování drsnosti povrchu [autor]	18
Obr. 17 Grafické značení textury povrchu profilu podle normy ČSN EN ISO 21920-1	20
Obr. 18 Příklad značení drsnosti povrchu [autor]	21
Obr. 19 Průměrné rozsahy drsnosti povrchu při běžných obráběcích procesech [přeloženo autorem] [15]	21
Obr. 20 Úhel nastavení hlavního ostří [3]	24
Obr. 21 Geometrická data CNMG 12 04 08-PM 4225[23]	26
Obr. 22 Mitutoyo surftest-301	28
Obr. 23 CNC soustruh TL-1 od společnosti Haas	28

Seznam tabulek

Tab. 1 Výškové parametry amplitudy drsnosti povrchu [15]	19
Tab. 2 Geometrická data CNMG 12 04 08-PM 4225[23]	27
Tab. 3 Průměrné hodnoty výsledků měření č.1	30
Tab. 4 Průměrné hodnoty výsledků měření č.2	30
Tab. 5 Průměrné hodnoty výsledků měření č. 3	30
Tab. 6 Průměrné hodnoty výsledků měření č. 4	34

Seznam grafů

Graf 1 Závislost R-parametrů na řezné rychlosti (měření č.1)	31
Graf 2 Závislost R-parametrů na posuvu za otáčku (měření č.2)	31
Graf 3 Závislost R-parametrů na hloubce řezu (měření č.3)	32
Graf 4 Zhodnocení výsledků měření	34

Seznam použitých zkratek

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
CNC	[-]	Počítačově numericky řízený stroj
Obr	[-]	Obrázek
VBD	[-]	Výměnná břitová destička
F	[N]	Síly působící na břit nástroje
PKNB	[-]	Polykrystalický nitrid boru
PD	[-]	Polykrystalický diamant
SK	[-]	Slynuté karbidy
RO	[-]	Rychlořezné oceli
HV	[-]	Tvrдость podle Vickerse
HRA	[-]	Tvrдость podle Rockwella (při síle 588N)
HRC	[-]	Tvrдость podle Rockwella (při síle 1471N)
KNB	[-]	Kubický nitrid boru
BSDF	[-]	Obousměrná distribuční funkce rozptylu
TIS	[-]	Celkový integrovaný rozptyl
3D	[-]	Trojrozměrný
v	[m/min]	Rychlost otáčení vřetene
π	[-]	Ludolfovo číslo
D	[mm]	Průměr obrobku
n	[ot/min]	Otáčky vřetene za minutu
MF	[-]	Geometrie VBD pro vyšší posuvy
QM	[-]	Geometrie VBD pro lehké hrubování
MR	[-]	Geometrie VBD se stabilním břitem
PM	[-]	Geometrie VBD pro střední obrábění oceli
PF	[-]	Geometrie VBD k obrábění oceli načisto
PR	[-]	Geometrie pro ekonomické hrubování
CVD	[-]	Obloukové odpařování
HB	[-]	Tvrдость podle Brinella
γ_n	[°]	Úhel čela nástroje
α_n	[°]	Úhel hřbetu nástroje
λ_s	[°]	Úhel odklonu ostří
δ_o	[°]	Úhel řezu
v_f	[m/min]	Rychlost posuvu
f_n	[mm/ot]	Posuv za otáčku
a_p	[mm]	Hloubka řezu/Tloušťka třísky
v_c	[m/min]	Řezná rychlost
κ	[°]	Úhel nastavení hlavního ostří
κ_n	[°]	Úhel nastavení vedlejšího ostří

1 Úvod

Cílem mé bakalářské práce je shromáždit, analyzovat a následně popsat parametry, které ovlivňují drsnost povrchu při obrábění. V následujícím úvodu bude popsána historie vzniku obrábění. Na to navážeme definicí obrábění, základním rozdělení terminologie obrábění a tvorbu třísky při obrábění. Dále si rozdělíme jednotlivé typy parametrů obrábění, které ovlivňují drsnost povrchu, a také budeme definovat co to samotná drsnost povrchu je. Celková problematika obrábění je velice rozsáhlá, proto se v úvodu zaměříme na aspekty, které stručně shrnou problematiku obrábění, jeho vlastnosti a historii.

Parametry ovlivňujících drsnost povrchu můžeme dělit, jak si povíme později, do několika kategorií. V druhé části bakalářské práce nás budou zajímat zejména řezné podmínky, a to řezná rychlost, rychlost posuvu a hloubka řezu. Tyto parametry budeme zkoumat v experimentálním měření a analyzovat je. Závěrem bakalářské práce bude zjištění závislosti těchto parametrů a zhodnocení naměřených výsledků.

Když se podíváme do minulosti můžeme zjistit, že obrábění sahá daleko do naší historie. Mnoho lidí si myslí, že obrábění je záležitostí minulých dvou století. Tomu tak ovšem není, počátky obrábění sahají až do doby kamenné. Třískové obrábění tak jak ho dnes známe, zejména to konvenční, má počátky na přelomu 18. a 19. století v průběhu průmyslové revoluce, kdy docházelo k převratnému rozvoji v oblasti průmyslu a zejména v oboru strojírenství. Pokud budeme hovořit o CNC strojích a jejich vývoji a automatizaci, musíme se zaměřit na první desetiletí 20. století, kdy docházelo k jejich rozvoji a tím i příchodu automatizovaného způsobu třískového obrábění.[1][2]

V dnešní době jsou obráběcí centra, soustružnické nože a další technologie používané k obrábění materiálu velice pokročilé, modernizované a je u nich kladený velký důraz na přesnost a kvalitu vyrobených dílů. Různými metodami, výzkumy a experimenty se snažíme dosáhnout nových výsledků a posunout tak hranici našich znalostí v procesu obrábění. V této bakalářské práci jsem shromáždil data o parametrech ovlivňující drsnost povrchu, analyzoval je pro zjištění optimálních podmínek pro obrábění a pomocí experimentu jsem si ověřil, která kombinace parametrů obrábění je ideální z hlediska závislosti na jakosti povrchu, použitých parametrech obrábění a použitým řezným nástroji.[1][2]

1.1 Cíl práce a metodika

Bakalářská práce bude rozdělena na dvě části, a to na teoretickou, ve které se zaměříme na uvedení do řešené problematiky procesu obrábění a na praktickou část, ve které aplikujeme zjištěné poznatky z teoretické části na experimentální měření závislosti řezných podmínek vůči drsnosti povrchu u obrobku. V teoretické části neboli literární rešerši začneme úvodem do terminologie obrábění a postupně budeme rozebírat rozsáhlá témata jako jsou plastické deformace vznikající při ortogonálním řezání, deformační oblasti v řezném procesu nebo tvorba nárůstku. Postupně se dostaneme až k samotným parametrům ovlivňující drsnost povrchu při obrábění, kde uvedeme hlavní řezné podmínky ovlivňující drsnost povrchu a také optimální nastavení geometrie břitu výměnných břitových destiček z pohledu závislosti na integritě povrchu. V druhé části se budeme věnovat experimentálnímu měření, ve kterém analyzujeme výsledky měření, získané hodnoty porovnáme a náležitě zpracujeme výstupní data. Závěrem bakalářské práce bude zhodnocení výsledků měření, shrnutí optimálních řezných podmínek, shrnutí parametrů ovlivňujících drsnost povrchu a určení optimálního postupu při návrhu řezných podmínek před procesem obrábění.

2 Proces obrábění

Obrábění je široce využíváno ve všech směrech strojírenství a je jedním ze základních procesů úpravy povrchu materiálu obrobku. Obecně spočívá proces obrábění v úběru materiálu obrobku pomocí různých účinků, ať už se jedná o metodu konvenční nebo metodu nekonvenční.

U klasického postupu obrábění oceli jedním břitem přetváří nástroj integritu povrchu a odděluje jej v podobě třísky. Pružné a plastické deformace nastanou v okamžiku, jakmile dojde k překročení meze kluzu materiálu obrobku. Tvary třísek se značně mění podle druhu obráběného materiálu, pokud je materiál obrobku dostatečně houževnatý mají za následek kontinuální tok oddělených částic lamelovitého tvaru.[3]

V rámci obrábění je tedy prioritou nejen dosažení precizně obrobené plochy a přesných rozměrů, ale také efektivní odstranění tvarovaných třísek, případně i lámání třísek, v závislosti na konkrétní situaci. Třísky jsou děleny podle různých typů, které popisují jejich vlastnosti, velikost a tvar. Procesy spojené s obráběním lze také chápat jako odebrání třísky z obrobků. [3][4]

2.1 Základní terminologie procesu obrábění

Terminologie procesu obrábění je velice rozsáhlá. Proces obrábění se skládá z dalších procesů, které definují parametry obrobku po dokončení obrábění. Mezi těmito procesy se nachází i ty, které ovlivňují parametry drsnosti povrchu. Právě na tyto procesy se budeme zaměřovat v úvodní části bakalářské práce.

Na úvod do terminologie procesu obrábění je důležité zmínit rezný proces. Vzniká pomocí břitu nástroje a jedná se o soustavné nebo přerušované ubírání materiálu obrobku. Řezný proces je tedy realizovaný pomocí rezného nástroje. Řezný nástroj stejně jako obráběcí stroj, obrobek a přípravek jsou součástí takzvané soustavy obrábění. Ta obsahuje základní zmiňované části, které definují jednotlivé části procesu obrábění. Obráběcí stroje mohou být konvenční a nekonvenční. Přípravky fungují jako pomocné nástroje, které určitým způsobem usnadňují průběh procesu například vymezení správného rozměru polotovaru. Poslední ze základních částí soustavy obrábění je obrobek, jedná se o předmět obráběcího procesu. Je definován jako hotová obrobená součást po úplně dokončeném nebo částečně dokončeném procesu obrábění. [4][5][6]

2.1.1 Plochy obrobku

Při procesu obrábění povrchu dochází úběrem materiálu k přechodu mezi třemi významnými plochami. Tyto plochy definují, v jaké fázi se obrobek nachází. Obráběná plocha je plocha obrobku (Příloha 5, bod 1, str. 41), která je odebírána za účelem dosažení požadovaného tvaru, rozměrů a drsnosti povrchu. Obrobená plocha (Příloha 5, bod 2, str. 41) je naopak finální výsledek procesu obrábění, který byl formován v závislosti na čase a řezných podmínkách. Tato plocha je definována určitými parametry se vztahem k této obrobené ploše. Pro nás je nevýznamnější parametr struktury povrchu, který určuje hodnotu délky, výšky a hloubky amplitudy obrobené plochy. Dalšími důležitými parametry jsou vlastnosti povrchové vrstvy, které zahrnují úchytky rozměrů, tvaru, a polohy. Poslední ze tří ploch obrobku je přechodová plocha (Příloha 5, bod 3, str. 41). Definuje okamžitou plochu obrobku při obrábění, na kterou působí ostří. Jak už můžeme vyvodit z názvu jedná se o přechodovou plochu mezi plochou obráběnou a plochou obrobenou.[4]

Před zahájením procesu obrábění je důležité znát i vlastnosti obráběného materiálu a technologické vlivy působící na obrobek. Jednou z těchto vlastností ovlivňující finální drsnost povrchu je obrobitelnost materiálu. Teorie definuje obrobitelnost jako souhrn vlastností obráběného materiálu z hlediska jeho vhodnosti pro výrobu součástí konkrétním způsobem obrábění. V širším smyslu je obrobitelnost funkční veličinou vztahu mezi nástrojem a obrobkem pro které jsou důležitá tato kritéria:

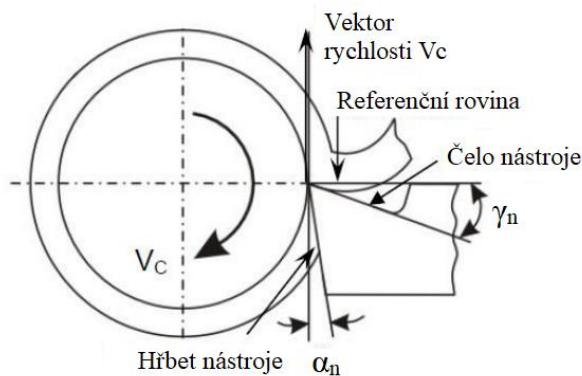
- Řezné síly v procesu obrábění
- Sklon k vytváření nárůstku na břitu nástroje
- Tvorba třísky
- Životnost břitu
- Struktura povrchové vrstvy před procesem obrábění [3]

Kombinace znalosti vlastností materiálu a volby vhodného postupu a nástroje před zahájením procesu obrábění je nadmíru důležitá a pomáhá nám dosáhnout kvalitních výsledků nejen v oblasti integrity povrchu, ale i například v ekonomické oblasti, kdy nebude docházet k rychlému opotřebení břitu nebo danou součást budeme moci obrobit v rychlejším čase, což z dlouhodobého hlediska při výrobě více kusů hraje velký význam. Mezi technologické vlivy, které je potřeba brát v úvahu můžeme zařadit i lidskou chybu například chybu v měření, která je samozřejmě nevyhnutelná, tepelnou deformaci materiálu obrobku nebo i jiné náhodné vlivy.[4][3]

2.1.2 Geometrie řezného nástroje

Jak materiál, tak geometrie řezných nástrojů hrají velmi důležitou roli pro jejich výkonnost při dosažení efektivity, účinnosti a celkové hospodárnosti obrábění. Dělí se na jednobodové, dvoubodové a vícebodové. Soustružnický nástroj spadá do kategorie jednobodových. Slovem geometrie nástroje se rozumí specifické úhly nebo sklony hlavních ploch a hran nástroje v místě řezu. Úhel čela a úhel hřbetu (Obr. 1) jsou nejvýznamnějšími úhly pro všechny typy řezných nástrojů a zejména při působení na parametry ovlivňující drsnost povrchu. [7]

Obr. 1 Úhly hřbetu a čela nástroje [přeloženo autorem] [7]



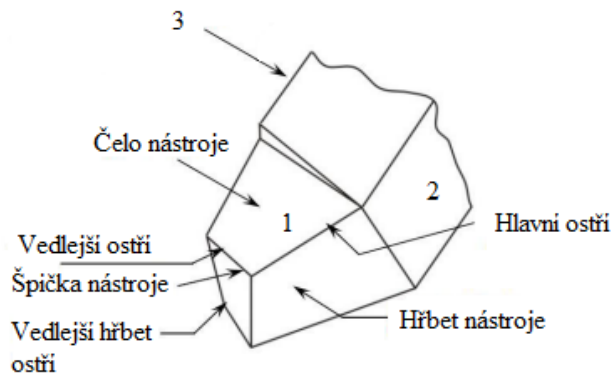
Úhel sklonu referenční roviny od čela nástroje se označuje γ_n a používá se k snadnému odvodu třísky a celkovému zajištění průběhu obrábění. Úhel hřbetu nástroje se označuje α_n a může být kladný, záporný nebo dokonce nulový. Výhody těchto úhlů hřbetu se liší podle potřeby a požadavků na obrábění. Kladný úhel pomáhá snížit řeznou sílu, a tím i požadavky řezných podmínek. Záporný úhel zvyšuje pevnost břitu a životnost nástroje a nulový úhel hřbetu zjednodušuje konstrukci. Úhel hřbetu také zabraňuje tření boku nástroje o obrobený povrch, což způsobuje ztrátu energie a poškození nástroje, proto musí být vždy přibližně 3-15°. [7]

2.2 Řezný nástroj a jeho opotřebení

Řezný nástroj je stavebním kamenem v procesu obrábění. Právě díky němu dochází k odebrání třísky z obráběného materiálu. V případě VBD přebírá funkci lámání a svinování třísky utvařeč. Při pohledu na obrázek č. 2, si všimneme rozdělení nástroje na tři hlavní části. Bod číslo 1 označuje řeznou část nástroje. Tato část se skládá z určitých ploch a řezných hran, které definují řeznou část nástroje a figurují v řezném procesu. Hřbet nástroje a čelo nástroje bylo již zmíněno a definováno v předchozí kapitole, takže nám zbývají jen

typy ostří. Hlavní ostří je definováno jako prvek, pomocí něhož je uskutečněn řezný proces a utváří přechodovou plochu. Jeho poloha je definována jako průsečnice mezi čelem nástroje a hřbetem nástroje. Vedlejší ostří je dalším významným prvkem v problematice řešení parametrů ovlivňujících drsnost povrchu. Jeho funkcí jsou dokončovací práce na obrobené ploše. Špička nástroje je ve většině případů zaoblená, definuje se u ní zejména poloměr zaoblení, který hraje významnou roli v utváření drsnosti povrchu. Bodem číslo 2 je označena základna, která je částí stopky a určuje polohu a orientaci nástroje v držáku. Bod číslo 3 představuje upínací část, která jak lze vyvodit z názvu koná funkci stopky a slouží k upnutí nástroje do sklíčidla.[4][5]

Obr. 2 Části a plochy řezného nástroje [přeloženo autorem] [7]



Pro dosažení nejvyšší možné produktivity u obrábění je důležitá volba správného řezného nástroje. Volba materiálu a geometrie břitu hrají přitom významnou roli. Může se stát, že i při správné volbě nástroje nelze docílit požadovaných vlastností obrobené plochy. K tomu může dojít například vinou vibrací vznikajících v procesu soustružení. Bohužel i tento faktor způsobuje předčasné ukončení trvanlivosti břitu. Opotřebení nástroje je tedy interakce mezi nástrojem, materiálem obrobku a řeznými podmínkami. Nejdůležitějšími faktory jsou mechanické, teplené, chemické a abrazivní. [3]

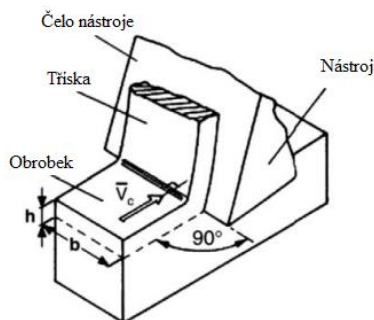
2.2.1 Proces řezání

Při zkoumání parametrů ovlivňující drsnost povrchu se soustředíme právě na parametry, které definují integritu povrchu po procesu obrábění. Proto se musíme zaměřit na tvorbu třísek a jejich vlastnosti. Proces řezání se dá rozdělit na dva typy, a to šikmé řezání (Obr. 4) a ortogonální řezání (Obr. 3). U ortogonálního řezání je ostří řezného nástroje orientováno kolmo ke směru pohybu řezání. Jinak řečeno, osa procházející ostřím je odkloněna o 90° od osy směru řezného pohybu. [4]

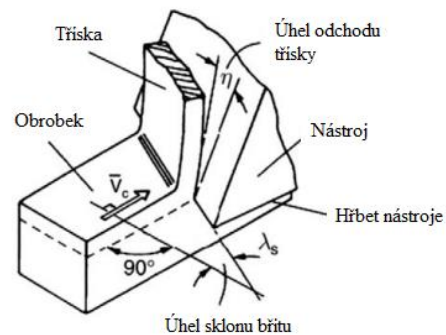
Vzhledem k tomu, že ortogonální řezání představuje spíše dvourozměrný než trojrozměrný mechanický proces, vede k relativně jednoduchému reznému procesu, který je proto široce používán v teorii i praxi. Zejména umožňuje převzetí modelu s předpokládaným rovinným stavem jak plastické deformace, tak napětí pod nástrojem. [8]

Šikmé řezání je naopak proces trojrozměrný. Ostří rezného nástroje je v podstatě nejprve odkloněno od osy směru rezného pohybu, jako je tomu u ortogonálního řezání a poté je ještě skloněno o úhel sklonu břitu λ_s od referenční roviny rezného nástroje. [4]

Obr. 3 Ortogonální řezání [přeloženo autorem] [7]



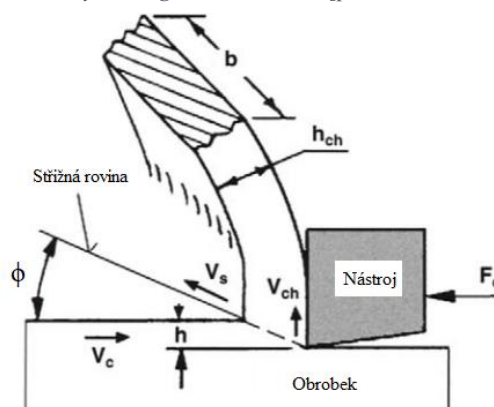
Obr. 4 Šikmé řezání [přeloženo autorem] [7]



2.2.2 Síly vznikající při řezání

Během procesu ortogonálního řezání je ostří nástroje tlačeno specifickou silou F do obrobku, která vyvolává tvorbu plastických a pružných deformací. Smykové napětí se zvyšuje až na určitou hranici, kdy dojde k plastické deformaci materiálu obrobku před břitem a začíná se tvořit tříška (Obr. 5). [4][6]

Obr. 5 Vznik třísky u ortogonálního řezání [přeloženo autorem] [8]

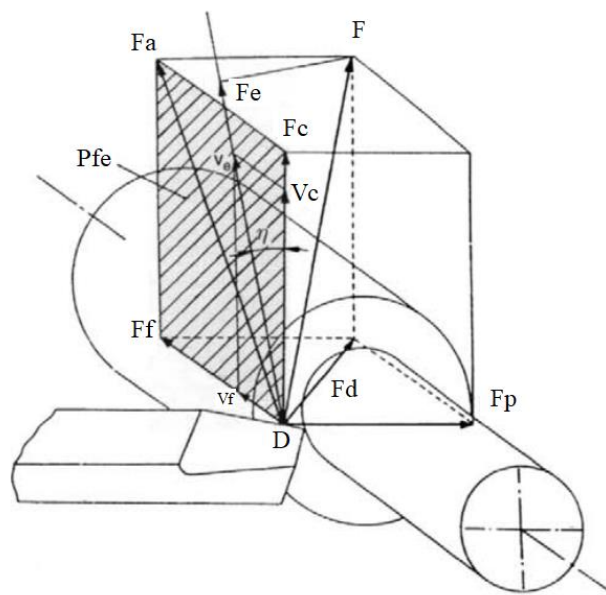


Formování třísky pokračuje během pohybu nástroje ve směru obrábění s narůstajícími plastickými deformacemi. Během tohoto pohybu dochází k nahromadění a ztuhnutí vrstev materiálu ve směru kolmém na rovinu kluzu. Pokud napětí v materiálu

přesáhne mezní hodnotu smyku, oddělí se segment třísky od obrobku pod úhlem ϕ a plastická deformace končí. [4][6]

Obvykle je výsledná řezná síla rozdělena na geometrickou a fyzikální složku. U ortogonálního řezání je celková síla řešena kolmým průmětem do dvou směrů, a to posuvových směrů a směrů odchodu třísky. Výsledkem je řezná síla a posuvová síla označená symboly F a F_f . Zpětná (pasivní) síla F_p směřující od obrobku v radiálním směru a kolmo k pracovní rovině se u ortogonálního řezání obvykle zanedbává a celková řezná síla se redukuje na aktivní sílu F_a . Jak je patrné z obrázku č. 3, při ortogonálním řezání leží celý systém sil v jedné rovině. Síla ve směru relativního pohybu nástroje F_c určuje velikost energie potřebné k pohybu nástroje na danou vzdálenost. V případě šikmého řezání je soustava sil působících na řezný nástroj trojrozměrná, tj. výslednice (celkové) řezné síly F má tři vzájemně kolmé složky, které jsou znázorněny na obrázku č. 6. [8]

Obr. 6 Vektorový obrazec sil působících v šikmém řezání [8]



2.2.3 Tvorba třísky

Při procesu obrábění dochází ke tvorbě třísky pomocí břitu řezného nástroje. Ten je vtlačován do obráběného materiálu, za podmínky, že nástroje koná relativní pohyb vzhledem k obráběné ploše. Tříska je odváděna po čele nástroje z řezné oblasti. Tvorba třísky je ovlivňována několika faktory, přičemž zásadní jsou vlastnosti jak materiálu, který je obráběn, tak i samotného soustružnického nástroje. Dále hraje roli geometrie břitu nástroje a řezné podmínky, jako je řezná rychlost, rychlost posuvu a tloušťka odebíraného materiálu obrobku.[9]

Při obrábění existuje ovšem ještě velké množství jiných faktorů, které ovlivňují utváření třísky. Jsou to například řezné síly, pevnost nástroje, teplota i vibrace. I tyto parametry mají svůj význam, pokud se budeme bavit o kontrolovaném odchodu třísky. Většina VBD má pozitivní úhel čela, sloužící dobrému utváření třísky a jejímu snadnému odchodu. Řezné podmínky ovlivňují velikost a tvar třísky přímo. Řezná rychlost nemá zdaleka takový vliv jako hloubka řezu nebo rychlost posuvu. Geometrie břitu také ovlivňuje tvorbu třísky. Úhel nastavení hlavního ostří určuje délku, šířku a směr pohybu třísky. Poloměr špičky ovlivňuje tvorbu třísky jen do určité hloubky řezu. [3]

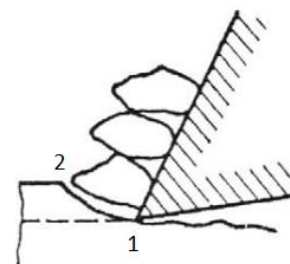
2.2.3.1 Druhy třísek

Druhy třísek se dají klasifikovat podle tří typů dělení. První typ je dělení podle tvaru třísky při opouštění řezné oblasti. Tento typ není příliš vypovídající, rozděluje třísky na tři základní tvary, a to na rovnou třísku, třísku kroutící se do strany a třísku kroutící se směrem vzhůru od čela nástroje. Druhý typ rozděluje třísky do osmi popisných tvarových skupin, přičemž každá z těchto skupin se dále dělí na 1÷4 podskupiny definující velikost třísky a fyzikální podmínky (Příloha 8, str. 44). Tento typ rozdělení je normovaný podle normy ISO ČSN 3685:1993. [8]

Třetí typ dělení je založen na mechanismech deformace materiálu a mechanismech lomu, které vyplývají z vlastností obrobku a řezných podmínek procesu. Tento typ klasifikace rozděluje třísky na dva typy, a to na trhaný (diskontinuální) a smykový, přičemž poslední jmenovaný typ se dále dělí na elementární, článkové neboli stupňovité a plynulé třísky. Tento typ dělení rozděluje třísku podle úrovně kontinuity odchozího materiálu a je pro nás tím pádem nejzajímavější ze tří uvedených typů dělení třísek. [8]

Trhaný typ třísek (Obr. 7) vzniká při obrábění křehkých materiálů nebo také při obrábění tvárných materiálů při velmi nízkých otáčkách a vysokých posuvech. K lomu dochází, když tříska nepodléhá plastické deformaci a trhлина se šíří od hrany (Obr. 7, bod 1) k volnému povrchu (Obr. 7, bod 2). Výsledek tohoto jevu je rozpad třísky na malé segmenty.[8]

Obr. 7 Trhaná (diskontinuální) tříska [8]



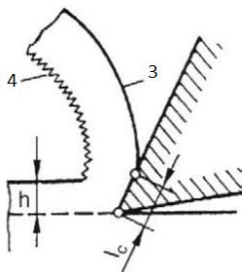
Plynulé třísky (Obr. 8) jsou běžné u obrábění většiny tvárných materiálů jako je kované železo, měkká ocel, měď a hliník, protože tvárné kovy a slitiny se nelámou ve

smykové rovině. Podmínkou tvoření plynulých třísek je vysoká řezná rychlost, nízké řezné síly a vyznačuje se obecně dobrou kvalitou povrchu. [8]

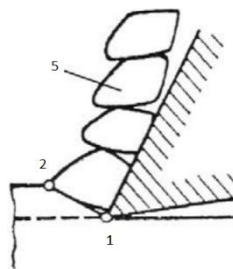
Elementární třísky (Obr. 9) vznikají při vysokorychlostním a tvrdém obrábění. Můžeme to definovat jako přechodný děj mezi plynulou a trhanou třískou, dochází zde ke změně tloušťky třísky a následnému oddělování segmentů (Obr. 9, bod 5). [8]

Článekové neboli segmentové třísky (Obr. 10) se vyznačují oblastmi intenzivního smyku oddělené oblastmi materiálu s relativně nižší deformací. Vznikají při zvýšené řezné rychlosti u materiálů s nízkou tepelnou vodivostí a nízkou tepelnou kapacitou, jako jsou slitiny titanu a austenitické nerezové oceli. S rostoucími otáčkami roste i velikost deformace, až dojde k úplnému oddělení a z článekové třísky se stává elementární (Obr. 10, bod 6). [8]

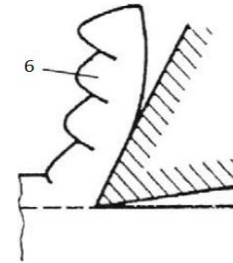
Obr. 8 Plynulá tříška [8]



Obr. 9 Elementární tříška [8]



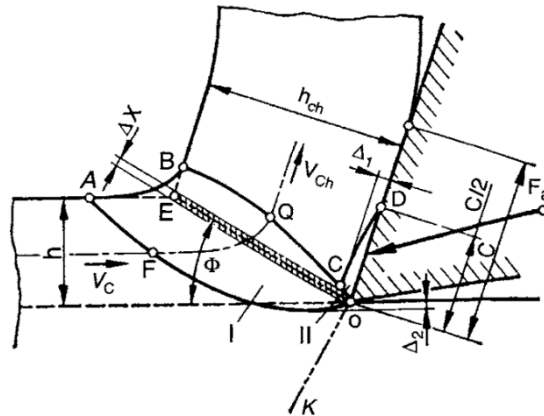
Obr. 10 Článeková tříška [7]



2.2.4 Plastické deformace v oblasti řezu

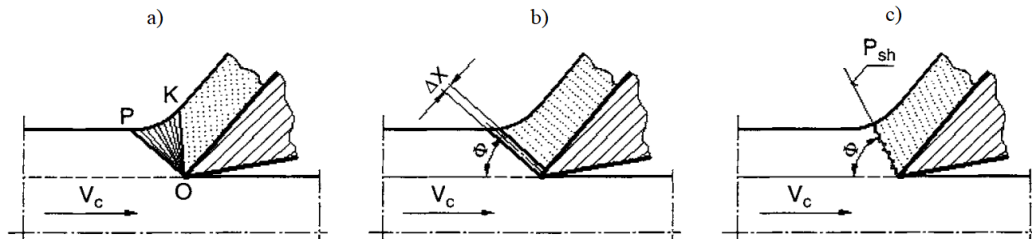
Při obrábění kovů může být oblast tvorby třísky sestavená ze tří charakteristických zón I-III a schematicky znázorněna jako na obrázku č. 11. Rozsáhlá primární plastická deformační (smyková) zóna I se v rámci oblasti OAB vyznačuje řadou skluzových čar včetně čáry OFA, na které začíná plastická deformace, a čáry OCQB, na které je tříška materiálu zcela mechanicky zpevněná. Částice materiálu se při deformaci pohybuje po dráze FQ a proces deformace je nejintenzivnější mezi pásmem Δ_x a horní hranicí OB. Příslušná oblast OCD se nazývá sekundární plastická deformace (smyk) a je označena jako zóna II. Sekundární plastická deformace se definuje také hloubkou Δ_1 . Terciární deformační zóna III je lokalizovaná pod řeznou hranou v hloubce Δ_2 . [8]

Obr. 11 Oblasti deformací [8]



V praxi se pro výpočty používá zjednodušený přístup k charakteristice plastické deformace v zóně řezu. Je založen na třech základních zjednodušeních zahrnujících nahrazení křivočarých hranic přímkami OP a OK (Obr. 12, a) a jednou smykovou plochou Psh (Obr. 12, c). U smykové plochy Psh se předpokládá, že materiál je dokonale plastický (nestlačitelný). Třetí typ zjednodušování je zavedení kompresního poměru třísky (Obr. 12, b), což je poměr idealizované tloušťky třísky k nominální tloušťce řezu. [8]

Obr. 12 Zjednodušené modely formovacích zón třísky [8]



Plasticita je velice důležitým pojmem v problematice defomračních oblastí. Je udávána chemickým složením, krystalickou stavbou a podmínkami plastické deformace. V závislosti na plasticitě vznikají v charakteristických zónách plastických deformací třísky již zmiňovaných typů a tvarů. Na čáře OB (Obr. 11) dochází k vyčerpání plasticity a ke kluzu. Na tento jev může ragovat materiál porušením svojí soudržnosti a podle druhu lomu segmentu třísky dále vznikají uvedené druhy třísky. [5]

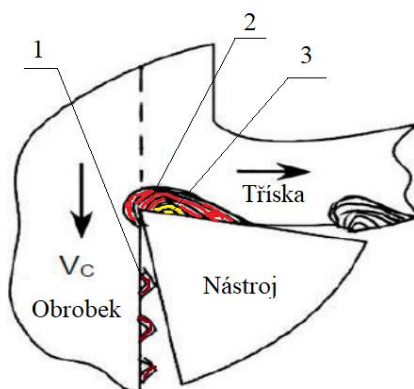
Tvoření plastických deformací způsobuje zejména pěchování třísky, vznik zbytkových napětí, oddělování třísky nebo opotřebení nástroje. Na drsnost povrchu má největší vliv tepelné zatížení VBD, vznik nárůstku a mechanické zatížení nástroje. [4]

Oblast OABC (Obr. 11) neboli stav napjatosti je velice hybná a je udávána hned několika vlastnostmi. První z aspektů ovlivňujících tuto oblast je geometrie nástroje. Další neméně důležitý aspekt je řezná rychlost. Pokud se zvyšuje řezná rychlost, deformační oblast se bude zužovat, při vysokých řezných rychlostech dochází ke splývání ploch OA a OB. Deformace, zpevňovací schopnosti a chladící kapalina (emulze) také ovlivňují již zmiňovanou oblast OABC. Nejvýraznější vliv v zóně I má především mechanické zatěžování nástroje řeznými odpory, zatěžování teplem vznikajícím při procesu řezání a nahromadování a zhutňování materiálu třísky. V zóně II je nejvíce znatelné opotřebení břitu na čele a částečně i zhutňování třísky. V terciární deformační zóně III je nejvíce znatelný vznik zbytkových napětí ve vrstvě obrobenej plochy a opotřebení ostří řezného nástroje na ploše hřbetu. [4][5]

2.2.5 Tvorba nárůstku

Samotný vznik nárůstku je nežádoucím jevem, může mít však i svoje výhody jako například ochrana břitu nástroje před opotřebením. Při sekundární deformaci na rozhraní třísky a čela nástroje vzniká napětí a vysoké teploty. Při takto vysokých teplotách a namáháních může dojít k lokálnímu tavení materiálu obrobku, dále navařování této taveniny na břit nástroje a vzniku nárůstku. Obecně můžeme nárůstek dělit na stabilní (bod 3, Obr 13) a nestabilní část (bod 2, Obr 13). Stabilní část představuje již navařený, vytvrdnutý, spěchovaný nárůstek ovšem nestabilní část představuje stále aktivní nevychlazenou část nárůstku, která má tendenci se zachycovat na obrobenej ploše (bod 1, Obr. 13). [4][7]

Obr. 13 Tvorba nárůstku s nestabilní částí ovlivňující drsnost povrchu [7]



Proces tvorby nárůstku je tedy procesem periodickým. Proces tvoření třísky je zapříčiněn primární plastickou deformací a následným odchodem třísky po hřbetu nástroje. Teplota této třísky se pohybuje v řádech 10^2 °C a na styčnou plochu s čelem nástroje působí tlaky v řádech 10^2 až 10^4 MPa. [10]

Mezi čelem nástroje a třískou dochází ke tření a tato třecí síla je výsledkem dvou působících složek:

- a) síly překonávající adhezi mezi nástrojem a materiálem třísky,
- b) síly překonávající mikronerovnosti povrchu. [10]

Při deformaci vrcholků mikronerovností čela nástroje vzniká kontakt čistých kovových ploch, při kterém na břit působí adhezní síly a dochází k místnímu navařování za studena mezi nástrojem a třískou. Dochází ke zvyšování napětí jak u třísky, tak i u nástroje. Sekundárně deformovanou vrstvu nebo její část, která zůstává navařena na nástroji nazýváme nárůstek. Na tvorbu mají největší vliv tyto podmínky:

1. stav povrchu obou materiálů, chemické složení obou materiálů a krystalická stavba obou materiálů,
2. teplota styčných ploch,
3. napětí na styčné ploše. [10]

2.2.5.1 Vliv řezných podmínek na tvorbu nárůstku

Nárůstek vzniká zejména u tvárných materiálů, v oblasti nízkých řezných rychlostí do $20 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. Velikost a tvar nárůstku je udáván úhlem řezu VBD, poloměrem řezu a jeho tloušťkou. Největší vliv má řezná rychlost, fyzikální vlastnosti obráběného materiálu, úhel řezu, tloušťka třísky a řezné prostředí. Geometrie nástroje působí na tvorbu nárůstku pouze, když působí i teplotné namáhání působící na břit VBD. [10][6]

Nárůstek má obecně negativní vliv na integritu obrobeného povrchu. Z hlediska parametrů ovlivňujících drsnost povrchu se potřebujeme vyhnout určitým parametrům ovlivňující velikost a tvar nárůstku. Úhel řezu působí na rozsah rychlostí i na úhel třísky ($90^\circ - \gamma_n$), ideální úhel u obrábění oceli je $\delta_o \leq 50^\circ$ při němž se nárůstek netvoří. Teplota ostří břitu má nepravidelnou křivku závislosti vůči tvorbě nárůstku. Při teplotě 600°C je tvárnost oceli tak velká, že při sekundární deformaci nedochází k tvoření nárůstku. U řezného prostředí se jedná zejména o vliv rychlosti posuvu a řezné kapaliny. Při procesu je důležité důkladně chladit, nejlépe kapalinou, jak břit nástroje, tak obráběnou plochu a tím zamezit navařování za studena mezi nástrojem a třískou a také to snižuje intenzitu sekundární deformace. [10]

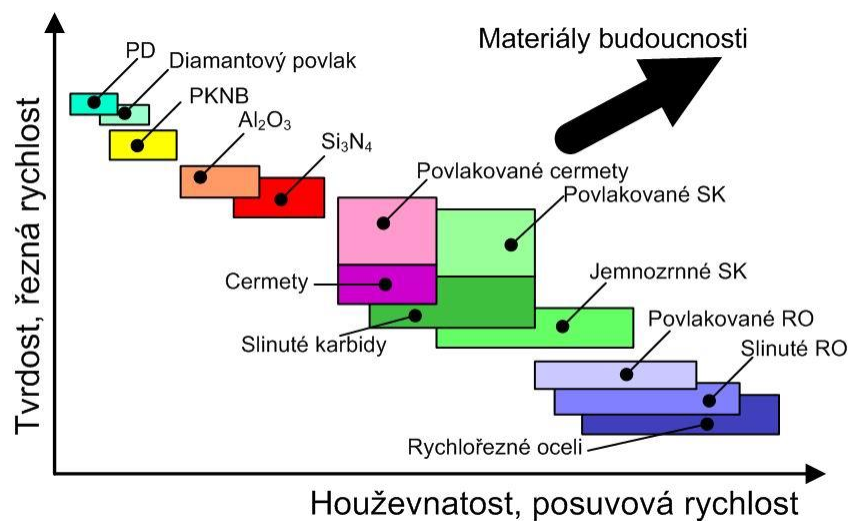
2.2.6 Materiály řezných nástrojů

Pro efektivní odebrání třísek a tvorbu kvalitních povrchů je nezbytné mít k dispozici kvalitní řezný nástroj. Ten by měl vykazovat vysokou odolnost a tvrdost v oblasti ostří, což je klíčové zejména u materiálů s požadavky vyžadujícími odolnost vůči vysokým teplotám. (Příloha 7, str. 43).[11]

Na grafu závislosti teploty na tvrdosti řezných materiálů v příloze 7 můžeme vidět, že k nejodolnějším materiálům vůči poklesu tvrdosti při vysokých teplotách patří zejména keramiky Si_3N_4 (nitrid křemičitý) a do jisté míry i PKNB (polykrystalický nitrid boru) nebo Al_2O_3 (oxid hlinitý). Parametry jako jsou vysoké pracovní teploty nebo tvrdost materiálu mají do jisté míry vliv na konečnou drsnost povrchu obráběného materiálu, proto při výběru typu VBD musíme vzít v úvahu i působení vysokých teplot na břit a zohlednit faktor poklesu tvrdosti u vybraného materiálu břitu při návrhu pracovního postupu.

Řezné nástroje s vysokou tvrdostí se používají při vysokých řezných rychlostech a při malých průřezech. Řezné nástroje s vysokou houževnatostí se na druhou stranu používají u vysokých posuvných rychlostí (Obr. 14). [11]

Obr. 14 Vliv mechanických vlastností nástrojového materiálu na řezné podmínky [11]



V příloze 6 na straně č. 43 jsou uvedeny základní vlastnosti již zmiňovaných vybraných řezných materiálů jako je lomová houževnatost, ohybová pevnost, tvrdost a další. Mezi nejpoužívanější materiály řadíme slinuté karbidy, cermety, řeznou keramiku, rychlořezné oceli, syntetické diamanty a kubický nitrid boru (KNB). Slinuté karbidy se používají více než 50 % všech řezných materiálů a z toho minimálně 85 % slinutých karbidů je povlakových. Jejich vlastnosti jsou zejména pevnost a houževnatost. Výhodou povlaků je

ochrana slinutých karbidů před chemickými reakcemi. Nejčastěji se používají při vysokých řezných i posuvných rychlostech, velkých úběrech materiálu i při přerušovaných řezech. Cermety jsou oproti slinutým karbidům disponovány nižší houževnatostí, což zapříčiňuje rychlejší opotřebení břitu. I z tohoto důvodu jsou cermety používány spíše u středně a lehce namáhaných řezů. Na rozdíl od cermetů je řezná keramika vhodná i pro nižší posuvy, ale stále je vhodná i pro vysoké řezné rychlosti. Její nevýhodou je rychlé opotřebení břitu. Příklady řezných keramik jsou keramiky na bázi Al_2O_3 , keramiky na bázi Si_3N_4 nebo směsné keramiky $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$. Nejčastějším příkladem použití je obrábění šedých litin. Syntetické diamanty se vyznačují vysokou tvrdostí, nízkou houževnatostí, nízkým opotřebením břitu a vysokým pořizovacími náklady. Používají se zejména na speciální kusové zakázky. Kubický nitrid boru je zase používán pro kalené ocele a superslitiny. Druhým nejběžněji používaným materiálem jsou rychlořezné oceli. Rychlořezné oceli jsou používány jako materiál řezných nástrojů u přibližně 20 % případů. Vyznačují se vysokou tvrdostí, vysokou odolností proti popouštění a disponují nejvyšší houževnatostí ze všech uvedených nástrojových materiálů (viz. Obr. 14). Jejich použití je vhodné u nástrojů vystavených rázům a disponují nízkým opotřebením břitu. [11][12][13][14]

Z představených materiálů nástrojů nemůžeme najít jeden konkrétní, který bude vyhovovat podmínkám pro všechny typy obrábění. Tak jako u parametrů ovlivňující drsnost povrchu při obrábění, je i zde zapotřebí najít ideální materiál nástroje, který bude vyhovovat pro naši konkrétní aplikaci. Z našeho pohledu potřebujeme najít materiál nástroje, který bude správně odvádět třísky, bude mít potřebné parametry řezné a posuvné rychlosti a obecně prokazovat ideální vlastnosti materiálu obrobku i materiálu řezného břitu. Samozřejmě také bude záležet na jeho ceně, za jak dlouho dokáže danou součást obrobku za určitých řezných podmínek a na rychlosti jeho opotřebení.

3 Charakteristika řešeného problému

3.1 Integrita povrchu

Integrita nebo také struktura povrchu má významný vliv na výkonost, životnost a spolehlivost výrobku. Změny povrchu mohou zahrnovat mechanické, metalurgické, chemické a další změny. Tyto změny, i když se omezují na malou povrchovou vrstvu, mohou ovlivnit kvalitu součásti nebo mohou v některých případech způsobit, že je povrch dokonce nepřijatelný. Způsob povrchové úpravy a složitá kombinace drsnosti povrchu, zbytkového napětí, navařování za studena, a dokonce i fázová transformace negativně ovlivňují provozní chování obráběných dílů zejména únavou materiálu a působením koroze. [15]

Pokud tedy chceme definovat strukturu povrchu jako takovou, tak se jedná o nerovnoměrnosti, které se vyznačují jako povrchové výškové rozdíly. Dělí se na makrostrukturu a mikrostrukturu. Nás především bude zajímat geometrická mikrostruktura, která se zabývá problematikou zvlnění, a především drsností povrchu.[16]

Norma ČSN EN ISO 21920-2 definuje rozdělení geometrických parametrů následovně:

- P-parametr: parametr stanovený z primárního profilu
- W-Parametr: parametr stanovený z profilu vlnitosti
- R-parametr: parametr stanovený z profilu drsnosti[17]

V našem případě se zaměříme zejména na R – parametr, který se stanovuje z profilu drsnosti. Budeme zkoumat základní metody měření integrity povrchu, vady povrchu a parametry drsnosti povrchu.

3.2 Metody měření drsnosti povrchu

Metody měření drsnosti povrchu můžeme rozdělit na čtyři kategorie: elektronické měření, optické měření, vizuální měření a hmatové měření. Vizuální a hmatové měření je nejjednodušší a neúčinnější z uvedených metod měření povrchu, ale zároveň patří mezi nejméně přesné a při menších rozměrech amplitudy ji téměř není nemožné považovat za validní způsob měření povrchu.[15]

3.2.1 Elektronické přístroje

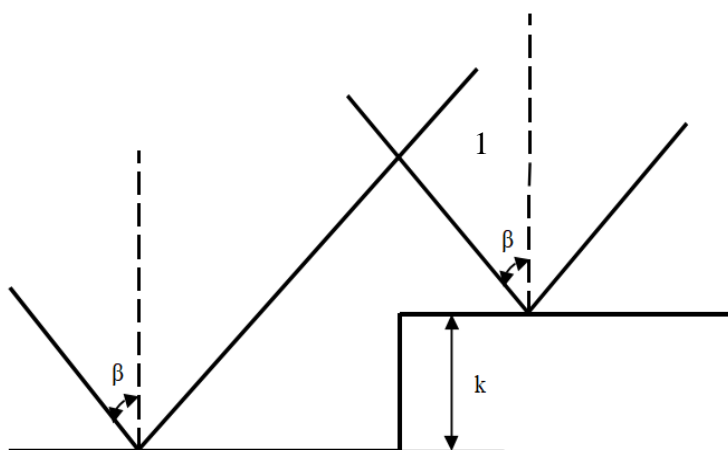
Existují dva typy elektronických přístrojů pro měření: přístroje průměrující výsledky a přístroje zaznamenávající profily. Průměrující typ, ve většině případů, používá hrot, který je táhnut po povrchu měřené části. Data získaná ve vertikálním směru pohybu hrotu jsou zasílána a zaznamenána na záznamovém zařízení, které vykresluje profil povrchu (Příloha 9, str. 44). U průměrujícího typu měřidel jsou data přiváděna do průměrujícího měřidla, kde se získá průměrná hodnota drsnosti povrchu. Nevýhody tohoto jsou zejména v nutnosti přerušit proces obrábění a hrot měřidla (např. diamantový hrot) může na měřeném povrchu zanechat mikroškrábance. [15]

V současné době se používají různé typy profilometrů. Příkladem je například profilometr pro měření drsnosti povrchu od společnosti Hommelwerke (Příloha 10, str. 44). V tomto elektronickém přístroji je sběrač s diamantovým hrotem, který je posouván po zkušebním povrchu konstantní pomalou rychlostí. Když se hlava rydla pohybuje horizontálně, pohybuje se také vertikálně, aby docházelo k sledování odchylky povrchu. Vertikální pohyb je převeden na signál, který představuje drsnost povrchu. [15]

3.2.2 Optické typy měření drsnosti povrchu

Strukturu povrchu lze také měřit nedestruktivně pomocí optických metod. Uvedeme si zde tři používané typy optického měření. První metodou je celkový integrovaný rozptyl neboli TIS. U této metody dochází k měření celkové intenzity difuzně rozptýleného světla pomocí detektoru. Metoda TIS je vysoce spjata s parametrem drsnosti povrchu R_q a je používána prakticky pouze u velmi hladkých povrchů. Druhou metodou je obousměrná distribuční funkce rozptylu neboli BSDF. Tato metoda je definována jako „povrchová zářivost dělená dopadajícím povrchovým zářením“. Třetí a nejpoužívanější metodou optického měření povrchu je kontrastní spektroskopie. Když koherentní světlo osvětluje drsný povrch, odráží se od něj paprsek tvořící část náhodných vzorů světlých a tmavých odstínů. Tomuto jevu se říká skvrnitý vzor a vzniká interferencí rozptýlených vlnovek z různě vysokých bodů v osvětlené oblasti (viz. Obr 15). Při této metodě se tedy získává směrodatná změna odchylky intenzity těchto skvrn na pozorovaném povrchu. Na obrázku č. 15 je znázorněna interference dvou světelných paprsků (bod 1) se stejným úhlem osvětlení β a rozdílnými výškami k dopadu paprsku na povrchu nerovnosti. [15]

Obr. 15 Rozdílný rozptyl vlnovek způsobený rozdílnou výškou [15]



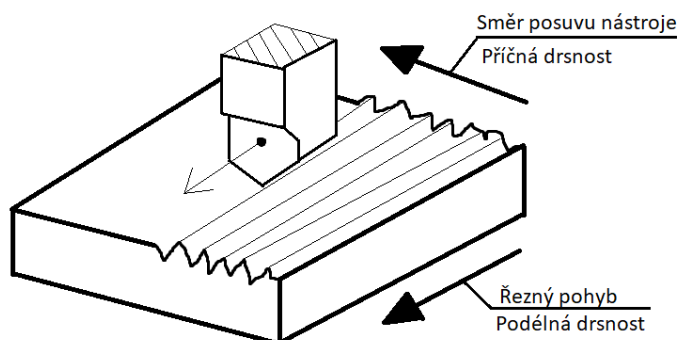
3.3 Parametry drsnosti povrchu

Parametry drsnosti povrchu jsou výstupní veličinou při měření integrity povrchu a jsou základním kritériem při zkoumání parametrů ovlivňující drsnost povrchu.

V následujících kapitolách zjistíme, že drsnost povrchu se udává ve vícero parametrech, první a pro nás nejměrodatnější je výškový parametr amplitudy, u kterého se snažíme zaznamenat zejména střední aritmetickou úchylku. Druhý je parametr rozteče amplitudy a třetí pro nás nejméně důležitý je hybridní neboli tvarový parametr amplitudy. Čtvrtým možným parametrem je zvlnění povrchu, které zkoumá střední hodnotu zvlnění nefiltrovaného profilu a maximální hodnota zvlnění nefiltrovaného profilu a používá se u výpočtu W parametru integrity povrchu.[15]

Drsnost v závislosti na pohybu posuzujeme ve dvou směrech. V příčném směru a podélném směru. V našem případě budeme drsnost zkoumat v příčném směru neboli směru posuvu nástroje (Obr. 16). [15]

Obr. 16 Směr posuzování drsnosti povrchu [autor]



Při běžných procesech obrábění může docházet k vadám povrchů. Vady v závislosti na třídě a složení materiálu obrobku zahrnují: plastické deformace, nárůst hran, otřepy, důlky a další. Jsou to nežádoucí jevy a chceme se jim vyvarovat, proto je důležité správně nastavit řeznou rychlost, neobrábět opotřebovaným nástrojem a nastavit vhodnou hloubku řezu. Mezi zmiňované vady nepatří trhliny v obrobené ploše. [15]

3.3.1 Výškové parametry amplitudy

Pro lepší přehlednost byla zpracována tabulka hlavních normovaných parametrů drsnosti povrchu.

Tab. 1 Výškové parametry amplitudy drsnosti povrchu [15]

Parametr	Popis
R_a	Střední aritmetická odchylka profilu
R_t	Maximální výška profilu
R_q	Průměrná kvadratická úchylka profilu
R_p	Maximální výška výstupku profilu
R_v	Maximální hloubka prohlubně profilu
R_z	Průměrná výška profilu
R_{sm}	Střední rozteč profilu

Střední aritmetická úchylka profilu je průměrná hodnota profilu drsnosti určená z absolutních hodnot úchylek kolem středové čáry v rámci délky (Příloha 11, str. 45). Tento parametr se snadno definuje, snadno se měří i na nejméně sofistikovaných profilometrech a poskytuje obecný popis amplitudy povrchu. Maximální výška profilu se velmi často používá spolu s R_a jako obecný ukazatel, jde o součet maximálního výstupku vrcholu R_p a maximální hloubky prohlubně profilu R_v (Příloha 12, str. 45). Průměrná výška profilu vyhlazuje velké odchylky profilu a je ideální pro porovnávání s maximální výškou povrchu. Průměrná kvadratická úchylka profilu se definuje jako průměrná střední kvadratická hodnota drsnosti a je citlivější na prohlubně a výstupky než R_a . Maximální výška výstupku profilu je hodnota nejvyššího jednotlivého výstupku nad středovou čarou v rozsahu základní délky (Příloha 12, str. 45). A jako poslední zmíněná je maximální hloubka prohlubně profilu, která vyjadřuje hodnotu nejhlubší prohlubně profilu pod středovou čarou (Příloha 12, str. 45). Je ukazatelem štěrbin shromažďování oleje nebo také ukazatelem mechanického chování povrchu při vysokém namáhání. [15]

3.3.2 Parametry rozteče amplitudy

Střední rozteč profilu neboli R_{sm} poskytuje přibližnou vzdálenost mezi po sobě jdoucími vrcholy v rozsahu základní délky (Příloha 13, str. 45). [14]

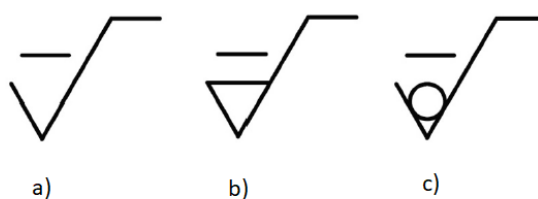
3.3.3 Hybridní parametry amplitudy

Průměrný sklon profilu označován $R\Delta_a$ je součástí hybridních neboli tvarových parametrů amplitudy, je úzce spojen s třením a hydrodynamickým mazáním. Výrazně citlivějším parametrem je průměrný kvadratický sklon profilu neboli $R\Delta_q$. Jedná se o střední kvadratickou hodnotu stoupání profilu $dZ(x)/dX$ (Příloha 14, str. 46) a je citlivější než $R\Delta_a$ na drastické změny profilu v důsledku opotřebení. Používá se zejména u hodnocení tribologických vlastností, odrazu světla a galvanickém povlakování. [15][18]

3.4 Značení drsnosti povrchu

Drsnost povrchu se se udává na technické dokumentaci pomocí grafických značek (Obr. 17). Grafická značka musí udávat označení parametru, toleranční meze parametru a jiné požadavky na výrobní proces. Značení drsnosti je podrobně popsáno v normě ČSN EN ISO 21920-1. V již zrušené normě ISO 1302 se udávala základní, rozšířená a úplná grafická značka textury povrchu, přičemž úplná grafická značka obsahovala značkový praporek. Nová norma ČSN EN ISO 21920-1 stanovuje pouze základní grafickou značku ve třech verzích, které vždy obsahují značkový praporek. [19]

Obr. 17 Grafické značení textury povrchu profilu podle normy ČSN EN ISO 21920-1



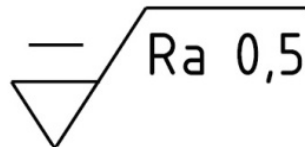
Grafické značení má následující význam:

- a) Je dovolen použit libovolný výrobní proces
- b) Je požadováno odebírání materiálu
- c) Odebírání materiálu není dovoleno

[19]

Minimální indikace parametrů definujících drsnost povrchu může vypadat následovně. První podmínkou je samozřejmě jedno ze tří grafických značení drsnosti povrchu. Druhou podmínkou je značka příslušného parametru (R_a , R_z , a další) a třetí podmínkou indikace je hodnota toleranční meze příslušného parametru textury povrchu profilu. V případě obrázku č. 18 se jedná o hodnotu toleranční meze $0,5 \mu\text{m}$. [19]

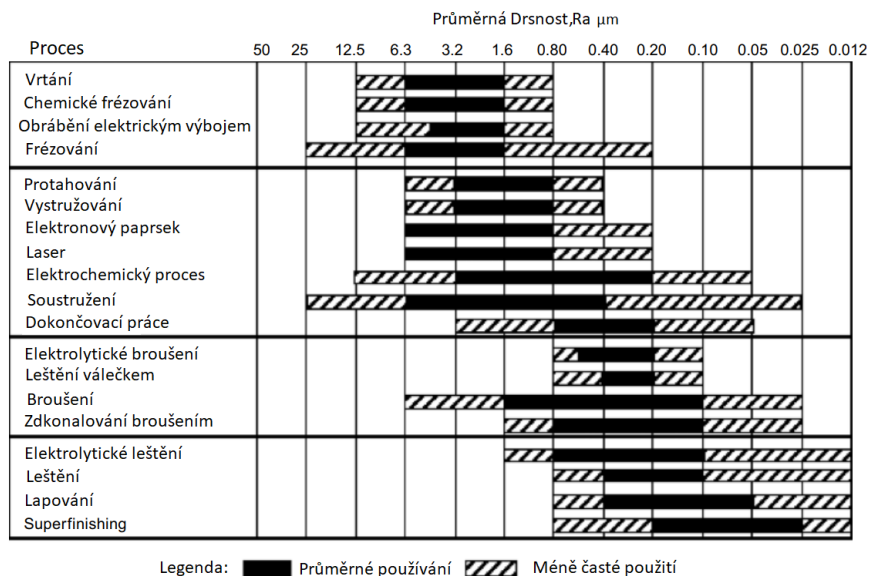
Obr. 18 Příklad značení drsnosti povrchu [autor]



3.5 Závislost obráběcího procesu na drsnosti povrchu

Obrázek č. 19 znázorňuje typické rozsahy průměrných hodnot drsnosti (R_a) dosažitelných při obráběcích procesech tradičních, ale i při procesech netradičních. Vyšších nebo nižších hodnot R_a lze dosáhnout při různých podmínkách obrábění, tj. při hrubovacích, středních nebo dokončovacích operacích. Jak je patrné z obrázku, velmi hladký povrch s nejnižším parametrem R_a $0,01-0,02 \mu\text{m}$ lze dosáhnout při procesu zvaném superfinishing. Naproti tomu u povrchů otvorů při vrtání se R_a pohybuje mezi $1,6$ a $6,3 \mu\text{m}$. V mnoha případech musí obrobek podstoupit vícero kroků nutných k dosažení požadované drsnosti. Například u hřídelí, které podstoupili hrubé dokončovací soustružení a následné hrubé dokončovací broušení se pohybuje R_a kolem $0,5-0,6 \mu\text{m}$. [15]

Obr. 19 Průměrné rozsahy drsnosti povrchu při běžných obráběcích procesech [přeloženo autorem] [15]



4 Parametry obrábění ovlivňující drsnost povrchu

Každý typ řezného nástroje zanechá na obrobeném povrchu jedinečné stopy, obráběcí proces utváří povrch charakterizovaný tvarem, metalurgií a mechanickými vlastnostmi. Tyto aspekty dohromady formují kvalitu obrobeného povrchu a ovlivňují jeho funkční vlastnosti.[15]

Parametry ovlivňující drsnost povrchu se dají rozdělit na čtyři hlavní skupiny (Příloha 15, str. 46). V úvodu jsme se zaměřili na definici řezného nástroje a jeho vlastností, zejména na jeho opotřebení, poloměr špičky, již zmiňované materiály nástrojů a upnutí nástroje. Samotný obrobek má také zásadní vliv na integritu povrchu. Nejvýznamnějším je samotná tvrdost materiálu obrobku, jeho rozměry, struktura, správné upnutí do sklíčidel a předcházející procesy úpravy struktury povrchu polotovaru. Třetí skupinou je řezný proces, do kterého spadá uvedený proces tvorby třísky, plastických deformací, řezných sil a tření vznikajícího při procesu obrábění. Poslední skupinou jsou parametry obrábění, mezi které řadíme zejména geometrii nástroje, typ a kvalitu chladicí nebo mazací kapaliny a později zmiňované řezné podmínky. Dalšími parametry ovlivňující drsnost povrchu, se kterými je potřeba počítat před zahájením procesu obrábění jsou úhel vedlejšího ostří, úhel hlavního ostří, geometrie břitu a ten nejdůležitější již zmiňovaný poloměr špičky.

Vliv na integritu obrobku mají i různé fyzikálních jevy. Například chemické, mechanické, tepelné, termomechanické a mechanotermické. Tyto jevy jsou přítomné v každém procesu obrábění a jejich rozdělení energie bude záviset na zvoleném procesu obrábění. Z těchto fyzikálních jevů dosahuje nejvyšších hodnot energetického vstupu tepelné zatížení. Za projev tepelného zatížení můžeme považovat velice špatnou integritu povrchu, praskliny ve struktuře materiálu a další mechanické jevy. Oproti tomu chemické zatížení disponuje minimálním energetickým zatížením a v průměru zasahuje do struktury materiálu jen zřídka, a to při speciálních chemických reakcích. [15]

Mezi nejběžnější parametry obrábění, které mají významný vliv na kvalitu a rozměry povrchu jsou posuv, řezná rychlost a hloubka řezu. Způsob, jakým tyto parametry ovlivňují drsnost povrchu obráběného materiálu závisí do jisté míry na faktorech, jako jsou například vlastnosti materiálu obrobku, typ řezného nástroje, přítomnost chladicí kapaliny a další. Na téma parametry ovlivňující drsnost povrchu bylo vypracováno mnoho studií, které se pokoušely nalézt optimální parametry, které produkují nejlepší kvalitu povrchu. Proto se zaměříme zejména na tyto tři parametry a pokusíme se experimentálně ověřit zjištěné informace.

Hamdi Laouici a spol. zkoumali vliv řezných parametrů na drsnost povrchu na obráběném materiálu X38CrMOV5-1 (50 HRC) pomocí nástroje z KBN. Pomocí analýzy rozptylu (ANOVA) zkoumali vliv tří již zmíněných parametrů na R-parametry drsnosti povrchu (R_a , R_t , R_z). Každý řezný parametr byl měněn ve třech různých úrovních. Použité řezné rychlosti byly 120, 180 a 240 m.min⁻¹, rychlosti posuvu 0,08, 0,12 a 0,16 mm.ot.⁻¹, zatímco hloubky řezu 0,15, 0,30 a 0,45 mm. Jejich výsledky (Příloha 16, str. 47) ukázaly, že drsnost povrchu se zvyšovala s rostoucí rychlostí posuvu. Všechny tři parametry drsnosti obecně klesaly s rostoucí řeznou rychlostí. Maximální výška profilu R_t vykazovala nejvýraznější změnu ve srovnání s R_a a R_z . [20]

4.1 Řezné podmínky

Důležitým poznatkem při přizpůsobování řezných podmínek pro nástroj zvolený k provedení operace je optimalizační pořadí. Nejprve je nutné si zvolit optimální hloubku řezu, na kterou bude navazovat rychlost posuvu v souladu s doporučenou oblastí použití pro danou VBD. Jako poslední se vybírá hodnota řezné rychlosti v souladu s přiřazením materiálu bříty nebo povlaku VBD k materiálu obrobku a příkonu stroje. [3]

4.1.1 Rychlost posuvu

Jedná se o jeden ze tří hlavních parametrů, které je možno nastavit před započítáním procesu obrábění. Dá se definovat jako strojní posuv, při němž je nástroj veden různými směry vzhledem k obrobku. Pro naše účely je více směřodatný posuv na otáčku, který se udává v milimetrech za jednu otáčku vřetene. Obecně je rychlost posuvu označována v_f a posuv za otáčku je označován f_n . U lehkého hrubování načisto se posuv za otáčku doporučuje volit 0,3-2 mm.ot⁻¹. [3]

4.1.2 Hloubka řezu

Hloubka řezu je definována jako rozdíl mezi obráběnou a obrobenou plochou. Měří se vždy kolmo k ose posuvu a je označována jako a_p . U hrubování načisto se doporučuje volit hloubku řezu 0,5-2 mm. Při vyšších hloubkách řezu vznikají vyšší řezné síly a zvyšuje se celkový odpor obráběného materiálu, proto je nutné volit hloubku řezu v závislosti na dalších řezných podmínkách. [3]

4.1.3 Řezná rychlost

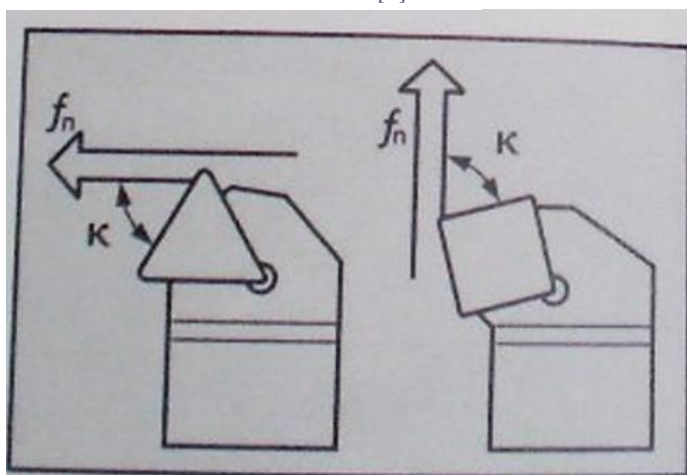
Obecně platí, že řezná rychlost se používá ke konečné optimalizaci řezných podmínek po zvolení vhodné rychlosti posuvu a hloubky řezu. Jedná se o pohyb ve směru podélné drsnosti a vypočítá se z níže uvedeného vzorce (1.1) pomocí Ludolfova čísla, průměru obrobku a otáček vřetene. Jednotky řezné rychlosti jsou $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$. [3]

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

4.2 Úhel nastavení hlavního ostří

Stanovení úhlu hlavního ostří, pod kterým nástroj proniká do materiálu, závisí na vícero faktorech. Tento úhel, označovaný jako κ (Obr. 20) a je formován hlavním ostřím výměnné břitové destičky a směrem posuvu nástroje. Správné nastavení tohoto úhlu má vliv na tvar třísky, intenzitu řezných sil a trvanlivost VBD. Nastavením hlavního ostří na 45° se prodlužuje pracovní délka ostří a současně se zmenšuje tloušťka třísky. Naopak, pokud je úhel nastaven na 90° , dochází ke zkrácení funkční délky ostří a zvýšení tloušťky třísky, což může urychlit proces obrábění, ale naopak snížit životnost VBD. Při menších úhlech se v důsledku většího kontaktu ostří s materiálem zvyšuje řezná síla a může docházet k vibracím, což negativně ovlivňuje kvalitu zpracovávané součásti. Optimální nastavení úhlu hlavního ostří se obvykle pohybuje v rozmezí mezi 60° a 80° . [3]

Obr. 20 Úhel nastavení hlavního ostří [3]



4.3 Úhel nastavení vedlejšího ostří

Úhel nastavení vedlejšího ostří (κ_n) ovlivňuje zejména tření nástroje o plochu obrobku a kvalitu obrobené plochy. Snižováním úhlu vedlejšího ostří dochází k zmenšování stop na obrobeném povrchu, ale zvyšuje se tření. Zvolení menšího úhlu má tedy pozitivní dopad na drsnost povrchu, dochází i k lepšímu odvádění tepla a tím prodlužování trvanlivosti VBD. [21]

4.4 Geometrie břitu

Volba správné geometrie břitu je velice důležitá pro dosažení požadované jakosti povrchu. Výběr správné geometrie břitu je ovlivňován materiálem obrobku, reznými podmínkami, způsobem obrábění a dalšími faktory. Mezi jedny z nejpoužívanějších geometrií břitu patří typ MF, který je vhodný pro obrábění na čisto a použití velkých posuvů. Další je typ QM, který se hodí pro střední obrábění z materiálů zpevněných za studena anebo také typ MR vhodný pro obrábění šedé litiny a hrubování při vysokých posuvech. [3]

4.5 Poloměr špičky

Je označován r_ϵ a je ohraničen tečnami obou břitů. Velikost poloměru špičky zásadně ovlivňuje kvalitu obrobené plochy. Poloměr špičky ovlivňuje jak utváření třísky, tak zatížení břitu. Obecně by měl být zvolen velký poloměr špičky, z důvodu vlivu špičky na utváření třísky, zaručení trvanlivosti břitu při obrábění, a hlavně k zaručení vysoké kvality obrobeného povrchu.[3]

5 Experimentální měření drsnosti povrchu

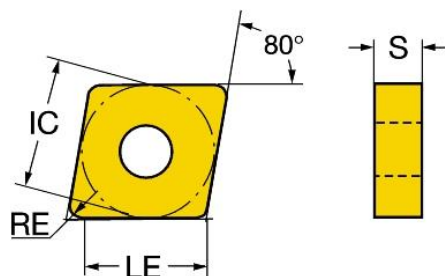
5.1 Představení firmy CSEN s.r.o.

Firma CSEN s.r.o. sídlí na Praze 9 v Dolních Počernicích. Zaměřuje se zejména na konvenční a CNC obrábění, soustružení a frézování v rámci kusové a malosériové výroby. V sortimentu jejich služeb můžeme najít také opravy, servis, repase a montáže strojních celků, výrobních linek, strojů a nástrojů. Dalším zaměřením firmy je zámečnictví, ve kterém nabízí široký sortiment zpracování obecně používaných materiálů pomocí moderních technologií, jako jsou například CNC stroje nebo externí zpracování pomocí laseru. [22]

5.2 Použitá výměnná břitová destička

K měření byla vybrána výměnná břitová destička od společnosti SANDVIK Coromant, typu CNMG 12 04 08-PM 4225 (Příloha 17, str. 47), která se používá především pro střední obrábění a lehké hrubování ocelí. Mezi kritéria výběru byly zařazeny zejména parametry výměnné břitové destičky ovlivňující drsnost povrchu, ekonomické spektrum, životnost destičky a dostupnost destičky. Byla zvolena VBD s vrcholovým úhlem 80° z důvodu nalezení optimálního vyvážení. Při menších úhlech (pod 55°) dochází ke snižující se stabilitě břitu, a naopak při větších úhlech (nad 80°) roste sklon k vibracím. Úhel hřbetu byl ponechán jako vedlejší parametr, a nakonec byla vybrána destička s úhlem 0° . Kompletní přehled tolerancí je uveden na obrázku č. 21 a popsán v tabulce č. 2. Délka řezné hrany byl další z faktorů ovlivňující výběr. Vzhledem k dostupnosti a ceně destiček s řeznou hranou 12 mm byla vybrána právě tato délka. Jak už víme jde zejména o nastavení úhlu hlavního ostří, kde se chceme vyhnout velké řezné ploše a vznikajícímu chvění, proto pro nás byla tato délka dostačující. Poloměr špičky byl zvolen 0,8 mm, jedná se o střední velikost poloměru. Většinou se poloměry špičky pohybují od 0,2 do 2,4 mm. Úhel nastavení hlavního ostří κ byl zvolen 80° a pro měření byla vybrána nová, nepoužitá destička.

Obr. 21 Geometrická data CNMG 12 04 08-PM 4225[23]



Tab. 2 Geometrická data CNMG 12 04 08-PM 4225[23]

Geometrická data		
Pozice	Popis	Hodnota
IC	Průměr vepsané kružnice	12,7 mm
LE	Efektivní délka řezného břitu	12 mm
RE	Poloměr špičky	0,794 mm
S	Tloušťka VBD	4,763 mm
-	Vrcholový úhel	80°
-	Podtřída	201-03 – Kosočtvercová vložka
-	Povlak	CVD TiCN+Al ₂ O ₃ +TiN
-	Utvařec	PM
-	Výrobce	SANDVIK Coromant

Označení PM v názvu VBD jde také jinak definovat jako typ aplikace utvařeče. Utvařec je další z parametrů ovlivňujících drsnost povrchu, používá se k lámání a odvodu třísky po čele nástroje. Pro obrábění oceli existují tři typy aplikace utvařečů: PF, již zmiňované PM a PR (Příloha 18, str. 47). Z přiloženého uvedeného obrázku diagramu můžeme vyčíst, že náš nástroj můžeme používat pro hloubku řezu od přibližně 0,8 mm do 5 mm a posuv za otáčku od přibližně 0,12 mm.ot⁻¹ do přibližně 0,5 mm.ot⁻¹. Parametry obrábění jsou ovšem ovlivněny i jinými parametry VBD, proto je lepší se vždy řídit údaji uvedenými na obalu od výrobce, nebo uvedenými parametry v technickém listu. Doporučené hodnoty řezné rychlosti a posuvu za otáčku pro použitou VBD jsou uvedeny výrobcem na obalu (viz. Příloha 24, str. 50). [24]

5.2.1 Materiál polotovaru

Dalším kritériem byl výběr polotovaru a následné zařazení do skupin podle ISO P.M.K.N.S.H. Jako materiál polotovaru byla vybrána kruhová tyč tažená S235JR (ČSN 41 1375) o průměru 30 mm (Příloha 28, str. 52 a Příloha 23, str. 50). Jedná se o běžnou ocel používanou ve strojírenství, zejména vhodná pro svařování, zámečnické práce nebo ve stavebnictví s mezí kluzu 315 MPa. Kritériem pro výběr právě tohoto materiálu byla jeho dobrá plasticita, houževnatost a pevnost. Na základě těchto vlastností polotovaru byl výběr VBD zúžen na destičky, které mohou obrábět materiály podle ISO P.M.H (viz. Příloha 24, str. 50), jinak řečeno těmito destičkami se doporučuje obrábět oceli, korozivzdorné oceli, oceli s tvrdostí mezi 45-65 HRC a tvrzené litiny s tvrdostí mezi 400-600 HB.

5.2.2 Povlak výměnné břitové destičky

Povlak VBD je vyroben z materiálu $TiCN+Al_2O_3+TiN$. Destička je povlakována pomocí technologie CVD (obloukové odpařování) sloučeninami karbonitridu titanu (TiCN), oxidem hlinitým (Al_2O_3) a nitridem titanu (TiN). VBD vybavené těmito povlaky disponují výhodami jako je extrémně hladký povrch, minimální zbytková pnutí, malé tření, vysoká tvrdost a zvýšená tvrdost za tepla. [25]

5.3 Použitý stroj

Měření probíhalo na CNC soustruhu TL-1 od společnosti HAAS (Obr. 23). Stroj je vybaven vřetenem A2-5 s rychlostí otáčení 1800 ot.min^{-1} . Hlavními výhodami stroje je jeho cenová kategorie, možnost zapojení k přívodu třífázového nebo jednofázového napájení. Vzhledem k systému dialogového programování odpadá potřeba znalosti G-kódu. Maximální rychlost posuvu v obou osách je $11,4 \text{ m.min}^{-1}$ a maximální kroutící moment pro 355 ot.min^{-1} je 146 Nm . [26]

5.4 Použité zařízení k měření drsnosti povrchu

K měření drsnosti povrchu vzorků byl použit drsnoměr od společnosti Mitutoyo, model Surf test – 301 (Obr. 22). Drsnoměr je vybaven displejem zobrazující výsledky měření, vestavěnou tiskárnou s možností vytisknutí naměřených dat, detektorem s diamantovým hrotem pro měření drsnosti povrchu v délkách měřených úseků $0,3\text{-}12,5 \text{ mm}$. Možné délky odběru vzorků jsou dostupné v rozmezí $0,2; 0,8; 2,5$ a 8 mm . Měřitelné parametry drsnosti jsou $R_a, R_q, R_{3z}, R_t, R_y, R_z, R_p, t_p, P_c$.

Obr. 22 Mitutoyo surfest-301



Obr. 23 CNC soustruh TL-1 od společnosti Haas



5.5 Postup měření

První část experimentu se konala 19.02.2024 v sídle firmy CSEN. Po krátké exkurzi v dílnách firmy byl zahájen experiment přípravou polotovaru pro soustružení. Z kruhové tyče materiálu S235 o průměru 30 mm bylo pomocí pásové pily na kov od výrobce PILOUS (viz. Příloha 19, str. 48) nařezáno 6 vzorků pro soustružení a 2 vzorky záložní po délkách jednotlivých vzorků 70 mm. Po zkosení hran a zarovnání nepřesností povrchu po předešlých procesech se přešlo k samotnému soustružení měřených vzorků. Z ekonomických důvodů a z důvodu úspory materiálu bylo na každém vzorku provedeno dvojce měření. Měřicí plocha byla soustružena za daných parametrů procesu při nepřerušovaném chlazení emulzí s 5% obsahem oleje. Poté co byl vzorek uchycen do sklíčidel s přesahem $\pm 32,5$ mm začal proces soustružení na CNC soustruhu. Délka soustružené plochy byla 30 mm. Následně se obdobný proces provedl na opačné straně vzorku, došlo k zaznamenání použitých parametrů procesu a označení polohy kontaktu čelistí sklíčidla na povrchu vzorku, aby se předešlo měření drsnosti povrchu ovlivněného deformačním tlakem sklíčidla při upnutí (Příloha 27, str. 52).

Po obrobení šesti vzorků byly zaznamenány hodnoty parametrů (řezné rychlosti, posuvy za otáčku a hloubky řezu) používané při obrábění a přešlo se k vizuálnímu a hmatovému měření drsnosti povrchu. Na základě výsledných drsností jsme se s kolegou Ondřejem Heřmanem shodli na parametrech obráběcího procesu, které vykazovali nejlepší drsnost povrchu a z nich sestavili hodnoty pro sedmý vzorek a zároveň finální měření na CNC soustruhu. Toto finální měření bylo provedeno zejména z důvodu zhodnocení a porovnání dosažených výsledků měření s ostatními vzorky. Právě u tohoto měření bylo zaznamenáno největší zatížení vřetene a to 46 %. U předchozích měření se pohybovalo zatížení vřetene přibližně mezi 10 až 25 %.

Druhá část experimentu se konala dne 29.2.2024 v laboratořích Technické fakulty České zemědělské univerzity v Praze. Nejprve bylo nutné nastavit parametry měřicího zařízení. Samotné měření probíhalo vysunovacím detektorem s diamantovým hrotem. R-parametry měření byly vybrány z hlediska jejich vypovídající funkce vůči drsnosti povrchu. První byl zvolen parametr R_a jakožto průměrná hodnota profilu drsnosti určená z absolutních hodnot úchylek, která poskytuje obecný popis amplitudy povrchu. Jako druhý byl zvolen parametr R_t , který se velmi často se používá spolu s R_a jako obecný ukazatel, jde o součet maximálního výstupku vrcholu R_p a maximální hloubky prohlubně profilu R_v a jako třetí byl zvolen parametr R_z neboli maximální výška profilu, který se nejčastěji porovnává s parametrem R_t . Měření probíhalo na pevné a stabilní desce se vzorkem uloženým

v přípravku. Vzhledem k upínání vzorků do sklíčidel z obou stran byla tato místa kontaktu náležitě označena a při měření se tato část vzorku neuvažovala. Každý vzorek podstoupil celkem tři měření při snaze eliminování extrémních hodnot a stanovení průměru z těchto tří měření. Délka odběru dat (Cut Off) byla nastavena na hodnotu 0,8 mm při 5 opakování. Snímaná dráha byla 4 mm. Po zahájení měření došlo ke konstantnímu pomalému posuvu diamantového hrotu po povrchu obrobku (vit. Příloha 26, str. 51) a zaznamenávání hodnot profilu měřeného povrchu na vytištěný papír.

5.6 Výsledky měření

Tab. 3 Průměrné hodnoty výsledků měření č.1

Číslo vzorku	R _a průměr [μm]	R _t průměr [μm]	R _z průměr [μm]
1.1	1,76 ± 0,139	13,07 ± 0,801	10,50 ± 1,131
1.2	3,43 ± 0,545	25,60 ± 5,76	18,93 ± 3,474
1.3	3,10 ± 0,286	21,60 ± 2,578	17,40 ± 1,314
1.4	2,18 ± 0,36	15,53 ± 1,328	11,77 ± 1,367

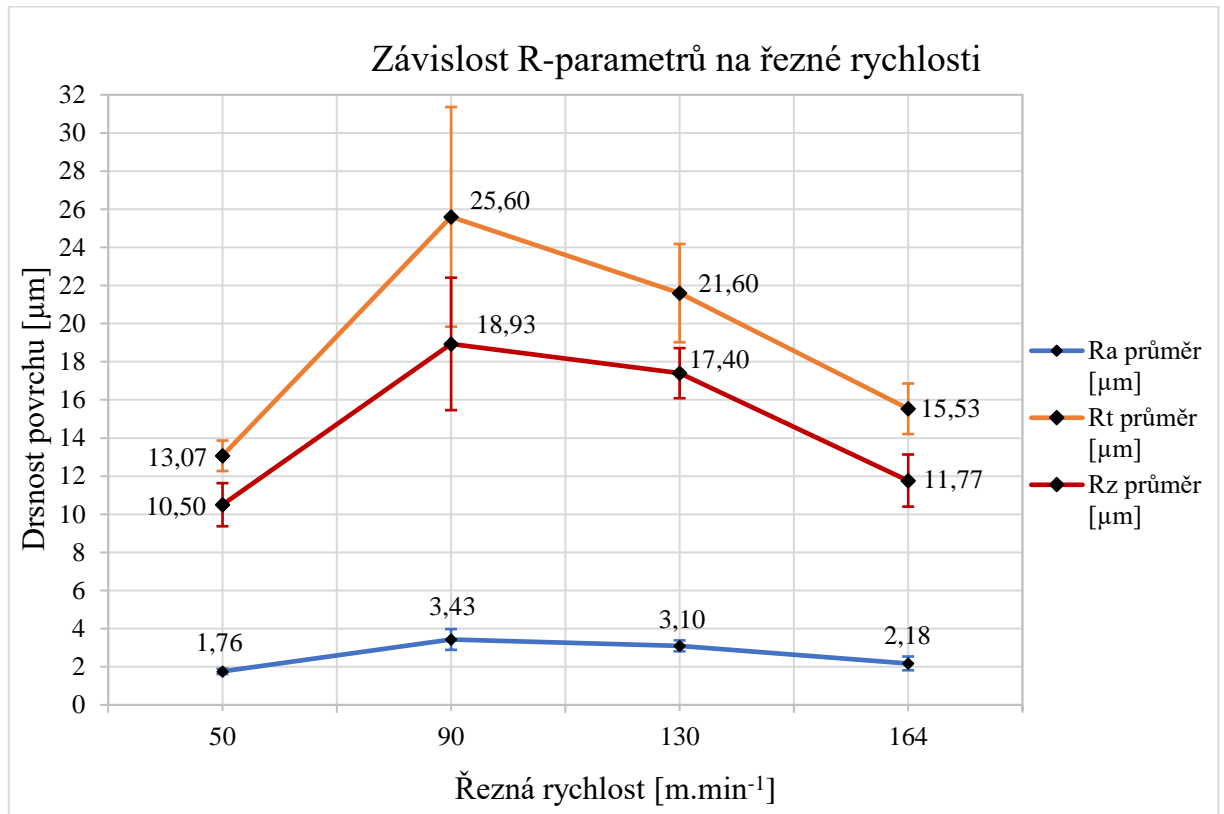
Tab. 4 Průměrné hodnoty výsledků měření č.2

Číslo vzorku	R _a průměr [μm]	R _t průměr [μm]	R _z průměr [μm]
2.1	3,93 ± 0,245	29,63 ± 1,19	20,97 ± 0,634
2.2	2,68 ± 0,134	19,37 ± 1,88	15,13 ± 0,498
2.3	2,50 ± 0,116	16,57 ± 1,115	13,40 ± 0,735
2.4	2,57 ± 0,158	19,37 ± 1,034	15,07 ± 1,352

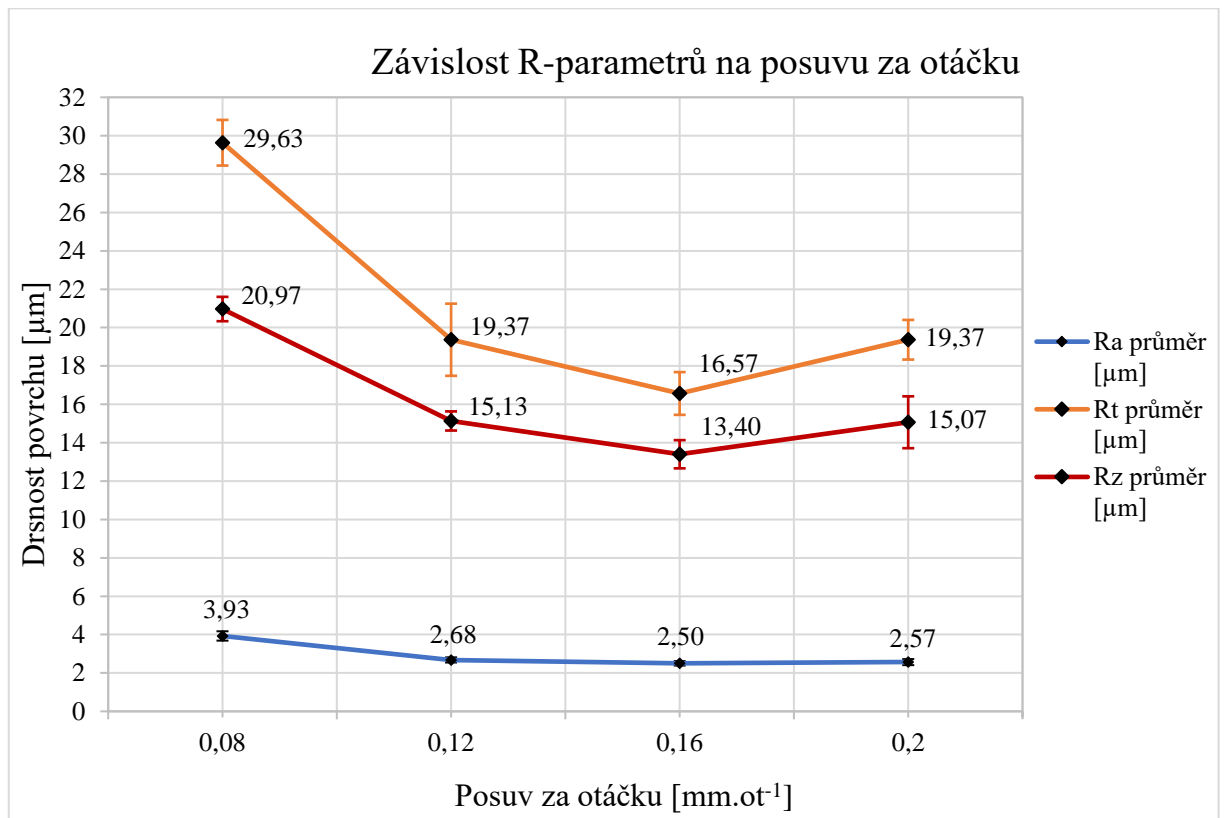
Tab. 5 Průměrné hodnoty výsledků měření č. 3

Číslo vzorku	R _a průměr [μm]	R _t průměr [μm]	R _z průměr [μm]
3.1	4,05 ± 0,113	26,50 ± 0,572	21,50 ± 0,779
3.2	2,84 ± 0,094	19,93 ± 1,126	16,37 ± 0,776
3.3	2,05 ± 0,3	13,40 ± 1,134	11,43 ± 1,276
3.4	2,22 ± 0,026	13,37 ± 0,785	11,23 ± 0,094

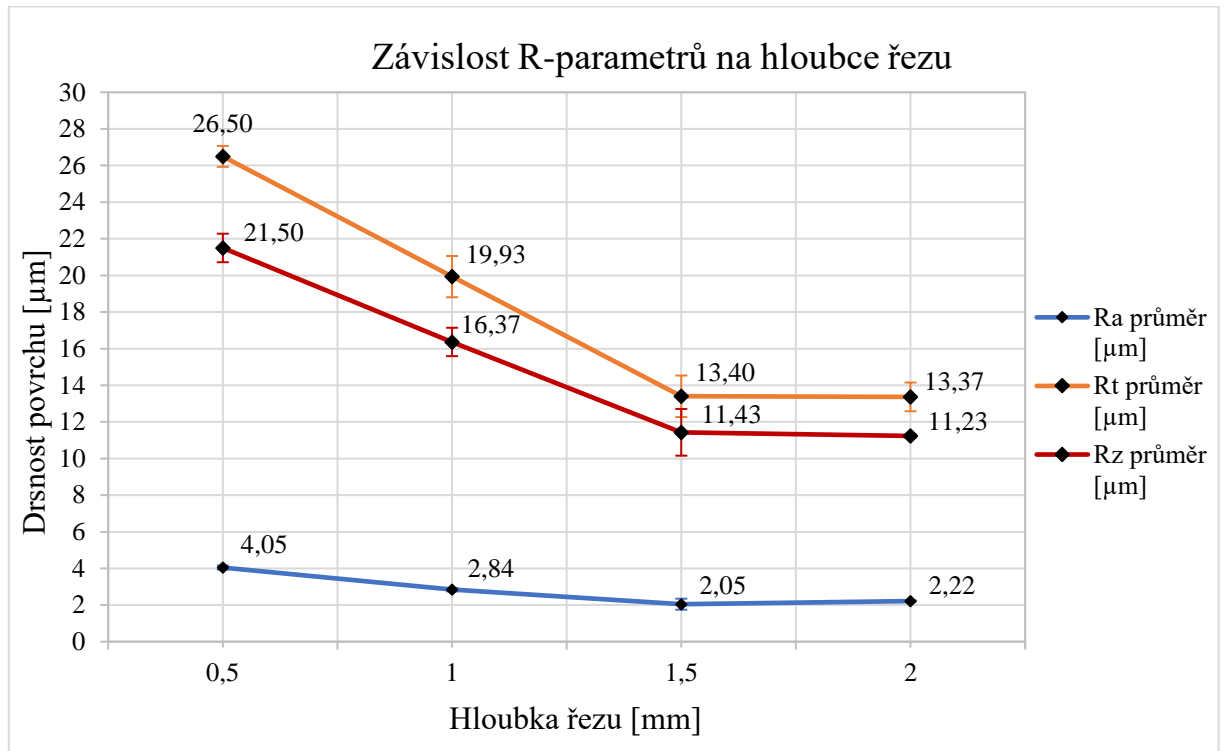
Graf 1 Závislost R-parametrů na řezné rychlosti (měření č.1)



Graf 2 Závislost R-parametrů na posuvu za otáčku (měření č.2)



Graf 3 Závislost R-parametrů na hloubce řezu (měření č.3)



5.7 Zhodnocení výsledků měření

U vzorku č. 1.1 (viz. Graf 1, str. 32) můžeme vidět příklad zaběhnutí břitu, kdy při použití nové VBD dochází k výrazně lepším výsledkům z důvodu vynikající ostrosti břitu. Tento výsledek mohl být také ovlivněn zvolenou řeznou rychlostí. Při návrhu řezných podmínek bylo vypočítáno, že optimální řezná rychlost pro průměr polotovaru 30 mm a rychlost otáčení vřetene 547 ot.min⁻¹ je 50 m.min⁻¹. Řezné rychlosti byly dále automaticky přepočítávány strojem. Vyšší řezná rychlost u ostatních vzorků byla zvolena z důvodu demonstrace závislosti řezné rychlosti na R-parametrech. U vzorku č. 1.2 můžeme vidět rapidní nárůst všech R-parametrů, což je následkem zaběhnutí břitu. R-parametry u zbylých dvou vzorků klesají spolu s rostoucí řeznou rychlostí, jako tomu bylo u studie H. Laouiciho a spol. Tento výsledek se dá také vysvětlit doporučenými parametry od výrobce, který udává rozsah řezné rychlosti pro obrábění ocelí 250-305 m.min⁻¹. Na základě těchto zjištění bych při opakovaném měření zvolil větší průměr polotovaru přibližně od 100 mm výše, při kterém je optimální řezná rychlost 171,8 pro otáčky vřetene 547 ot.min⁻¹ a následně zvedaly řeznou rychlost u jednotlivých vzorků na intervaly 230, 270, 310 k dosažení doporučené řezné rychlosti od výrobce VBD nebo zvýšil samotné otáčky vřetene pro stejný průměr vzorku.

Vzhledem k ekonomické náročnosti první varianty by bylo vhodné spíše zvolit optimální otáčky vřetene.

U měření č. 2 (viz. Graf 2, str. 32) byly zjištěny nejlepší výsledky u vzorku č. 2.3. Při příliš pomalém posuvu $0,08 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$ docházelo ke špatnému zarovnávání vrcholků, což můžeme vidět na parametru R_t . Na rozdíl od studie Hamdi Laouici a spol docházelo tedy k postupnému zlepšování výsledků spolu s rostoucí rychlostí posuvu. Výjimkou je vzorek č. 2.4, kde můžeme pozorovat vyšší hodnoty R-parametrů. Naměřené výsledky se dají objasnit dvěma způsoby. Vzhledem k správně zvoleným rozestupům posuvu za otáčku mezi $0,08$ - $0,25$, jak udává výrobce je jedna z možností volba příliš vysoké řezné rychlosti. To by však odporovalo doporučeným řezným rychlostem od výrobce VBD, proto by bylo vhodné zvolit jiný typ VBD s jinými parametry, zejména větším poloměrem špičky pro lepší zarovnávání povrchu.

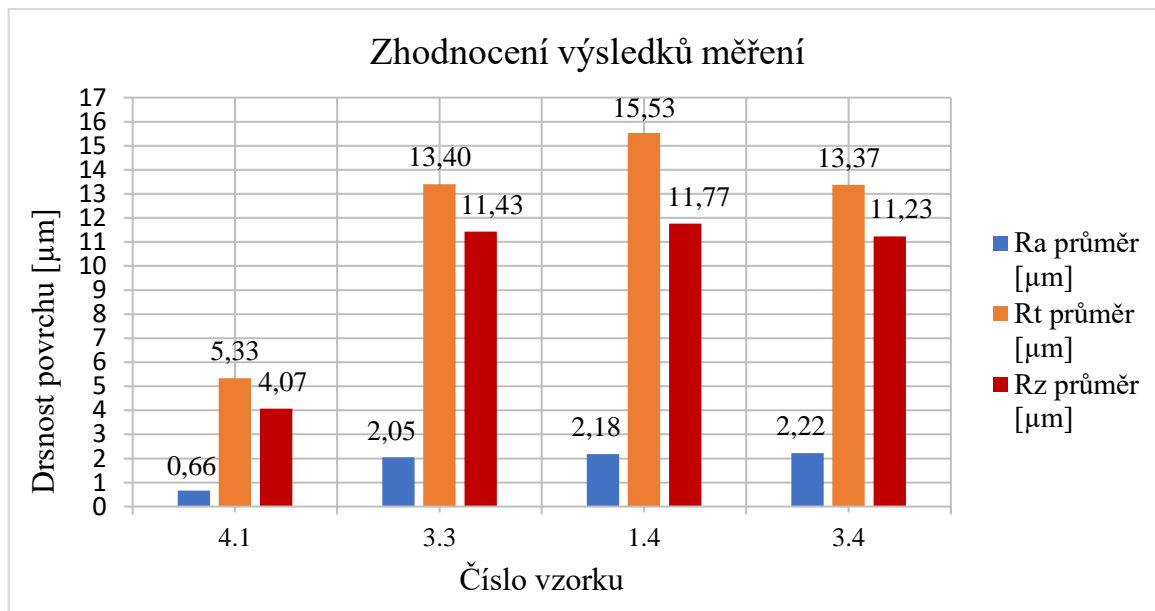
Měření č. 3 (viz. Graf č. 3, str. 33) proběhlo také úspěšně. V našem případě u použití VBD pro lehké hrubování je doporučená hloubka řezu $0,5$ - 2 mm . Finální R-parametry však ovlivňuje i volba ostatních řezných podmínek. Vzhledem k řezné rychlosti a posuvu za otáčku jsou hloubky řezu $0,5$ a 1 příliš malé a pro dosažení lepšího povrchu by bylo potřeba zvětšit tloušťku odebíraného materiálu nebo zvýšit řezné rychlosti na hodnoty doporučené výrobcem VBD a ověřené výpočtem. Od hloubky řezu $1,5 \text{ mm}$ jsou výsledky R-parametrů poměrně konstantní. Pro udržení těchto výsledků by bylo potřeba při zvyšování hloubky řezu snižovat posuv za otáčku a v závislosti na požadované drsnosti povrchu snižovat i řeznou rychlost. Hodnoty povrchu obrobku jsou také ovlivněny poloměrem špičky bříty, proto by bylo vhodné se zvětšováním hloubky řezu volit VBD s větším poloměrem špičky.

Měření č. 4 proběhlo po vizuální a hmatové zkoušce předchozích vzorků. Bylo rozhodnuto, že nejlepších výsledků bylo dosaženo při řezné rychlosti $164 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, posuvu za otáčku $0,16$ a hloubce řezu 2 mm . Vizuální a hmatová zkouška byla provedena úspěšně a jediným pochybením bylo zvolení hloubky řezu 2 mm místo $1,5 \text{ mm}$. U těchto vzorků jsou však výsledky natolik totožné, že při takto miniaturních odchylkách je rozdíl mezi nimi téměř nemožné rozeznat. Pro závěrečné zhodnocení výsledků byl zhotoven graf č.4 na str. 35, kde můžeme pozorovat vzorek č. 4.1, u kterého se povedlo dosáhnout vynikajících výsledků z pohledu drsnosti povrchu. Při porovnání s předešlými výsledky si můžeme všimnout, že vzorek č. 3.4 s hloubkou řezu 2 mm a vzorek č. 1.4 s řeznou rychlostí $164 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ dosáhly rovněž přijatelných výsledků R_a , což potvrzuje výsledky hmatové a zrakové zkoušky jako objektivní a správně provedené.

Tab. 6 Průměrné hodnoty výsledků měření č. 4

Číslo vzorku	R _a průměr [μm]	R _t průměr [μm]	R _z průměr [μm]
4.1	0,66 ± 0,008	5,33 ± 0,403	4,07 ± 0,262

Graf 4 Zhodnocení výsledků měření



Za výsledek experimentu považuji ověření, že při volbě rezných podmínek záleží na vlastnostech stroje zejména pak na otáčkách vřetene, chlazení, výkonu a přesnosti. Dále na zvoleném rezném nástroji a jeho geometrii, jeho otupení, materiálu bříty, způsobu jeho upnutí a na požadovaných vlastnostech obrobku. Z hlediska rezných podmínek měřených při experimentu můžeme konstatovat, že je důležité znát zejména požadované vlastnosti obrobku, od kterých se volí způsob obrábění, samotné rezné podmínky, typ rezného nástroje a další parametry ovlivňující strukturu povrchu. Pokud jsou k dispozici informace o volbě rezných podmínek od výrobce rezného nástroje, je vhodné je brát v potaz a používat je při stanovení rezných podmínek procesu k dosažení požadovaných vlastností obrobku.

6 Závěr

Cílem mé bakalářské práce bylo shromáždit, popsat a následně experimentálně změřit údaje o parametrech, které ovlivňují drsnost povrchu při obrábění. V úvodu je stručně popsán proces obrábění, jeho terminologie a vlastnosti řezného nástroje. Zjistili jsme, že volba řezného nástroje hraje zásadní roli i u tvorby nárůstku, vzniku řezných sil při obrábění a tvorbě třísky. Jako poslední jsme si u řezného nástroje rozdělili používané řezné materiály výměnných břitových destiček a jejich vlastnosti. Pro charakteristiku daného problému bylo zapotřebí definovat integritu povrchu, s ní související parametry drsnosti povrchu a vybrané metody měření drsnosti povrchu. Na závěr teoretické části bakalářské práce jsme definovali hlavní parametry obrábění ovlivňující drsnost povrchu. V druhé části bakalářské práce jsem uvedl firmu CSEN s.r.o., popsal postup experimentálního měření drsnosti povrchu, použitou výměnou břitovou destičku, použitý CNC soustruh a samotný postup měření na drsnoměru. Na závěr jsem shrnul výsledky měření a zhodnotil je. V průběhu celé bakalářské práce jsem shromažďoval zjištěné a naměřené poznatky o ovlivňování drsnosti povrchu parametry obrábění. Následující poznatky a výsledky experimentálního měření považuji za závěr řešené problematiky:

- Zjistili jsme, že u geometrie břitu nastavení úhlu čela a úhlu hřbetu má zásadní dopad na parametry drsnosti povrchu zejména kladný úhel hřbetu, který pomáhá snížit řeznou sílu, a tím i požadavky řezných podmínek. Úhel čela naopak pomáhá k snadnému odvodu třísky. Síly působící při řezném procesu vyvolávají plastické deformace obráběného materiálu, které se při překročení mezní hodnoty smyku oddělují a formují do podoby segmentů třísky, která se dále dělí na různé druhy. Při tvorbě nárůstku dochází k tvorbě stabilní a nestabilní části, z nichž právě ta nestabilní část má tendenci se zachycovat na obrobené ploše a tím ovlivňuje drsnost povrchu obrobku. Zjistili jsme, že nejvhodnějšími materiály řezných nástrojů jsou keramiky, cermety, syntetické diamanty a povlakované karbidy. Ze všech parametrů drsnosti má nejvíce vypovídající hodnotu parametr R_a , R_t a R_z . Rozdělili jsme parametry ovlivňující drsnost povrchu na čtyři kategorie: řezný proces, řezný nástroj, obrobek a parametry obrábění. Do řezných podmínek ovlivňující drsnost povrchu řadíme především řeznou rychlost, rychlost posuvu a hloubku řezu. Mezi parametry, které nejvíce ovlivňují drsnost povrchu zařazujeme úhel nastavení hlavního ostří, poloměr špičky, úhel čela nástroje, typ utvařeče, geometrie břitu a již zmiňované řezné podmínky.

- U experimentálního měření drsnosti povrchu jsme zjistili, jak moc velký vliv má volba správného řezného nástroje a řezných podmínek vůči požadavkům na obrobenou plochu. Ověřili jsme si zjištěné poznatky z teoretické části a dále zjistili, jak velký význam hrají uvedené parametry od výrobce.

7 Seznam použitých zdrojů

- [1] MAGALY, Adam. Jak šel čas s CNC obráběním. *Svět průmyslu* [online]. Smart connections, 2022 [cit. 2024-01-23]. Dostupné z: <https://svetprumyslu.cz/jak-sel-cas-s-cnc-obrabenim/>
- [2] 10 dat z historie obrábění na CNC strojích. Kam sahá historie CNC obrábění? *Magazín o průmyslové automatizaci a robotice* [online]. FactoryAutomation.cz, 2016 [cit. 2024-01-23]. Dostupné z: <https://factoryautomation.cz/10-dat-z-historie-obrabeni-na-cnc-strojich-kam-saha-historie-cnc-obrabeni/>
- [3] *Průručka obrábění: kniha pro praktiky*. Praha: Sandvik Coromant, 1997. ISBN 91-972299-4-6.
- [4] HUMÁR, Anton. *TECHNOLOGIE I, TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ – 1. část* [Online]. 2003 [cit. 2024-03-25]. Dostupné z: https://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/studijni-opory/TI_TO-1cast.pdf
- [5] BRYCHTA, Josef. *Nové směry v progresivním obrábění* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2008 [cit. 2024-01-23]. ISBN 978-80-248-1505-3. Dostupné z: <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/NSPO/texty.pdf>
- [6] *Skripta Technologie II, 1. díl* [online]. [cit. 2024-03-25]. Dostupné z: https://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/skripta_Technologie_II_1dil.pdf
- [7] BISWAS, Shishir Kr. a Sourav MAJUMDAR. *MACHINING PRINCIPLES AND MACHINE TOOLS*. 1. Indie: Jis University, 2019.
- [8] GRZESIK, Wit. *Advanced machining processes of metallic materials: theory, modelling and applications*. Amsterdam: Elsevier, 2008. ISBN 978-0-08-044534-2.
- [9] ŠVEJDA, Karel. *Úvod do strojnictví a elektrotechniky: celostátní vysokoškolská učebnice*. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1967.
- [10] PŘIKRYL, Zdeněk a Rosa MUSÍLKOVÁ. *Teorie obrábění: učebnice pro vysoké školy*. 3., opr. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1982.
- [11] HUMÁR, Anton. *Materiály pro řezné nástroje*. Praha: MM publishing, 2008. ISBN 978-80-254-2250-2.
- [12] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. Brno: CERM, c1999. ISBN 80-720-4130-4.

- [13] KOCMAN, Karel a Jaroslav PROKOP. *Technologie obrábění*. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005. ISBN 80-214-3068-0.
- [14] PÍŠKA, Miroslav. Řezné materiály současnosti. *MM - Průmyslové spektrum* [online]. 2018 [cit. 2024-02-07]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/rezne-materialy-soucasnosti>
- [15] *Surface integrity in machining*. Editor J. Paulo DAVIM. London: Springer, 2010. ISBN 978-1-84882-873-5.
- [16] *Měření struktury povrchu* [online]. 2019 [cit. 2024-01-23]. Dostupné z: <https://www.accretech.eu/cs/mereni-struktury-povrchu/#oberflaechenrauheit>
- [17] MANN, Leoš. *Geometrické specifikace produktu (GPS): Textura povrchu: Profil - Část 2: Termíny, definice a parametry textury povrchu*. Česká agentura pro standardizaci, 2023.
- [18] HOMMEL-ETAMIC. *Drsnost povrchu* [online]. [cit. 2024-02-15]. Dostupné z: <https://www.jenoptik.cz/files/HOMMEL-CS-plakat-drsnost-uchylky-tvaru.pdf>
- [19] MANN, Leoš. *Geometrické specifikace produktu (GPS): Textura povrchu: Profil - Část 1: Indikace textury povrchu*. Česká agentura pro standardizaci, 2023.
- [20] HASHMI, M.S.J. a Imtiaz A. CHOUDHURY, ed. *COMPREHENSIVE MATERIALS FINISHING Volume 1: Finish Machining and Net-Shape Forming* [online]. Canada: Elsevier, 2017 [cit. 2024-02-19]. ISBN 978-0-12-803249-7.
- [21] *Geometrie břítu obecně* [online]. 2011 [cit. 2024-02-19]. Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/geometrie-britu-obecne/#more-2827>
- [22] CSEN s.r.o. [online]. [cit. 2024-03-03]. Dostupné z: <https://www.csen.cz/>
- [23] CIMSOURCE GMBH. *Tools United* [online]. [cit. 2024-02-21]. Dostupné z: <https://www.toolsunited.com/App/EN/Article/ArticleDetailsPage/191125115744054?SearchMode=toolsUnited&classificationType=ISO>
- [24] SANDVIK COROMANT. *Volba vhodných soustružnických břitových destiček* [online]. [cit. 2024-02-21]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/general-turning/how-to-choose-correct-turning-insert>
- [25] *TECHNOLOGIE POVLAKOVÁNÍ* [online]. [cit. 2024-02-21]. Dostupné z: <https://www.cemecon.cz/technologie-povlakovani>

[26] HAAS. *Nástrojářské soustruhy Haas řady TL-1* [online]. [cit. 2024-02-22]. Dostupné z: <https://www.haascnc.com/cs/machines/lathes/toolroom-lathe/models/tl-1.html>

7.1 Přílohy

Odkazovaný seznam příloh

Příloha 1	Výsledky měření č.1	41
Příloha 2	Výsledky měření č.2	41
Příloha 3	Výsledky měření č.3	42
Příloha 4	Výsledky měření č.4	42
Příloha 5	Plochy na obrobku v procesu obrábění [4]	43
Příloha 6	Vybrané nástrojové materiály a jejich vlastnosti [10]	43
Příloha 7	Vliv teploty na tvrdost [HV10] řezných materiálů [10]	43
Příloha 8	Rozdělení tvaru třísek podle normy ISO 3685:1993 [přeloženo autorem] [7]	44
Příloha 9	Příklad profilu drsnosti povrchu [14]	44
Příloha 10	Profilometr pro měření drsnosti povrchu společnosti Hommelwerke [14]	44
Příloha 11	Definice parametrů amplitudy Rp, Rt a Rv [14]	45
Příloha 12	Linie průměrných hodnot Ra v délce l [14]	45
Příloha 13	Střední hodnota rozteče profilu [17]	45
Příloha 14	Střední kvadratická hodnota stoupání profilu [17]	46
Příloha 15	Parametry ovlivňující drsnost povrchu [autor]	46
Příloha 16	Výsledek studie H. Laouiciho a spol, vliv řezné rychlosti na drsnost povrchu při různých posuvech [přeloženo autorem] [19]	47
Příloha 17	Geometrie břitové destičky CNMG 12 04 08-PM 4225 s hodnotami utvařeče třísky [23]	47
Příloha 18	Aplikační diagram použití utvařeče u typu geometrie PF, PM a PR [23]	47
Příloha 19	Řezání vzorků na pásové pile	48
Příloha 20	Obrábění měřených vzorků	48
Příloha 21	Vytištěné parametry povrchu vzorku č. 4.1	49
Příloha 22	Detektor s diamantovým hrotem	49
Příloha 23	Měřené vzorky před procesem soustružení	50
Příloha 24	Doporučené řezné rychlosti a otáčky za posuv od výrobce Snadvik Coromant	50
Příloha 25	Držák soustružnického nože s VBD a soustavou dopravy chladicí kapaliny	51
Příloha 26	Detektor použitého drsnoměru	51
Příloha 27	Upnutí vzorku do tříčelistového sklíčidla	52
Příloha 28	Polotovar před procesem soustružení	52
Příloha 29	Fotografie použité povlakované VBD upnuté na soustružnickém noži	53

Příloha 1 Výsledky měření č.1

Číslo vzorku	Řezná rychlost [m.min ⁻¹]	Posuv za otáčku [mm.ot ⁻¹]	Hloubka řezu [mm]	R _a [μm]	R _t [μm]	R _z [μm]
1.1	50	0,12	1	1,92	14,2	12,1
				1,58	12,5	9,7
				1,77	12,5	9,7
1.2	90	0,12	1	3,58	30,4	18,7
				2,7	17,5	14,8
				4,01	28,9	23,3
1.3	130	0,12	1	2,82	20,3	16,9
				2,98	19,3	16,1
				3,49	25,2	19,2
1.4	164	0,12	1	2,67	16,8	13,7
				1,82	16,1	10,8
				2,04	13,7	10,8

Příloha 2 Výsledky měření č.2

Číslo vzorku	Řezná rychlost [m.min ⁻¹]	Posuv za otáčku [mm.ot ⁻¹]	Hloubka řezu [mm]	R _a [μm]	R _t [μm]	R _z [μm]
2.1	130	0,08	1	4,18	30,8	21,6
				4,01	28	21,2
				3,6	30,1	20,1
2.2	130	0,12	1	2,78	17	15
				2,77	21,6	15,8
				2,49	19,5	14,6
2.3	130	0,16	1	2,6	17,8	14,3
				2,34	15,1	12,5
				2,57	16,8	13,4
2.4	130	0,2	1	2,63	18	14,9
				2,35	19,6	13,5
				2,72	20,5	16,8

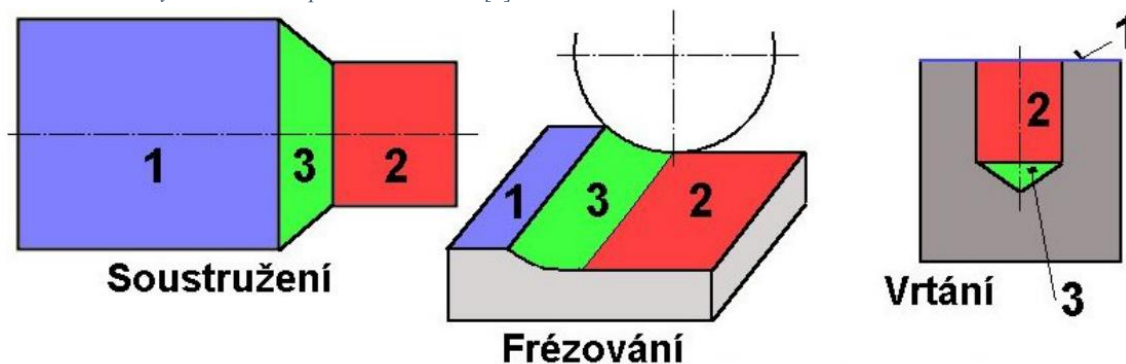
Příloha 3 Výsledky měření č.3

Číslo vzorku	Řezná rychlost [m.min ⁻¹]	Posuv za otáčku [mm.ot ⁻¹]	Hloubka řezu [mm]	R _a [μm]	R _t [μm]	R _z [μm]
3.1	130	0,12	0,5	4,01	26,8	20,9
				3,93	27	21
				4,2	25,7	22,6
3.2	130	0,12	1	2,95	18,9	17,3
				2,85	21,5	16,4
				2,72	19,4	15,4
3.3	130	0,12	1,5	1,85	12,5	11,2
				1,82	12,7	10
				2,47	15	13,1
3.4	130	0,12	2	2,26	13,2	11,3
				2,21	14,4	11,3
				2,2	12,5	11,1

Příloha 4 Výsledky měření č.4

Číslo vzorku	Řezná rychlost [m.min ⁻¹]	Posuv za otáčku [mm.ot ⁻¹]	Hloubka řezu [mm]	R _a [μm]	R _t [μm]	R _z [μm]
4.1	164	0,16	2	0,66	5,1	4,2
				0,65	5	3,7
				0,67	5,9	4,3

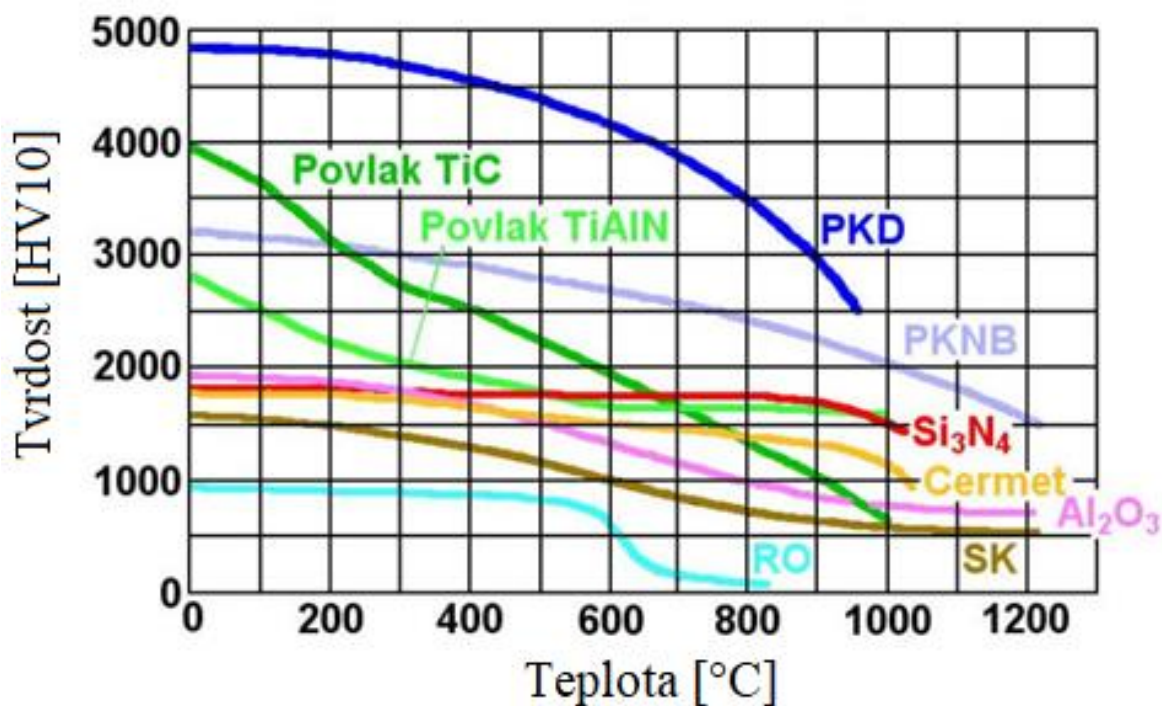
Příloha 5 Plochy na obrobku v procesu obrábění [4]




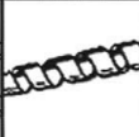

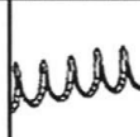
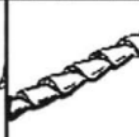

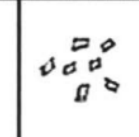

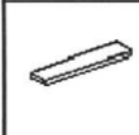
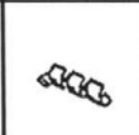

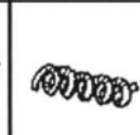



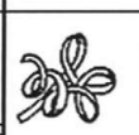
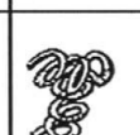

Příloha 6 Vybrané nástrojové materiály a jejich vlastnosti [10]

Vlastnost	Nástrojový materiál					
	Slinutý karbid WC+Co	Cermet Mo ₂ C+Ti(C,N)+Ni	Al ₂ O ₃ + ZrO ₂	Al ₂ O ₃ + TiC	Si ₃ N ₄ + přísky	
Měrná hmotnost [g.cm ⁻³]	12,0 ÷ 15,1	5,6 ÷ 7,0	3,8 ÷ 4,0	4,2 ÷ 4,3	3,2 ÷ 3,4	
Pevnost v ohybu [MPa]	1000 ÷ 2400	1150 ÷ 1800	600 ÷ 800	600 ÷ 900	600 ÷ 950	
Tvrdość	[HV]	1900	2000	1600 ÷ 2200	1000 ÷ 2400	1800 ÷ 2000
	[HRA]	90 ÷ 92	91 ÷ 93	91 ÷ 94	93 ÷ 95	86 ÷ 95
Modul pružnosti v tahu [GPa]	520 ÷ 660	500	340 ÷ 400	370 ÷ 420	300 ÷ 380	
Souč. délkové roztažnosti [10 ⁻⁶ K ⁻¹]	4,5 ÷ 7,0	7,0 ÷ 7,5	7,0 ÷ 8,5	1,5 ÷ 3,5	-	
Měrná tepelná vodivost [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	80	30	20 ÷ 30	20 ÷ 25	30 ÷ 50	
Lomová houževnatost [MPa.m ^{1/2}]	10 ÷ 17	10	4 ÷ 6	4,2 ÷ 4,5	5 ÷ 7	

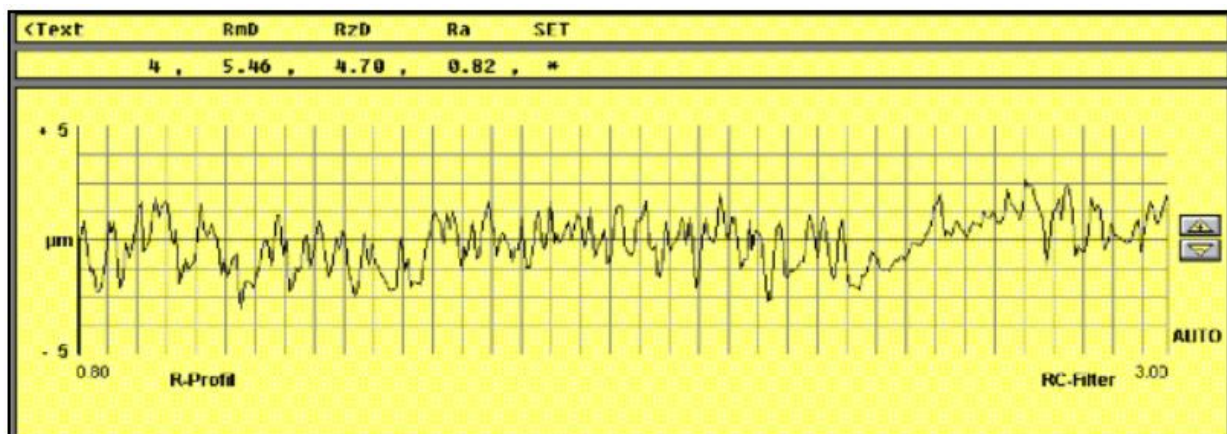
Příloha 7 Vliv teploty na tvrdost [HV10] řezných materiálů [10]



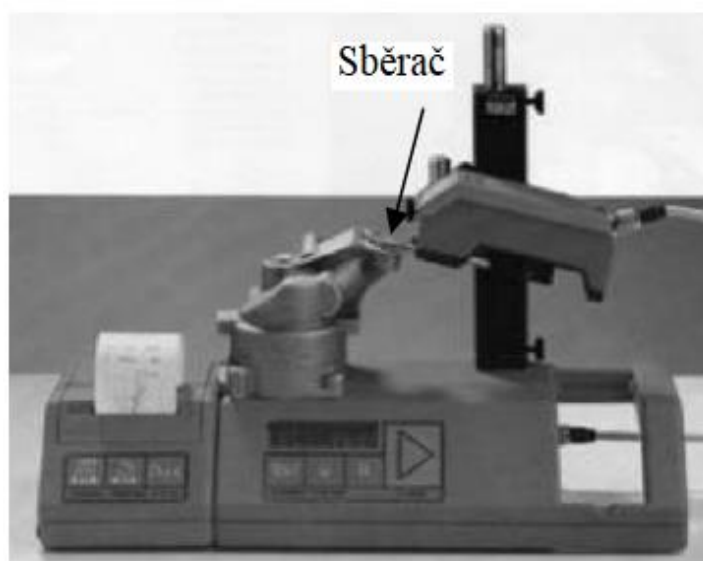
Příloha 8 Rozdělení tvaru třísek podle normy ISO 3685:1993 [přeloženo autorem] [7]

1. Stužkové třísky	2. Vlnuté třísky	3. Spirálové třísky	4. Šroubovitě třísky	5. Kuželově šroubovitě třísky	6. Obloukovité třísky	7. Elementární třísky	8. Jehlové třísky
							
1.1 Dlouhé	2.1 Dlouhé	3.1 Ploché	4.1 Dlouhé	5.1 Dlouhé	6.1 Propojené		
							
1.2 Krátké	2.2 Krátké	3.2 Kuželové	4.2 Krátké	5.2 Krátké	6.2 Volné		
							
1.3 Zavinuté	2.3 Zavinuté		4.3 Zavinuté	5.3 Zavinuté			

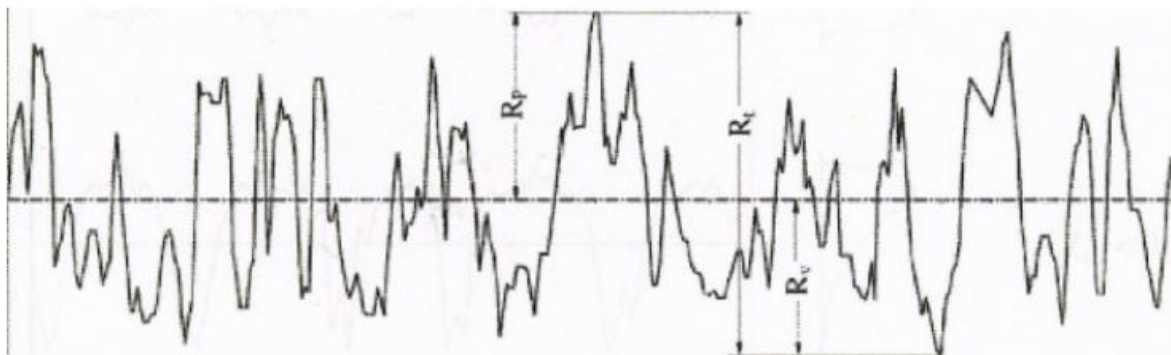
Příloha 9 Příklad profilu drsnosti povrchu [14]



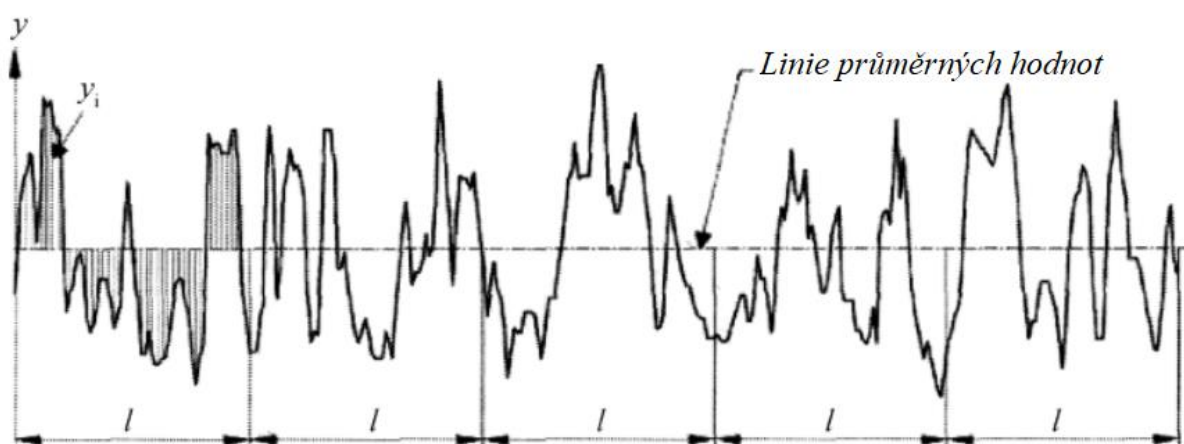
Příloha 10 Profilometr pro měření drsnosti povrchu společnosti Hommelwerke [14]



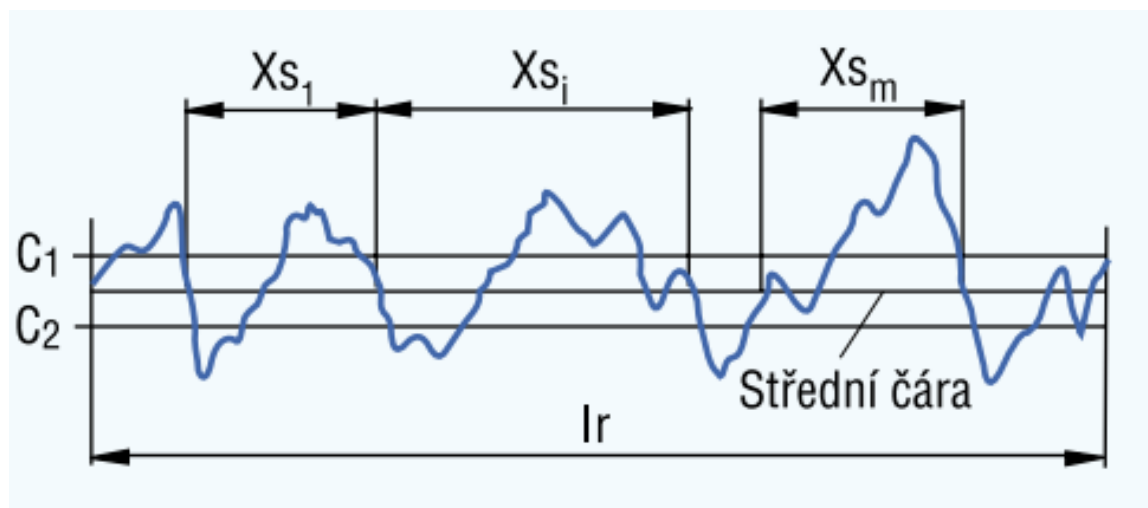
Příloha 11 Definice parametrů amplitudy R_p , R_t a R_v [14]



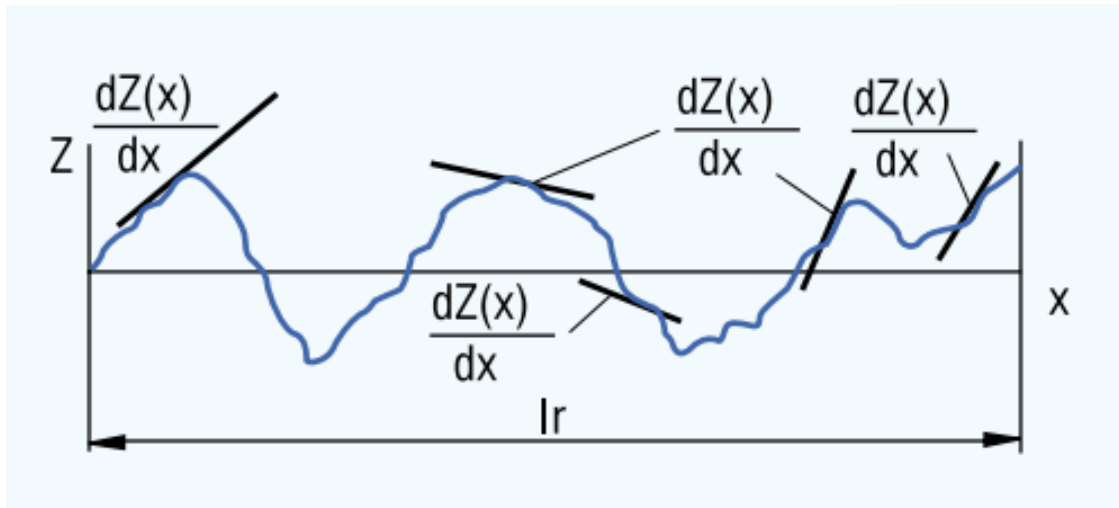
Příloha 12 Linie průměrných hodnot R_a v délce l [14]



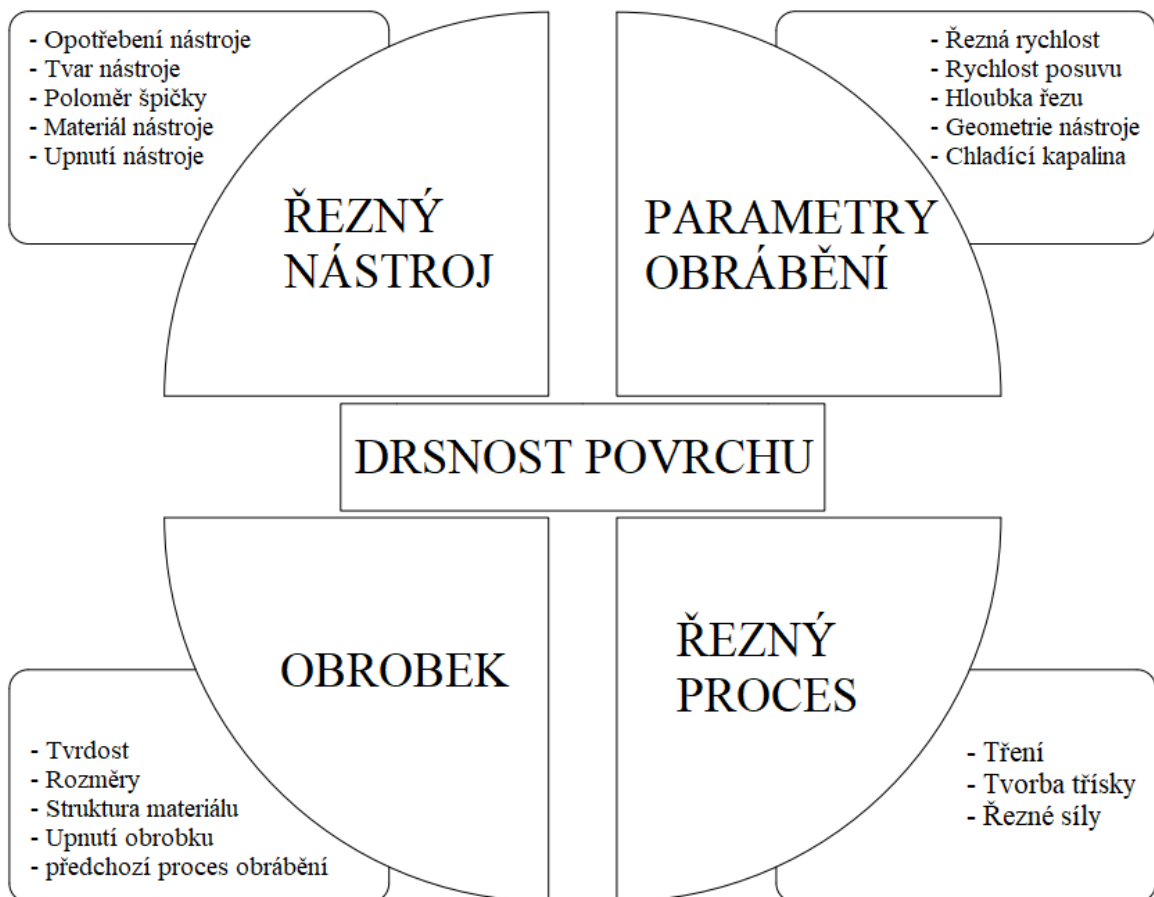
Příloha 13 Střední hodnota rozteče profilu [17]

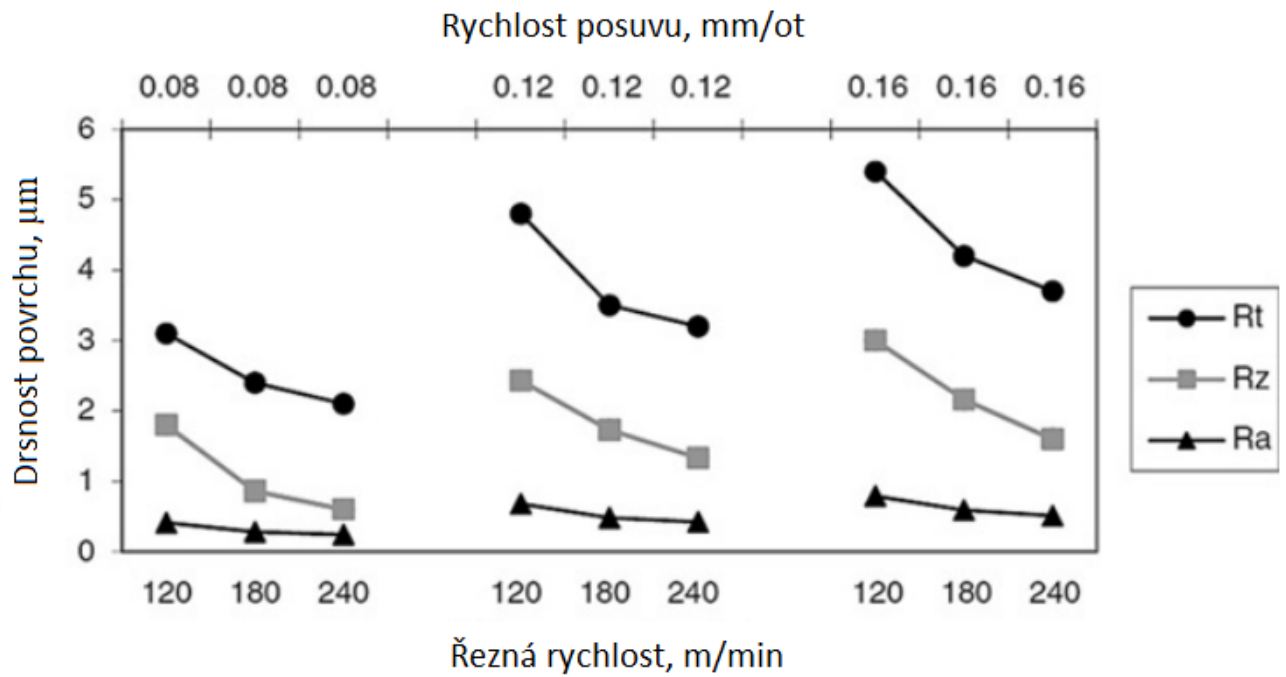


Příloha 14 Střední kvadratická hodnota stoupání profilu [17]

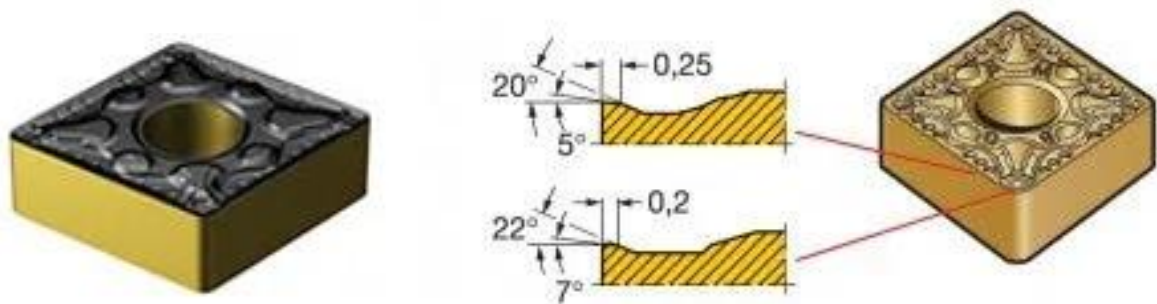


Příloha 15 Parametry ovlivňující drsnost povrchu [autor]

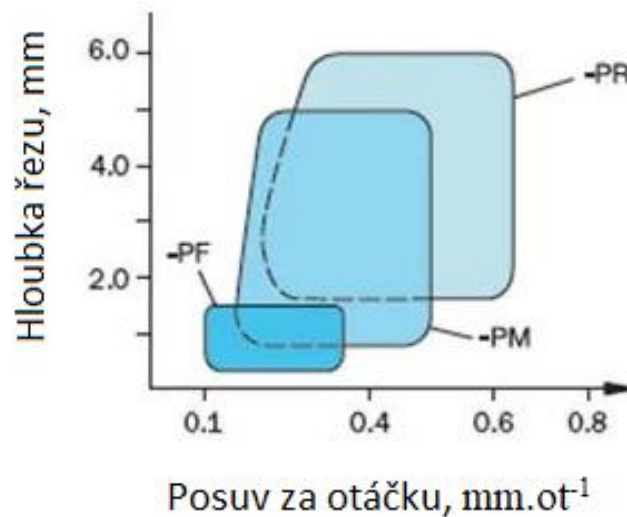




Příloha 17 Geometrie břitové destičky CNMG 12 04 08-PM 4225 s hodnotami utvařeče třísky [23]



Příloha 18 Aplikační diagram použití utvařeče u typu geometrie PF, PM a PR [23]



Příloha 19 Řezání vzorků na pásové pile



Příloha 20 Obrábění měřených vzorků



Příloha 21 Vytisknuté parametry povrchu vzorku č. 4.1



Příloha 22 Detektor s diamantovým hrotem



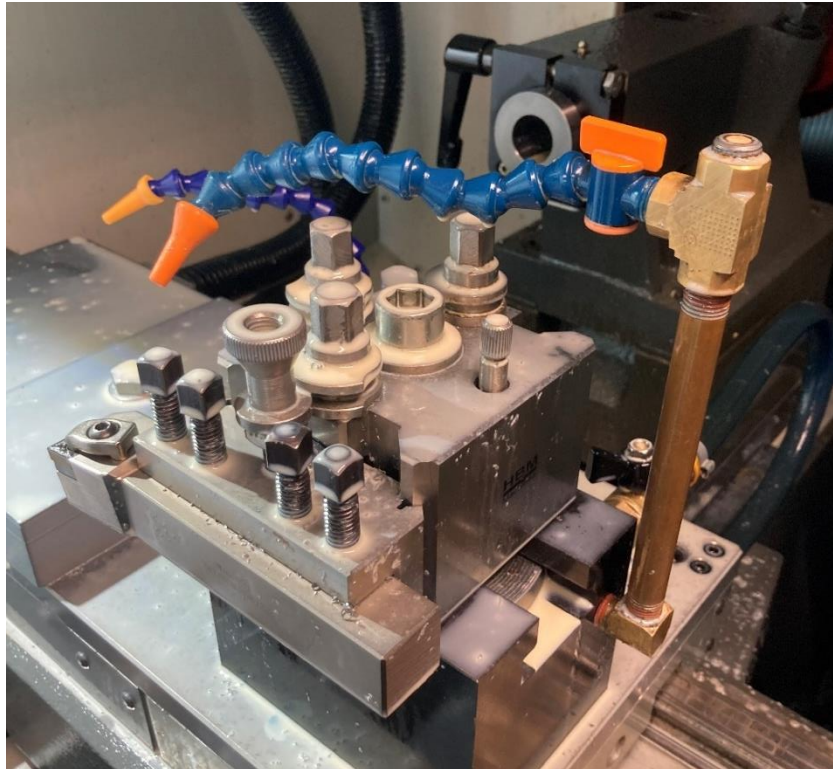
Příloha 23 Měřené vzorky před procesem soustružení



Příloha 24 Doporučené řezné rychlosti a otáčky za posuv od výrobce Sandvik Coromant



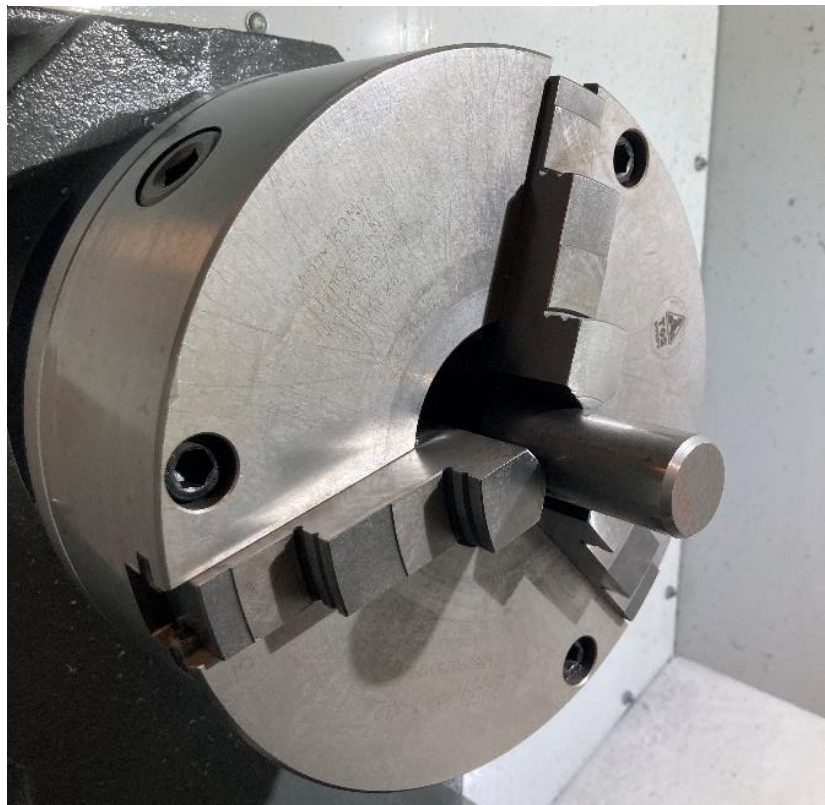
Příloha 25 Držák soustružnického nože s VBD a soustavou dopravy chladicí kapaliny



Příloha 26 Detektor použitého drsnoměru



Příloha 27 Upnutí vzorku do tříčelistového sklíčidla



Příloha 28 Polotovár před procesem soustružení





Příloha 30: Přehled souvisejících norem

ČSN EN 10020 (420002): Definice a rozdělení ocelí

ČSN EN ISO 21920-1 (01 4450): Geometrické specifikace produktu (GPS) – Textura povrchu: Profil – Část 1: Indikace textury povrchu

ČSN EN ISO 21920-2 (01 4450): Geometrické specifikace produktu (GPS) – Textura povrchu: Profil – Část 2: Termíny, definice a parametry textury povrchu

ČSN EN ISO 21920-3 (01 4450): Geometrické specifikace produktu (GPS) – Textura povrchu: Profil – Část 3: Operátory specifikací

ČSN EN ISO 81714-1 (01 3790) Tvorba grafických značek používaných v technické dokumentaci produktů – Část 1: Základní pravidla

ČSN 22 0010 (220010) Obrábění. Základní pojmy