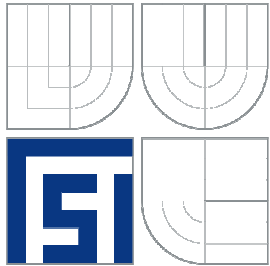


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VOLBA A OPTIMALIZACE ŘEZNÝCH PODMÍNEK PRO PROGRESIVNÍ VÝROBNÍ TECHNOLOGIE

DATA SELECTION AND OPTIMISATION OF CUTTING CONDITIONS FOR
PROGRESSIVE PRODUCTION TECHNOLOGIES

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. Ondřej KRUPKA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. Miroslav PÍŠKA, CSc.

BRNO 2014

Místo tohoto listu bude vloženo zadání (oboustranně). Zadání musí být vevázáno v obou vyhotoveních práce. Do druhého výtisku bude vložena kopie.

Tento list není třeba tisknut!

ABSTRAKT

Tato práce obsahuje teoretický rozbor volby a optimalizace řezných podmínek pro současné proces obrábění se zaměřením na dokončovací proces soustružení. Dále byla pozornost zaměřena na vliv řezných podmínek a jiných vlivů na požadovanou kvalitu a drsnost obrobeného povrchu. V experimentální části byla část těchto vlivů prakticky ověřena a to především vliv hloubky řezu a vliv posuvu na drsnost povrchu a geometrickou přesnost obrobené plochy.

Klíčová slova

Metody optimalizace, drsnost povrchu, poloměr špičky nástroje, dokončovací obrábění, kvalita povrchu.

ABSTRACT

This thesis contains theoretical analysis of optimization methods of cutting conditions for current machining processes with focus on finishing turning. Further focus was put on influences of cutting conditions and other effects on requested quality and roughness of machined surface. The effect of part of these conditions was verified in experimental part. The influence of feed rate and depth of cut on surface roughness and geometrical accuracy was experimentally verified.

Key words

Optimalisation methods, surface roughness, nose tool radius, finish turning, surface quality.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KRUPKA, Ondřej. Volba a optimalizace řezných podmínek pro progresivní výrobní technologie. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. 2014. 91 s. Vedoucí diplomové práce: prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Volba a optimalizace řezných podmínek pro progresivní výrobní technologie** vypracoval(a) samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

26.5.2014

.....
Datum

.....
Bc. Ondřej Krupka

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat mému vedoucímu práce prof. Ing. Miroslavu Píškovi, CSc. za cenné rady při psaní této práce. Také děkuji Jiřímu Čechovi za pomoc při provádění experimentů. A především Milanu Daňkovi za jeho poznatky z praxe, experimentální ověření a čas při konzultacích.

OBSAH

ABSTRAKT	4
PROHLÁŠENÍ.....	5
PODĚKOVÁNÍ.....	6
OBSAH.....	7
ÚVOD.....	10
1 METODY VOLBY ŘEZNÝCH PODMÍNEK.....	11
1.1 Rozbor současných metod volby řezných podmínek	11
1.2 Postupný způsob optimalizace řezných podmínek	11
1.3 Komplexní způsoby optimalizace řezných podmínek	12
1.3.1 Metody plánovaných experimentů.....	13
1.3.2 Matematické iterační metody.....	14
1.3.3 Heuristický přístup.....	15
2 FORMULACE OMEZUJÍCÍCH PODMÍNEK A JEJICH MATEMATICKÉ VZTAHY	17
2.1 Omezení dané řezivostí bříty nástroje	17
2.2 Omezení dané výkonem CNC obráběcího stroje.....	17
2.2.1 Omezení dané maximálním výkonem na vřetenu.....	18
2.2.2 Omezení dané maximálně přípustným kroutícím momentem.....	19
2.3 Omezení dané maximálním přípustným ohybovým momentem	20
2.4 Omezení dané maximálními přípustnými silami	21
2.5 Omezení dané měrnou energií	23
2.6 Omezení dané vhodným utvářením třísek	23
2.7 Omezení dané požadovanou drsností obrobeneé plochy.....	24
2.8 Omezení dané požadovanou přesností obrobeneé plochy	24
2.9 Omezení dané maximálními a minimálními otáčkami z hlediska stroje	26
2.10 Omezení dané maximálním a minimálním posuvem z hlediska stroje	26
2.11 Omezení dané komplexním Taylorovým vztahem.....	26
3 PŘESNOST OBRÁBĚNÍ A KVALITA OBROBENÉHO POVRCHU	28
3.1 Druhy odchylek a příčiny jejich vzniku.....	28
3.2. Mikrogeometrie obrobeneé povrchu	32
3.2.1 Vliv geometrie nástroje na kvalitu obrobeneé plochy	33
3.2.2 Vliv hloubky řezu na kvalitu obrobeneé plochy.....	36

3.2.3	Vliv posuvu na kvalitu obrobené plochy	37
3.2.4	Vliv řezné rychlosti na kvalitu obrobené plochy	39
3.2.5	Vliv opotřebení nástroje na kvalitu obrobené plochy	40
3.3	Kontrola struktury povrchu a její definice	41
3.3.1	Metodika hodnocení parametrů	41
3.3.2	Vztah mezi rozměrovou tolerancí a drsností	44
4	EXPERIMENTÁLNÍ VERIFIKACE	45
4.1	Vliv hloubky řezu na kvalitu obrobené plochy	45
4.1.1	Popis experimentu	45
4.1.2	Obráběcí stroj	45
4.1.3	Nástroj	48
4.1.4	Obráběný vzorek	49
4.1.5	Měřidla použitá při experimentu	50
4.1.6	Řezné podmínky použité při experimentu	52
4.1.7	Výsledky experimentu	52
4.1.8	Rozbor výsledků experimentu	56
4.1.9	Optimalizace řezných podmínek	60
4.2	Vliv posuvu v oblasti tvorby minimální třísky na kvalitu obrobené vrstvy	67
4.2.1	Popis experimentu	67
4.2.2	Obráběcí stroj	67
4.2.3	Nástroj	67
4.2.4	Obráběný vzorek	68
4.2.5	Měřidla použitá při experimentu	68
4.2.6	Řezné podmínky použité při experimentu	70
4.2.7	Výsledky experimentu	70
4.2.8	Rozbor výsledků experimentu	72
4.3	Vliv posuvu na kvalitu obrobené plochy	75
4.3.1	Popis experimentu	75
4.3.2	Obráběcí stroj	75
4.3.2	Nástroj	76
4.3.3	Obráběný vzorek	77
4.3.4	Měřidla použitá při experimentu	78
4.3.5	Řezné podmínky použité při experimentu	79
4.3.6	Výsledky experimentu	79
4.3.7	Rozbor výsledků experimentu	82

4.3.8 Optimalizace řezných podmínek	83
5 ZÁVĚR	85
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	86
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	89

ÚVOD

Způsoby volby řezných podmínek musí v současné době odpovídat požadavkům výroby, které kladou vyšší nároky a vynucují si intenzivnější podmínky a to jak na běžné, tak i číslicově řízené obráběcí stroje. Vývoj nových technologií, trendů a snaha jednotlivých výrobců překonat své konkurenty k tomu vytváří všechny předpoklady. Existují řezné materiály, které jsou schopny pracovat i za mnohem náročnějších podmínek, vyvíjejí se nové typy obráběcích strojů, zvyšuje se jejich přesnost, výkon a výrobní možnosti.

Nicméně růstem těchto výrobních možností roste také různorodost soustavy stroj-nástroj-obrobek a to také přináší svá rizika. Dochází ke konfrontaci jednotlivých technologií, která je, s cílem zvýšení produktivity, hnána až na hranice svých možností. Nové kovové i nekovové materiály obrobků mají větší houževnatost, což vyžaduje odolnější nástroj s pozměněnou geometrií. Na nástroj se zase váže obráběcí stroj, který musí mít vyšší přesnost, tuhost a výkonnost. A v této kombinaci musí být vše vyrobeno lépe, rychleji a kvalitněji. Vzhledem k tomu, že v moderní ekonomické společnosti je úspěšnost výrobního závodu vázána na spokojenost zákazníka, musí nabídnout vždy o něco více než jejich konkurenti, aby mohl uspět.

Zvýšení kvality, přesnosti a produktivity při obrábění vyžaduje použít řezné podmínky, jež jsou často na hranici únosnosti jednotlivých komponent a proto je potřeba hledat optimální parametry, které vhodně skloubí všechna zvolená kritéria. Je tedy třeba neustále optimalizovat. A pokud hovoříme o optimalizaci, znamená to, že máme nějaký stávající stav a chceme jej zkvalitnit. Než se ale najdou optimální hodnoty obráběcího procesu, vyžaduje to čas a především zkušenosti. Pokud tyto zkušenosti dotčenému technikovi chybí, je třeba přistoupit k teoretickému výpočtu, který ovšem kalkuluje s ideálními podmínkami, nicméně může působit jako takové vodítko, které nás alespoň k hledanému optimu přiblíží. Další možností pro nezkušeného technika může být experimentální verifikace, která postupnou změnou řezných podmínek a nástrojů, jej může dovést k nalezení optima. Samozřejmě ideální je použít kombinace obou.

Moderní doba navíc umožnila vývoj výpočetní techniky, což situaci velmi usnadňuje, protože ta je schopná udržovat velkou databázi vstupních dat, která zvoleným algoritmem spočítají velmi rychle optimální hodnoty. Pro tvůrce těchto softwarů jsou právě výrobní závody, či samotní odborníci, hlavním zákaznickým segmentem.

Tato práce si klade za cíl zhodnotit metody optimalizace, kterými lze postup volby řezných podmínek obrábění zefektivnit. Tím lze dosáhnout vyšší produktivity a kvality při současném snížení nákladů. Práce bude zaměřena více na dokončovací metody obrábění se zaměřením na kvalitu obrobku. Tato celá problematika bude experimentálně ověřena za pomoci progresivních, ale také konvenčních metod.

1 METODY VOLBY ŘEZNÝCH PODMÍNEK

1.1 Rozbor současných metod volby řezných podmínek

Volba řezných podmínek by měla vycházet pro danou metodu obrábění a měla by brát v potaz vlastnosti obráběného materiálu, vlastnosti nástrojového materiálu a dalších, neméně důležitých požadavků na obráběcí stroj a výrobní podmínky [3].

Množství odebírané třísky je závislé na všech třech parametrech řezných podmínek – řezné rychlosti, posuvu, hloubce třísky. Při optimalizaci s ohledem na životnost nástroje je třeba změnu některého z těchto parametrů (směrem ke zvýšení produktivity) volit obezřetně. Podle experimentálního zjištění Stephena F. Krara [18] totiž:

- zvýšením hloubky řezu o 50%, snižuje životnost nástroje o 15%,
- zvýšením hodnoty posuvu o 50%, snižuje životnost nástroje o 60%,
- zvýšením řezné rychlosti o 50%, snižuje životnost nástroje o 90%.

1.2 Postupný způsob optimalizace řezných podmínek

Tradiční a v praxi je nejčastěji vžitý postupný způsob volby a optimalizace řezných podmínek. Volba řezných podmínek je závislá na operátorovi obráběcího centra, při kterém často využívá své zkušenosti. Ale i přesto, že může mít operátor spoustu zkušeností, může být pro něj obtížné zvolit optimální parametry. Myšlenka tohoto způsobu vychází z optimální trvanlivosti nástroje, kterými se zabýval již Taylor při svých výpočtech. Nicméně tato optimálnost bývá v mnoha situacích často určována nevhodně, což může vést ke snížení produktivity a neekonomičnosti [11, 33].

Obecně platí technologická zásady, pokud to podmínky dovolí, měli bychom obrábět celý přídavek najednou. Z praktického hlediska tuto zásadu při hrubování dodržet nelze. Přídavek na hrubování bývá větší než nám dovolí odebrat stroj či nástroj. Zde se proto vyplatí odebírat hrubovací přídavek na více operací. Snadněji lze tuto zásadu dodržet při dokončovacích procesech, kde často hloubka řezu nemá omezující charakter. Čím menší třísku při této operaci odebíráme, tím dokáže vytvořit kvalitnější obrobenu plochu z pohledu přesnosti a drsnosti. Při volbě řezných podmínek pro dokončovací operace se musí brát v potaz předchozí hrubovací operace, její nepřesnosti a v neposlední řadě parametry nástroje [32].

Pokud bychom se pokusili odebrat hrubovací operaci na jeden záběr, je to možné, ale nevýhodné z ekonomického i silového hlediska. Po aplikaci některé z optimalizačních analýz, bychom dospěli k poznatku, že k odebrání takto velké hloubky třísky, je třeba volit velmi malý posuv. U malých posuvů dochází ke vzniku velkého měrného řezného odporu, zvýšení silového zatížení a tím pádem k neefektivnosti a snížení produktivity [32].

Pokud bychom měli celý proces postupné optimalizace shrnout, vypadal by zhruba následovně [11]:

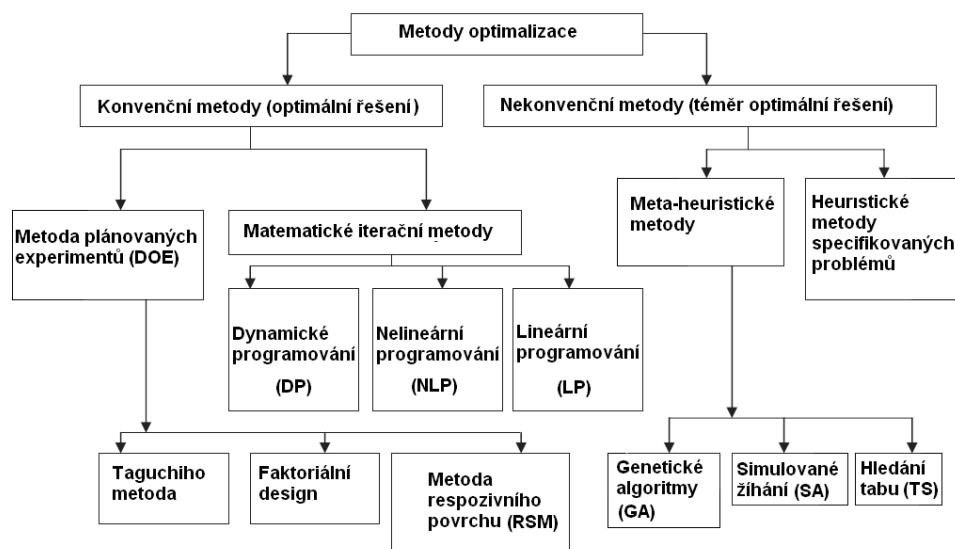
1. Dle zvoleného kritéria určíme optimální trvanlivost břitu nástroje bez uvažování omezujících podmínek.
2. Určí se adekvátní hloubka řezu. Při hrubování zhodnotíme, zda máme dostatečné kapacity pro obrobení veškerého přídatku na jednu operaci, či rozdělení na více operací. A to nejlépe rozdělíme na poloviny, třetiny, případně čtvrtiny, atd. Při obrábění na čisto se bude hloubka řezu rovnat velikosti přídatku a bude probíhat na jednu operaci.
3. Zvolí se optimální velikost posuvu. Pro zvolenou hloubku řezu, z předchozího kroku, se z omezujících podmínek zvolí maximální velikosti posuvů. Z těchto maximálních posuvů se následně zvolí ten nejnižší, což bude hledaný optimální posuv. Pro volbu posuvu lze použít také některé normativy, které zohledňují např. velikosti řezných sil a dosahované drsnosti konečného povrchu.
4. Jako poslední parametr se zvolí řezná rychlost a to na základě předchozích vybraných parametrů, trvanlivosti nástroje, hloubky řezu a posuvu. Ta již z principu nemusí být správná, protože vychází z předchozích zvolených parametrů a ty však nemusí být optimálně zvoleny. K určení řezné rychlosti se využije komplexní Taylorův vztah, resp. normativy řezných podmínek.
5. Pokud při hrubování obdržíme více variant, zvolí se ta neoptimalnější dle vyčísleného kritéria optimálnosti.
6. Pokud se řezné podmínky volí pomocí normativů, zhodnotí se v posledním kroku výsledek s výkonem obráběcího centra. Zde se může objevit nedostatek této metody, protože při překročení výkonnostních charakteristik stroje se mu musí řezné podmínky přizpůsobit a tím dochází k odklonu od optimální volby.

1.3 Komplexní způsoby optimalizace řezných podmínek

Komplexní optimalizační metody jsou pokročilé a vedou vždy k optimálnímu nebo téměř optimálnímu řešení s ohledem na omezující podmínky. Jde o postupy složité a pro ruční vyhodnocování v praxi doslova nepoužitelné. Proto jsou tyto metody často využívány za pomoci výpočetní techniky a shodného softwaru [11].

Principiálně jde o podobný postup jako při postupném způsobu optimalizace, kdy je třeba vycházet z určité hloubky řezu nebo kalkulovat s paralelními výpočty a ty poté porovnat. Nicméně komplexní optimalizační výpočty lépe respektují všechny vazby mezi omezujícími podmínkami a kritériem optimálnosti (účelovou funkcí) [11].

Z toho vyplývá, že pokud tyto postupy řeší softwarová aplikace, jsou kladeny vysoké nároky na vstupní data, jako např. technické údaje o stroji, nástroji, břitové destičce, obráběném materiálu, apod. Je tedy třeba tuto rozsáhlou databázi neustále udržovat a aktualizovat, aby práce s ní byla efektivní.



Obr. 1.1 Přehled optimalizačních metod používaných při obrábění [28]

1.3.1 Metody plánovaných experimentů

Jedná se o analytické metody, kdy jsme schopni za pomoci zvolených experimentů otestovat variaci řezných podmínek a z jejich výsledků určit optimální řešení. Částečně jde o simulační a částečně o statistickou metodu. Nejčastěji užívané metody tohoto typu jsou Taguchiho metoda a Metoda responzivního povrchu.

Taguchiho metoda

Geniči Taguchi se ve 20. století zabýval metodologií, která měla za úkol zlepšit jakost výrobku a kvalitu výrobních procesů. Principem jeho metody je, aby byl výrobek či proces, kterým je vyráběn, méně náchylný na negativní vlivy, které nelze ovlivnit a působí neekonomicky. Optimální řešení se tedy hledá pomocí soustavy experimentů jejichž počet je, za pomoci vytvořené variační ortogonální sestavy, značně redukován a tím je dosaženo úspor času a nákladů. Dalšími kroky jsou tvorba experimentů, analýza dat, volba optima a následné ověřovací pokusy. Samotné experimenty jsou tedy přesnější a mají větší vypovídající hodnotu [28].

Metoda responzivního povrchu (RSM)

Metoda RSM je empirický modelovací přístup určený ke zjištění vazby různých procesních parametrů a jejich vzájemné reakci či kvalitativní charakteristice v průběhu změn. Jde o experimentální postupy v jednotlivých na sobě navazujících sekvencích, pomocí kterého lze vytvořit a optimalizovat či inovovat empirický model. Proto je metoda RSM vhodná pro modelování a následnou regresní analýzu problémů, jež ovlivňují reakce několika proměnných, přičemž cílem je optimalizovat tyto reakce [34].

V experimentech se vstupní proměnné nazývají jako nezávislé a jsou předmětem řízení při experimentu. Tyto faktory lze předepsat, ve vztahu k ostatním parametrům, funkcí:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_k) \pm e_r \quad (1.1)$$

Testovaný produkt vytváří reakci Y a její funkce f se nazývá rezponzivní povrch či rezponzivní funkce, která je závislá na souboru nezávislých proměnných. Parametr e_r vystihuje chyby při experimentu.

Pokud by bylo cílem experimentu zjištění např. střední hodnoty drsnosti povrchu Ra jako výstup Y , mohly by být funkcí nezávislých proměnných třeba řezná rychlost V_c , posuv f , hloubka řezu a_p , řezná síla V_z , či chvění nástroje v radiálním směru V_y . Funkce by tedy vypadala následovně [37]:

$$Ra = f(V_c, f, a_p, V_z, V_y) \pm e_r \quad (1.2)$$

Vzhledem k tomu, že skutečný tvar funkce reakce není známý, je potřeba jej aproximovat. Ve většině případů postačí lineární, případně kvadratický model. Tvar lineárního modelu pro obecné podmínky by mohl vypadat takto:

$$Y = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + \dots + a_j X_j \quad (1.3)$$

a kvadratického modelu:

$$Y = a_0 + \sum_{i=1}^k a_i X_i + \sum_{i=1}^k a_{ii} X_i^2 + \dots + \sum_{i < j} a_{ij} X_i X_j \quad (1.4)$$

Hlavní výhody této metody jsou následující [35, 36]:

1. Redukce počtu experimentů
2. Může být stanovena optimální hodnota parametrů
3. Lze uskutečnit hodnocení experimentálních chyb
4. Lze provést kvalitativní odhad parametrů
5. Provede se závěr týkající se vlivu parametrů na vlastnosti daného procesu

1.3.2 Matematické iterační metody

Iterační metody umožňují chod výroby a snadné posouzení provedené změny. Lineární, nelineární a dynamické programovací techniky se zabývají řešením problémů, ve kterých máme určit extrém, tedy minima, či maxima matematických funkcí několika proměnných které mají několik omezení. V těchto případech není potřeba provádět reálný experiment řezného procesu, ale ten je nahrazen empirickým matematickým modelem, který popisuje aktuální proces [28, 38].

Při řešení problematiky řezných podmínek pomocí lineárního programování bereme v úvahu, že všechny funkce jsou lineární či je lze logaritmováním převést do lineárního tvaru. Nejčastěji používaná metoda lineárního programování je metoda Simplex, což je iterační metoda, která pomocí několika eliminačních kroků dosáhne optimálního řešení. K řešení využívá Gaussovu-Jordanovu eliminaci, pomocí které se v jednotlivých, po sobě jdoucích, krocích vypočte nové, přesnější řešení s lepší nebo alespoň stejnou hodnotou účelové funkce [11, 38].

V praxi se ovšem setkáváme se situací, že ne všechny omezující podmínky mají lineární charakter. Pokud je alespoň jedna funkce nelineární, musí se přistoupit na postup nelineárního programování [28].

Dynamické programování se užívá v případě, kdy chceme rozložit úlohu na menší podúlohy. Rozdíl je v efektivitě s jakou to provedeme pomocí dynamického programování. Při obrábění lze tuto metodu efektivně použít například v situaci, kdy se jedním nástrojem provádí několik průjezdů na shodných obrobcích [28].

1.3.3 Heuristický přístup

Meta-heuristické metody

Genetické algoritmy se snaží přenést evoluční teorie a pravidla k řešení složitých problémů. Používá k tomu tři hlavní operátory: 1. reprodukce, 2. křížení a 3. mutace. Při aplikaci metody GA u obrábění jsou procesní parametry kódovány v binárním kódování. Je vždy důležité, aby řešitel volil správný algoritmus bez ohledu na vliv faktorů a omezení z důvodu jeho vyšší účinnosti [39, 40].

Kroky GA, jež se vztahují k obrábění, mohou vypadat takto [41]:

1. procesní parametry se zakódují jako geny binárního kódování,
2. skupina genů se vzájemně kombinuje a vytvoří chromozom, který se využije pro základní mechanismy metody GA, jako je křížení a mutace,
3. křížení je operace, při které se navzájem zaměňují některé části dvou různých chromozomů, aby vytvořily nový produkt. To je důležité pro rychlé prozkoumání vyhledávaného prostoru,
4. mutace působí po křížení a poskytuje drobné odlišnosti nově vzniklému chromozomu,
5. k ohodnocení každého jedince, resp. chromozomu jsou procesní parametry dekódovány a využity pro odhad parametrů výkonnosti obrábění,
6. „fitness funkce“ je funkce potřebná pro optimalizaci procesu a volbě další generace genetického algoritmu,
7. po několika iteracích genetického algoritmu je dosaženo optimálních výsledků procesních parametrů vzájemným porovnáním „fitness funkcí“ všech individualit.

Metoda simulovaného žíhání se využívá v případě, že úloha nelze vyřešit analyticky a má velký stavový prostor. Jako heuristická metoda neumožňuje vyhledat dokonalé optimální řešení, nicméně v konstantním počtu kroků dokáže najít výsledek velmi dobrý. Simulované žíhání bylo inspirováno tepelnými úpravami oceli, konkrétně žíháním. Při zahřátí oceli se atomy rozkmitají ze svých pozic mezi stavy s vyšší energií a při ochlazování dochází k rekrystalizaci s menšími defekty [28, 40].

Při metodě hledání tabu dochází k postupné iteraci řešení pomocí náhodný výběrů sousedních řešení. Žádné průběžné výsledky se neukládají a tedy veškeré informace z průběhu hledání jsou ztraceny [28].

Heuristické metody specifikovaných problémů

Jde o nenáročné a často v praxi využívané metody. Jedná se o způsob optimalizace, při které se při řešení problému buď spočítají různé varianty a postupy, jež se navzájem porovnají a z nich se vybere ta nejlepší a nebo dochází k postupnému výpočtu, při kterých se upravují jednotlivé parametry a pozoruje se jejich vliv na celkové vlastnosti. Postupy u těchto výpočtů jsou zcela náhodné a závisí na znalostech a rozhodování řešitele. Proto jeho výpočty nedávají přehled o dosažení minima nebo maxima z pohledu vyhledávacího prostoru [39].

2 FORMULACE OMEZUJÍCÍCH PODMÍNEK A JEJICH MATEMATICKÉ VZTAHY

Jak vychází z předchozí kapitoly, omezující podmínky jsou velmi důležité při použití optimalizačních metod, protože popisují výrobní a technologické možnosti a zároveň usměrňují samotnou optimalizaci. Tyto omezení se především týkají fyzikálních i chemických vlastností každého prvku soustavy stroj-nástroj-obrobek. Každý z nich má stejnou váhu v hodnocení obrobitelnosti. Níže bude uveden výčet nejčastěji uvažovaných omezujících podmínek.

2.1 Omezení dané řezivostí břitu nástroje

Z časového hlediska řezivosti nástroje hraje důležitou roli parametr trvanlivosti nástroje. Ten je definován časovým obdobím, během kterého nástroj pracuje od svého naostření, až po dosažení otupení břitu dle stanoveného kritéria. Toto kritérium může mít dvě hlediska a to technologické či ekonomické. Technologické hledisko hodnotí nástroj až do okamžiku, kdy není schopen obrobit danou plochu v požadované jakosti. Při hodnocení z technologického hlediska bereme v úvahu maximální životnost nebo jej vztáhneme na podíl nákladů na nástroj, které připadnou na obrobení jednoho kusu [7].

$$v_{cT} = \frac{C_v}{T_{opt}^{1/m} \cdot a_p^{x_v} \cdot f^{y_v}} \quad (2.1)$$

Řezná rychlost při zvolených otáčkách vřetene a průměru obrábění je dána:

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{10^3} \quad (2.2)$$

Stanoví se podmínka, že vypočtená řezná rychlost nesmí překročit mezní hodnotu danou řezivostí nástroje:

$$v_c \leq v_{cT} \quad (2.3)$$

po dosazení a úpravě:

$$n \cdot f^{y_{vc}} \leq \frac{10^3 \cdot C_{vc}}{T_{opt}^{1/m} \cdot a_p^{x_{vc}} \cdot \pi \cdot D} = a_1 \quad (2.4)$$

T_{opt}optimální trvanlivost nástroje

2.2 Omezení dané výkonem CNC obráběcího stroje

Omezení dané výkonem obráběcího stroje se bere v potaz především při hrubování.

Z celkového pohledu na obráběcí stroj lze říci, že katalogový instalovaný příkon (tzv. zdánlivý výkon) je standardním parametrem stroje a podle něj se také dimenzují jističe, přívodní kabely a ostatní komponenty. V praktickém užívání nepracují nikdy všechny součásti na plný výkon. Kdybychom veškeré maximální výkony sečetli dohromady, dostali bychom nesmyslně vysoké číslo. To se týká zejména servopohonů interpolujících os, které dosahují maximálního výkonu jen krátkodobě a v jiných

okamžicích než třeba vřeteno. Výkon celého stroje se tedy empiricky krátí takovým způsobem, aby představoval limit, který není reálné v praxi překročit [10].

Jako použitelnější parametr pro energetickou optimalizaci se ukazuje střední příkon, což je aritmetický průměr za delší pracovní čas. Zobrazuje totiž nejen nominální pracovní příkon/výkon, ale také jeho rozložení v čase. Ze středních výkonů jednotlivých spotřebičů lze účinněji získat jejich prioritu a význam pro optimalizaci [10].

Pro stanovení řezných podmínek je nejdůležitější maximální výkon na vřetenu či kroutící moment vřetene. Obě tyto hodnoty jsou součástí každého katalogu stroje a to nejen pro hlavní vřeteno, ale také pro další spotřebiče, které lze při operaci využít, jako např. protivřetena.

2.2.1 Omezení dané maximálním výkonem na vřetenu

Omezující podmínku lze definovat následujícím způsobem:

$$F_C \leq F_{C_{\text{lim}}} \quad (2.5)$$

F_Ctangenciální složka řezné síly [N]

$F_{C_{\text{lim}}}$limitní tangenciální složka řezné síly [N]

Experimentálním vztahem je dána závislost mezi posuvem, hloubkou řezu a tangenciální složkou řezné síly:

$$F_C = c_{F_c} \cdot a_p^{x_{F_c}} \cdot f^{y_{F_c}} \quad (2.6)$$

Vzájemný vztah limitní hodnoty tangenciální složky řezné síly $F_{C_{\text{lim}}}$, řezné rychlosti a efektivního příkonu na vřetenu. Efektivní výkon na vřetenu často vychází z hodnot katalogového výkonu na vřetenu se zřetelem na mechanickou účinnost stroje:

$$P_{ef} = \frac{F_{C_{\text{lim}}} \cdot v_C}{60 \cdot 10^3} \quad (2.7)$$

Úpravou lze získat limitní hodnotu tečné složky řezné síly z hlediska efektivního výkonu:

$$F_{C_{\text{lim}}} = \frac{6 \cdot 10^7 \cdot P_{ef}}{\pi \cdot D \cdot n} \quad (2.8)$$

Dosažením do původní podmínky je dosaženo:

$$c_{F_c} \cdot a_p^{x_{F_c}} \cdot f^{y_{F_c}} \leq \frac{6 \cdot 10^7 \cdot P_{ef}}{\pi \cdot D \cdot n} \quad (2.9)$$

Pro omezení výkonem obráběcího stroje platí tedy:

$$n \cdot f^{y_{F_c}} \leq \frac{6 \cdot 10^7 \cdot P_{ef}}{c_{F_c} \cdot a_p^{x_{F_c}} \cdot D \cdot \pi} = a_2 \quad (2.10)$$

Konstantu c_{F_c} lze stanovit např.:

$$c_{Fc} = 41,84 \cdot (HB)^{0,6077} \text{ pro šedou litinu} \quad (2.11)$$

$$c_{Fc} = 176 \cdot (R_m)^{0,359} \text{ pro ocel} \quad (2.12)$$

2.2.2 Omezení dané maximálně přípustným kroutícím momentem

Kroutící moment lze uvažovat například z hlediska upnutí obrobku (síly upnutí), ale důvody mohou být i jiné.

$$M_k \leq M_{k \max} \quad (2.13)$$

M_kkroutící moment na vřetenu [Nm]

$M_{k \max}$maximálně přípustná velikost kroutícího momentu na vřetenu [Nm]

Pro pomaloběžná sklíčidla, kleštiny a čelní unášeče lze hodnoty maximálního přípustného kroutícího momentu uvažovat s konstantní hodnotou.

Úpravou lze blíže specifikovat omezující podmínku takto:

$$a_p^{x_{Fc}} \cdot f^{y_{Fc}} \leq \frac{2 \cdot 10^3 \cdot M_{k \max}}{k_{Fc} \cdot D} \quad (2.14)$$

U sklíčidel s vyšší obvodovou rychlostí dochází vlivem odstředivé síly ke zmenšování upínací síly a rozevírání čelistí. Moderní sklíčidla mohou být konstruována do těchto podmínek a předcházet rozevírání čelistí. Pokud tomu tak není lze vycházet z předpokladu, že pokles upínací síly je dán čistě odstředivou silou [11].

Závislost upínací síly F_u jedné čelisti na otáčkách vřetena n lze uvažovat:

$$F_u = F_{uo} - k_n \cdot n^2 \quad (2.15)$$

F_u upínací síly působící na čelist [N]

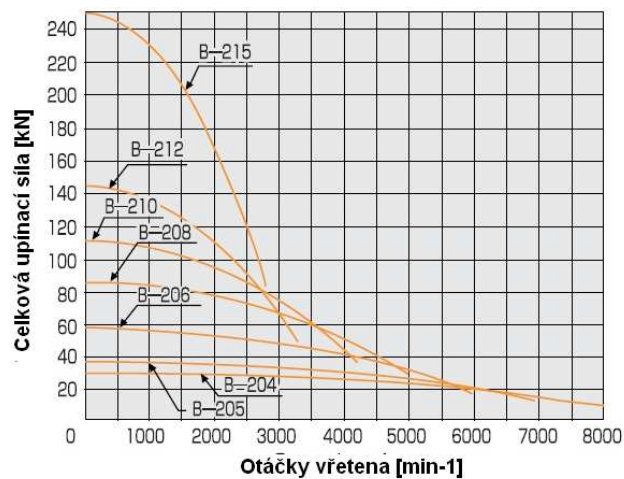
F_{uo} upínací síly působící na čelist pro vřeteno v klidu $n=0$ [N]

k_nkonstanta

Konstantu k_n lze získat od výrobce. Udává procentuální pokles upínací síly při maximálních otáčkách vřetena, vhodných pro dané sklíčidlo.

$$k_{F_n} \cdot F_{uo} = F_{uo} - k_n \cdot n_{F_u}^2 \quad (2.16)$$

$$k_n = \frac{F_{uo} \cdot (1 - k_{F_n})}{n_{F_u}^2} \quad (2.17)$$



Obr. 2.1 Příklad závislosti upínací síly na otáčkách [47]

Pro tříčelist'ové sklíčidlo lze odvodit omezující podmínku maximálního přípustného momentu jako

$$10^3 \cdot M_{k \max} = 3 \cdot F_u \cdot \mu \cdot \frac{D_u}{2} \quad (2.18)$$

D_uprůměr upnutí [mm]

μkoeficient tření na čelisti

Po dosazení za sílu upnutí plyne

$$10^3 \cdot M_{k \max} = 3 \cdot \mu \cdot \frac{D_u}{2} (F_{uo} - k_n \cdot n^2) \quad (2.19)$$

$$a_p^{x_{Fc}} \cdot f^{y_{Fc}} = 3 \cdot \mu \cdot \frac{D_u}{2} (F_{uo} - k_n \cdot n^2) \quad (2.20)$$

$$a_p^{x_{Fc}} \cdot f^{y_{Fc}} + \frac{3 \cdot \mu \cdot D_u \cdot k_n}{k_{Fc} \cdot D} \cdot n^2 = \frac{3 \cdot \mu \cdot D_u \cdot F_{uo}}{k_{Fc} \cdot D} \quad (2.21)$$

2.3 Omezení dané maximálním přípustným ohybovým momentem

V tomto případě se uvažují dvě možnosti a to: 1. omezení konstantním ohybovým momentem nebo 2. nelineárním průběhem ohybového momentu. V případě konstantního ohybového momentu lze vyjádřit maximální přípustný moment u tříčelist'ového sklíčidla, pracujícího při nižších otáčkách. Při jednostranném upnutí vzniká riziko jeho vytržení z upínacího zařízení [11].

Pro nejméně příznivý případ natočení sklíčidla lze uplatnit vztah ve tvaru

$$10^3 \cdot M_{o \max} = 0,75 \cdot \mu \cdot D_u \cdot F_{uo} \quad (2.22)$$

$M_{o\max}$ představuje maximální přípustný ohybový moment [Nm]

Omezující podmínku lze vyjádřit takto

$$M_o \leq M_{o\max} \quad (2.23)$$

M_o vypočtený ohybový moment, který namáhá součást [Nm].

Tento moment lze též formulovat pomocí řezné síly F_C a pasivní síly F_p

$$10^3 \cdot M_o = L_o \cdot \sqrt{(F_C^2 + F_p^2)} \quad (2.24)$$

L_ovzdálenost působíště řezných sil od sklíčidla [mm]

Pasivní sílu [N] lze vyjádřit pomocí řezné síly.

$$F_p = k_{pc} \cdot F_C \quad (2.25)$$

$k_{pc} = \text{konst.}$

Po dosazení za pasivní sílu platí

$$10^3 \cdot M_o = L_o \cdot F_C \sqrt{(1 + k_{pc}^2)} \quad (2.26)$$

Po dosazení do rovnic a následné úpravě vyjde omezující podmínka

$$a_p^{x_{FC}} \cdot f^{y_{FC}} \leq \frac{0,75 \cdot \mu \cdot D_u \cdot F_{uo}}{k_{FC} \cdot L_o \cdot \sqrt{1 + k_{pc}^2}} \quad (2.27)$$

V případě nelineárního průběhu se uplatní následující vztah. Ten vychází z charakteristiky upínací síly pro vysokootáčková sklíčidla

$$a_p^{x_{FC}} \cdot f^{y_{FC}} + \frac{0,75 \cdot \mu \cdot k_n \cdot D_u}{k_{FC} \cdot L_o \cdot \sqrt{1 + k_{pc}^2}} \cdot n^2 \leq \frac{0,75 \cdot \mu \cdot D_u \cdot F_{uo}}{k_{FC} \cdot L_o \cdot \sqrt{1 + k_{pc}^2}} \quad (2.28)$$

2.4 Omezení dané maximálními přípustnými silami

Při řezání má celková řezná síla tři složky a to řeznou sílu F_C , sílu posuvu F_f a pasivní sílu F_p . Řezná síla F_C působí ve směru vektoru řezné rychlosti. A podílí se nejvíce ze všech tří na celkovém příkonu obráběcího procesu a to až z 99%. Síla F_f posuvu působí ve směru posuvu. Na celkovém příkonu se podílí velmi málo. V porovnání s rychlostí řezné síly je totiž rychlost posuvu jen velmi malá a velikost síly posuvu je proto obvykle méně než 50% velikosti řezné síly. Nejmenší v porovnání se dvěma předchozími silami je pasivní síla. Velikost této síly je často menší než čtvrtinová řezná síla. Působí kolmo k obrobené ploše a hraje velmi významnou roli při požadavku na přesnost obrobené

plochy a chvění při obrábění, jelikož působí ve směru nejmenší tuhosti soustavy stroj-nástroj-obrobek [8].

Výsledná řezná síla a zastoupení jejich složek se měří pomocí dynamometrů a to buď mechanicky, pneumaticky, či elektricky, apod. Principem je měření elastické deformace určitých částí dynamometru [8].

Omezení pro jednotlivé složky platí

$$a_p^{x_{F_C}} \cdot f^{y_{F_C}} \leq \frac{F_{C \max}}{k_{F_C}} \quad (2.29)$$

$$a_p^{x_{F_f}} \cdot f^{y_{F_f}} \leq \frac{F_{f \max}}{k_{F_f}} \quad (2.30)$$

$$a_p^{x_{F_p}} \cdot f^{y_{F_p}} \leq \frac{F_{p \max}}{k_{F_p}} \quad (2.31)$$

$F_{C \max}$, $F_{f \max}$, $F_{p \max}$maximální přípustné složky výsledné řezné síly [N]

x_{F_f} , x_{F_p} , y_{F_f} , y_{F_p} , k_{F_f} , k_{F_p}empirické konstanty

Pasivní sílu a sílu posuvu lze vyjádřit jako násobek řezné síly

$$F_f = k_{F_C} \cdot F_C \quad (2.32)$$

k_{F_C}konstanta

Z toho plynou omezující podmínky

$$a_p^{x_{F_C}} \cdot f^{y_{F_C}} \leq \frac{k_{f_C} \cdot F_{C \max}}{k_{F_C}} \quad (2.33)$$

$$a_p^{x_{F_C}} \cdot f^{y_{F_C}} \leq \frac{k_{p_C} \cdot F_{C \max}}{k_{F_C}} \quad (2.34)$$

V některých případech lze považovat maximální velikost posuvu jako omezující charakter z hlediska silového působení na břit. Někteří výrobci nástrojů pro obrábění ve svých podkladech udávají tyto hodnoty, jelikož jde o empirické hodnoty, které odpovídají určité geometrii a materiálu břitu a obráběnému materiálu [11].

Omezující podmínka vypadá takto

$$f \leq f_F \quad (2.35)$$

$$f_z \leq f_{zF} \quad (2.36)$$

f_f , f_{zf}maximálně přípustné velikosti posuvu na otáčku či na zub [mm]

2.5 Omezení dané měrnou energií

Měrná energie na jednotku objemu se počítá z celkově vynaložené energie E_e na odebrání objemu materiálu V ve formě třísek podle přibližného vztahu.

$$u = \frac{E_e}{V} = \frac{P_c \cdot t_{def}}{v_c \cdot t_{def} \cdot h_D \cdot b_D} = \frac{P_c}{v_c \cdot h_D \cdot b_D} = \frac{F_c}{h_D \cdot b_D} \quad (2.37)$$

t_{def}deformační čas [s]

h_d, d_bjmenovité rozměry třísky [mm]

2.6 Omezení dané vhodným utvářením třísek

Vhodné utváření (dělení) třísek lze zajistit především úpravou řezných podmínek a geometrií břitu nástroje. Problém tvorby nevhodně utvářené (dlouhé) třísky nastává především u strojů bez přímého dohledu obsluhy (např. stroje s nepružnou automatizací, či NC strojů). Tento problém může přerůst až v havárii [11].

Požadavky na vhodné utváření třísek jsou následující:

1. třísky se nesmí nevhodným utvářením dostávat zpět pod břit, což by mohlo vést k poničení nástroje, případně až k havárii v obráběcí soustavě
2. třísky nesmí svou délkou zahltnout obráběcí prostor a zamezit tak dalšímu obrábění, případně rotaci nástrojové hlavy během výměny nástrojů

Pro daný obráběcí nástroj a obráběný materiál se oblast vhodného utváření třísek zjišťuje experimentálně. Tato oblast je funkcí závislosti hloubky řezu na posuvu, vždy pro daný nástroj, daný obráběný materiál a řeznou rychlost [32].

S řeznou rychlostí se poněkud mění hranice mezi oblastí vhodného a nevhodného utváření třísek. Pokud se řezná rychlost zvyšuje, zmenšuje se oblast vhodného utváření třísek. Tento jev se nejvíce projevuje u velkých hodnot posuvů. Optimalizovat utváření třísek lze také pomocí softwaru, ke kterému potřebujeme matematický popis hranice. Ta lze nahradit např. systémem úseček [11].

Protože optimalizaci řezných podmínek se nejčastěji realizuje pro předem určenou hloubku řezu, lze uvažovat tyto omezující podmínky na základě posuvu f

$$f \leq f_{u \max} \quad (2.38)$$

$$f \geq f_{u \min} \quad (2.39)$$

$f_{u \max}, f_{u \min}$maximální, resp. minimální přístupné velikosti posuvu z hlediska vhodného utváření třísek [mm]

Zajímavým a moderním způsobem, jak lze ovlivnit tvorbu třísky je chlazení. V závislosti na tlaku chladiva lze snížit riziko nevhodného utváření třísek. Při tlaku chladiva od 0,5 MPa lze zamezit vzniku výlomků na břitu nástroje. Tlakem vyšším než 2 MPa lze redukovat tvorbu nárustků. Od 4 MPa lze kontrolovat efektivní vedení třísky a tlaky přes 15 MPa nám způsobí i u materiálů tvořící dlouhé třísky (např. vysoce pevné slitiny na bázi niklu) požadovaný lom [12].

2.7 Omezení dané požadovanou drsností obrobené plochy

Tento parametr je důležitý především při obrábění na čisto, při kterém je drsnost obrobené plochy brána jako jeden z nejdůležitějších parametrů.

Platí podmínka

$$R_a \leq R_{a\max} \quad (2.40)$$

R_astřední hodnota drsnosti obrobené plochy [μm]

$R_{a\max}$maximálně přípustná střední hodnota drsnosti obrobené plochy [μm]

Obecně platí

$$R_a = g(f, v_C, r_\varepsilon, \kappa_r, \kappa'_r, \dots) \quad (2.41)$$

r_εpoloměr špičky nástroje [mm]

κ_rúhel nastavení [$^\circ$]

κ'_rvedlejší úhel nastavení [$^\circ$]

Omezující podmínky lze stanovit v obecném tvaru, přestože se mohou jednotlivé hodnoty lišit v závislosti na konkrétní případy obrábění.

$$g(f, v_C, r_\varepsilon, \kappa_r, \kappa'_r, \dots) \leq R_a \quad (2.42)$$

Po dosažení za řeznou rychlost a úpravě vychází omezující podmínka takto

$$g_1(f, n) \leq g_2(R_{a\max}, r_\varepsilon, \kappa_r, \kappa'_r, D_{(n)}, \dots) \quad (2.43)$$

Pro určité případ nemusí být dány hodnoty pro aritmetickou úchylku drsnosti povrchu R_a , hodnotí se velikost posuvu, při které ještě obrobený povrch vyhovuje v uvažovaném rozsahu možných pracovních podmínek

$$f \leq f_{R_{a\max}} \quad (2.44)$$

$f_{R_{a\max}}$maximální hodnota posuvu, která ještě vyhovuje [mm]

2.8 Omezení dané požadovanou přesností obrobené plochy

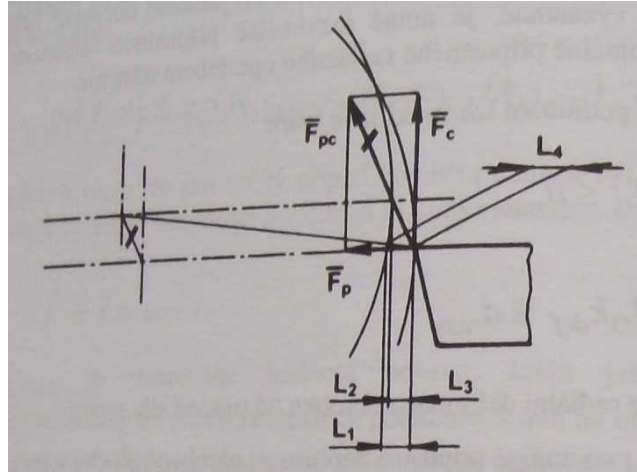
Dalším významným parametrem pro dokončovací operace je požadavek na přesnost obrobené plochy. Největší vliv na přesnost obrobené plochy má jeden z prvků soustavy stroj-nástroj-obrobek. Nepřesnost způsobují elastické deformace soustavy během řezného procesu [32].

Požadavek je definován takto

$$d \leq d_{\max} \quad (2.45)$$

d.....deformace rozhodujícího členu soustavy [mm]

d_{\max}maximální přípustná deformace [mm]



Obr. 2.2 Poměry při deformaci obrobku [32]

Deformace obrobku může způsobit vznik nepřesnosti. Podle obr. 2.2 lze vyjádřit omezující podmínku

$$L_4 \leq d_{\max} \quad (2.46)$$

nebo také

$$L_3 \cdot k_{def} \leq d_{\max} \quad (2.47)$$

L_3radiální deformace obrobku od radiální složky řezné síly F_y [mm]

k_{def}koeficient zahrnující deformaci v radiálním směru [mm]

$$k_{def} = \frac{L_4}{L_3} \quad (2.48)$$

Nepřesnost L_2 lze ve většině případů obrábění zanedbat a považovat $k_{def}=1$.

Pro L_3 také platí

$$L_3 = k_u \frac{F_y \cdot L_0}{E \cdot J} \quad (2.49)$$

F_yradiální složka řezné síly [N]

Emodul pružnosti materiálu obrobku [MPa]

L_0délka obrobku [mm]

Jcentrální moment setrvačnosti [mm⁴]

k_ukoeficient způsobu upnutí

(např. pro upnutí ve sklíčidle platí $k_u=L/3$, upnutí v hrotech $k_u=1/48$, upnutí ve sklíčidle a podepřené hrotem $k_u=0,00932$)

Dále pro kruhový průřez obrobku platí

$$J = \frac{\pi \cdot D^4}{64} \quad (2.50)$$

a pro radiální složku síly

$$F_c = k_{Fc} \cdot a_p^{x_{Fc}} \cdot f^{y_{Fc}} \quad (2.51)$$

Tak po dosazení do omezující podmínky vychází tvar

$$a_p^{x_{Fc}} \cdot f^{y_{Fc}} \leq \frac{d_{\max} \cdot E \cdot \pi \cdot D^4}{64 \cdot k_{pc} \cdot k_u \cdot k_{Fc} \cdot k_{def}} \quad (2.52)$$

2.9 Omezení dané maximálními a minimálními otáčkami z hlediska stroje

Rozsahem otáček vřetena se liší jednotlivé typy obráběcích strojů. Pokud se při výpočtu dostaneme mimo jeho rozsah, je nutné volit odlišný stroj pro danou operaci.

$$n \leq n_{s \max} \quad (2.53)$$

$$n \geq n_{s \min} \quad (2.54)$$

$n_{s \max}$maximální možné otáčky na vybraném stroji [ot/min]

$n_{s \min}$minimální možné otáčky na vybraném stroji [ot/min]

2.10 Omezení dané maximálním a minimálním posuvem z hlediska stroje

Podobně jako u rozsahu otáček vřetena stroje, platí podobné omezení pro posuv.

$$f \leq f_{s \max} \quad (2.55)$$

$$f \geq f_{s \min} \quad (2.56)$$

$f_{s \max}$maximální dostupný posuv na stroji [mm]

$f_{s \min}$minimální dostupný posuv na stroj [mm]

2.11 Omezení dané komplexním Taylorovým vztahem

Základním empirickým podkladem pro optimalizaci řezných podmínek je komplexní Taylorův vztah. Je velmi důležitý pro zhodnocení obrobiteľnosti a to ve vzájemné závislosti trvanlivosti břitů T na řezných podmínkách. Obrobiteľnost je schopnost materiálu být obroben za stanovených provozních podmínek. Obrobiteľnost se posuzuje z mnoha hledisek, nicméně nejdůležitější pro hodnocení jsou vázány k intenzitě opotřebování břitů [8].

Taylorův komplexní vztah má tvar

$$v_c = \frac{c_v}{a_p^{x_v} \cdot f^{y_v} \cdot T^m} \quad (2.57)$$

c_v, x_v, y_v, m, \dots konstanty.

Po dosazení za řeznou rychlost dostáváme

$$a_p^{x_v} \cdot f^{y_v} \cdot n = \frac{10^3 \cdot c_v}{\pi \cdot D \cdot T^{\frac{1}{m}}} \quad (2.58)$$

3 PŘESNOST OBRÁBĚNÍ A KVALITA OBROBENÉHO POVRCHU

Přesností obrábění rozumíme stupeň shodnosti obrobené součástky s výkresem součástky a technickými požadavky. Konstruktor, vycházející z podmínek práce stroje nebo přístroje, určí stupeň přesnosti součástek a jejich vzájemnou polohu v montovaném celku. Přesnost součástek definují tolerance rozměrů a odchylky tvaru a vzájemné polohy [14].

Technické možnosti současné výroby jsou značné. Při realizaci technologického procesu vznikají odchylky od zadaných rozměrů, které mají systematický či náhodný charakter. Nepřesnosti tvarů, rozměrů a poloh součástek je možné definovat takto [2]:

- odchylky skutečných rozměrů od nominálních, které jsou definované tolerancí,
- odchylky od správného geometrického tvaru (ovalita, kuželovitost, apod.),
- odchylky vzájemné polohy součástek a montážních jednotek (odchylky rovnoběžnosti, kolmosti, apod.).

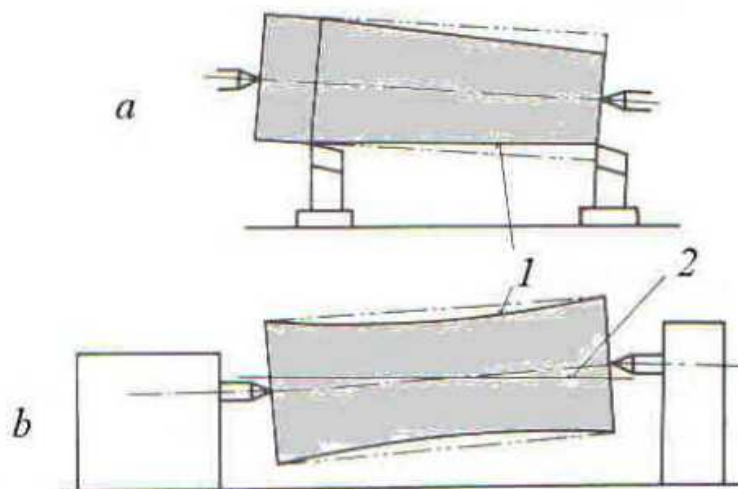
V reálných výrobních podmínkách závisí odchylky na mnoha činitelích a proto často nelze vyrobít dokonale shodné součástky ani v rozsahu několika kusů vyráběných za sebou. Je samozřejmě snahou každého technologa četnost a hodnotu těchto odchylek ve výrobním procesu minimalizovat vhodnou výrobní technologií. Jen tak lze dodržet kvalitu jakosti, snížit zmetkovitost a zajistit dostatečnou ekonomičnost výroby.

3.1 Druhy odchylek a příčiny jejich vzniku

Odchylky, které vznikají při obrábění lze rozdělit do několika skupin [14]:

1. Teoretické odchylky jsou odchylky geometrického tvaru součástek od teoretického tvaru. Např. při obrábění součástek tvarovými kotoučovými noži, u kterých není provedena korekce profilu, vznikají modifikace profilu a rozměru. Nebo při frézování ozubení modulovou kotoučovou frézou se modifikuje evolventní profil zubů, protože teoretický profil platí jen pro určitý modul zubu.
2. Odchylky zapříčiněné nepřesnostmi výrobního stroje závisí na přesnosti práce stroje. Lze je pozorovat při zatížení i bez zatížení řeznou silou. Nepřesnosti, které má stroj bez zatížení, vyplývají ze součtu nepřesností jeho součástí a lze je změřit. Např. častou chybou při montáži je odchylka souososti hrotu soustruhu a jeho lože. Při vzniku této chyby vzniká kuželová součástka. Dráha špičky nože je šikmá k ose obrobku. Pokud je tato odchylka v rovině kolmé na lůžko stroje, bude mít součástka profil rotačního hyperboloidu. Dráha špičky nože je mimoběžná k ose obrobku.(obr. 3.1)

Příčinou vzniku oválnosti součástky je házení vřetena stroje. Špatné vyvážení součástek stroje, přípravku a nebo polotovaru způsobuje vibrace obráběcí soustavy a vznik hranatosti obrobku.



Obr. 3.1 Typické případy nepřesnosti stroje a jejich vliv na tvar obrobku. a – nesouosost hrotů v základní rovině, b – nesouosost hrotů v rovině kolmé na lůžko stroje. 1 – profil obrobku, 2 – dráha nože [14]

3. Odchytky způsobené zatížením stroje vznikají proto, že se technologická soustava pružně deformuje působením řezných sil, upínacích sil a dalších faktorů. Tyto deformace vznikají vlivem vůlí ve stykových spojeníh stroje pružnou deformací v soustavě stroj-nástroj-obrobek. Pružné deformace soustavy způsobují rozptyl rozměrů součástí ve výrobní sérii a jsou základní příčinou vzniku vlnitosti.

Velikost deformací závisí na schopnosti součástí a uzlů odolávat působícím silám a vyjadřuje ji tuhost. Tuhost pružné soustavy c [$\text{N}\cdot\text{mm}^{-1}$], je poměr pasivní řezné síly, která působí ve směru kolmo na obrobenou plochu k posunutí špičky nástroje.

$$c = \frac{F_p}{y} \quad (3.1)$$

F_ppasivní síla [N]

yposunutí nástroje ve směru osy Y [mm]

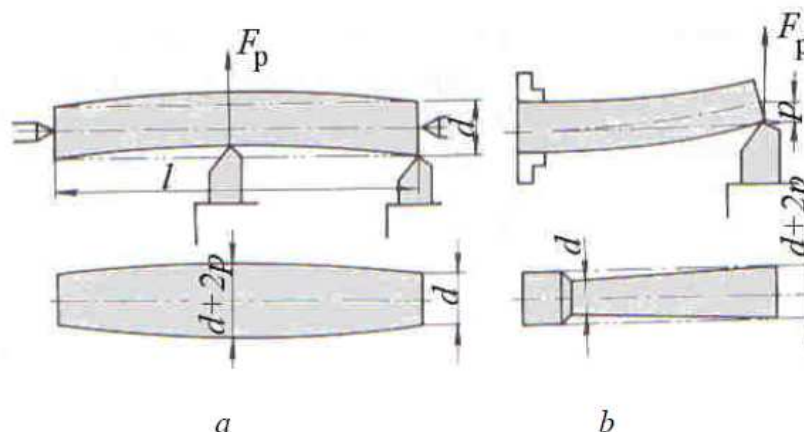
Obrácená hodnota tuhosti vyjadřuje poddajnost pružné soustavy w [$\text{mm}\cdot\text{N}^{-1}$]

$$w = \frac{1}{c} = \frac{y}{F_p} \quad (3.2)$$

Při známé tuhosti lze také určit velikost deformace ze vztahu

$$y = \frac{F_p}{c} = F_p \cdot w \quad (3.3)$$

Příkladem vzniku odchylek geometrického tvaru je nedostatečná tuhost obrobku. Při upnutí v hrotech nástroj vlivem průhybu obrobku odebrává více materiálu u hrotů než ve středu. Obrobek bude mít soudkovitý tvar, přičemž v prostředku bude jeho průměr zvětšený o dvojnásobek posunutí osy hřídele (průhyb) p .



Obr. 3.2 Nepřesnosti způsobené poddajností obrobku . a – obrobek upnutý mezi hroty, b – obrobek upnutý ve sklíčidle [14]

Velikost deformace je možné přibližně určit jako průhyb nosníku p [mm], uloženého na dvou podporách a zatíženého silou F_p (obr. 3.2a) či jako vetknutý nosník (obr. 3.2b).

$$a. p = \frac{F_p \cdot L_0^3}{48 \cdot E \cdot J} \quad (3.4)$$

$$, \text{resp. } b. p = \frac{F_p \cdot L_0^3}{3 \cdot E \cdot J} \quad (3.5)$$

kde L_0délka obrobku [mm]

Emodul pružnosti [MPa]

Jmoment setrvačnosti [mm⁴], pro obrobky kruhové průřezu:

$$J = \frac{\pi \cdot D^4}{4} \quad (3.6)$$

Dovolená odchylka od geometrického tvaru nemá převýšit 1/5 tolerančního pole δ :

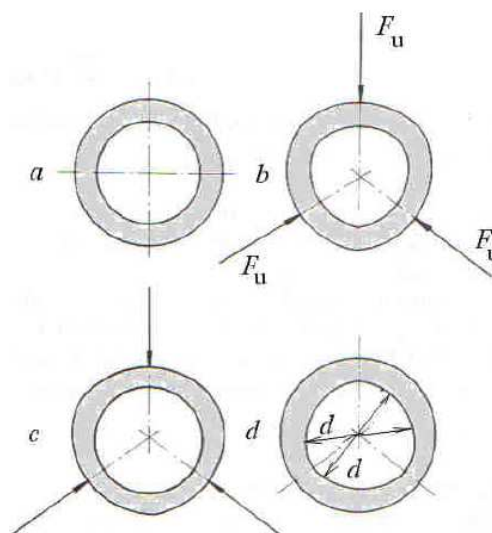
$$p < \frac{\delta}{2} \quad (3.7)$$

4. Odchylky způsobené změnami teplot. Jejich příčinou jsou meteorologické podmínky (teplota okolního prostředí) a ohřev obrobku během procesu obrábění. Tento jev se projevuje zejména při obrábění bez chlazení. Během záběru se před nožem pohybuje stabilní teplotní pole a dochází k teplotní deformaci obrobku a nástroje teplotní roztažností. Po vychladnutí se průměr obrobku zmenšuje a proto by mělo měření probíhat až s určitým časovým odstupem po operaci, případně

teplotní roztažnost zohlednit při kompenzaci údajů měřidla. Při intenzivním chlazení zóny obrábění je možno teplotní deformace eliminovat.

5. Odchytky, které způsobují upínací síly. Při upínání součástek se deformuje nejen obrobek, ale také povrch součástek v místě kontaktu s upínacím elementem. Tyto odchytky se výrazně projevují např. při upínání tenkostěnných pouzder, či trubek, apod.

Nepřesnosti, vznikající deformacemi málo tuhých obrobků vlivem upínacích sil, je možno snížit použitím vhodného upínacího zařízení (např. vícečelist'ové sklíčidlo), upínací čelisti mají mít dostatečnou šířku. Při upínání tenkostěnných trubek je výhodné použít sklíčidla se širokými upínacími čelistmi a podepřít volný konec trubky odpruženým trnem, nebo použít lunet (souběžná luneta proti suportu) [20].



Obr. 3.3 Vliv pružné deformace tenkostěnného polotovaru na geometrický tvar obráběné plochy [14]

6. Odchytky způsobené rozměrovým opotřebením nástroje. Úbytkem špičky nástroje vlivem rozměrového opotřebením KV se např. při soustružení vnější válcové plochy vykazuje obrobek větší průměr a vnitřní válcová plocha menší průměr. Již v prvních fázích obrábění nastává přetvoření špičky nástroje vlivem úbytku materiálu od původní řezné hrany v místě, kde končí kontakt hlavní řezné hrany s obráběnou plochou. Konečný profil opotřebeného nástroje má vlnitou řeznou hranu, která je radiálně „posunutá“.

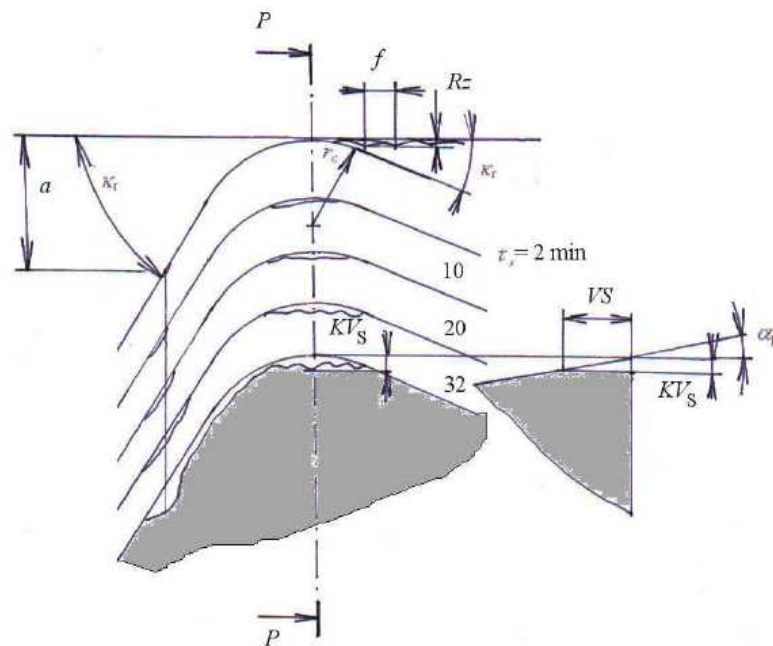
Při uvažování jen rozměrového opotřebením nástroje se rozměr obráběné součástky změní o hodnotu

$$\Delta d = 2 \cdot KV = 2 \cdot VS \cdot \operatorname{tg} \alpha_p \quad (3.8)$$

KVradiální opotřebením špičky nástroje [mm]

VSšířka opotřebením na hřbetě nástroje [mm]

α_pnástrojový zadní úhel hřbetu [°]



Obr. 3.4 Příklad postupného zvětšování rozměrového opotřebení soustružnického nože v závislosti na čase obrábění [2]

Rozměrové opotřebení lze určit:

- výpočtem ze šířky opotřebení na hřbetě v místě špičky nástroje (VS)
- měřením kuželovitosti obrobku
- měřením rozměru nástroje v zadní rovině

3.2. Mikrogeometrie obrobeného povrchu

Kvalita obrobeného povrchu jako integrovaná charakteristika strojových součástí je definována:

- geometrií obrobeného povrchu,
- fyzikálně-mechanickými vlastnostmi povrchové vrstvy,
- fyzikálně-chemickým stavem povrchu.

Je nutné počítat s tím, stav a kvalita povrchové vrstvy obrobeného povrchu mají vliv na únavovou pevnost, odolnost proti opotřebení, protikorozní stabilitu a životnost dynamicky namáhaných součástí [2].

Vliv plastické deformace na obrobený povrch způsobuje především adhezní síly mezi obrobkem a nástrojem a na tvoření nárůstku. Nárůstek se odděluje od ploch řezného nástroje, přilepuje se na obrobený povrch a vytváří na něm vyvýšeniny. Ty se mohou v procesu řezání odtrhávat a na povrchu se objeví vytrhané plošky. Případně u křehčích

materiálu může docházet k odtrhávání některých zrn a tvorbě nepravidelných prohlubenin na povrchu [14].

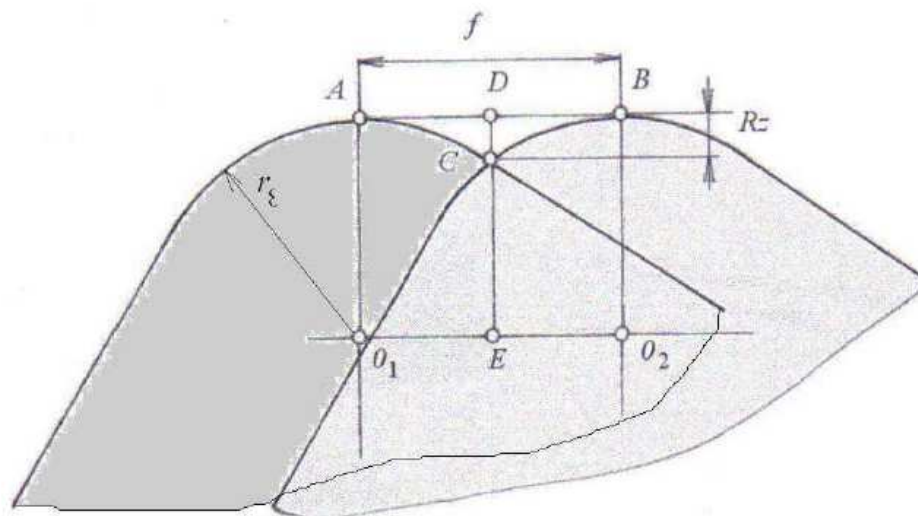
Jednou z možností jak tomuto předejít je moderní metoda laserového předehřevu, která se dnes úspěšně využívá zejména pro obrábění vysokopevnostních slitin a jiných těžkoobrobitelných materiálů, včetně keramických. Tento lokální předehřev snižuje pevnost a tvrdost materiálu a je nasměrován před břit nástroje. Tím se sníží opotřebení nástroje a je možno obrábět i vyšší řeznou rychlostí. Jeho výhody se nejvíce uplatní při obrábění technické keramiky, materiál např. Si_3N_4 nebo ZrO_2 , jejichž broušení je nákladné a málo produktivní. Při předehřevu na teplotu mezi 800 a 1000°C dochází ke změknutí sklovité fáze povrchových vrstev a pro jejich obrábění tak postačí klasických metod a to dokonce bez nutnosti použití chladicí kapaliny. Tímto postupem lze dosáhnout drsnosti povrchu až 0,2 μm a to s lepšími pevnostními parametry povrchu než u broušení [42].

3.2.1 Vliv geometrie nástroje na kvalitu obrobené plochy

Jednoduchý geometrický přístup k identifikaci mikrogeometrie obrobeného povrchu vychází z prostého kopírování tvaru řezného klínu na obrobený povrch [2].

Mohou nastat tyto tři případy [14]:

- špička nože není zaoblená, tedy $r_e = 0$. Tento limitní případ znamená, že posuv je možné zanedbat, protože je mnohem menší než poloměr zaoblení nástroje a odpovídá hrubování velkými posuvy. Nerovnost povrchu je vytvářena hlavní a vedlejší řeznou hranou,
- špička nože je zaoblená a poloměr nože je menší než posuv: $r_e \leq f$. Nerovnost povrchu je vytvářena zaoblenou špičkou, jak úseky hlavní, tak vedlejší řezné hrany. Tento případ lze považovat za polohrubování,
- špička nože je zaoblena, přičemž poloměr $r_e \geq f$. Profil povrchu je vytvářený jen zaoblenou špičkou nástroje. Tento případ odpovídá dokončování povrchu a proto je z hlediska kvality povrchu nejdůležitější.



Obr. 3.5 Schéma dokončování povrchu [14]

Při dokončovací operaci bude:

$$R_z = ED - EC = ED - \sqrt{CO_1^2 - EO_1^2} \quad (3.9)$$

$$ED = AO_1 = r_\varepsilon \quad (3.10)$$

Po dosazení

$$R_z = r_\varepsilon - \sqrt{r_\varepsilon^2 - \frac{f^2}{2}} \quad (3.11)$$

Teoretická rovnice na výpočet výšky nerovností profilu se v praxi užívá v jednodušším tvaru.

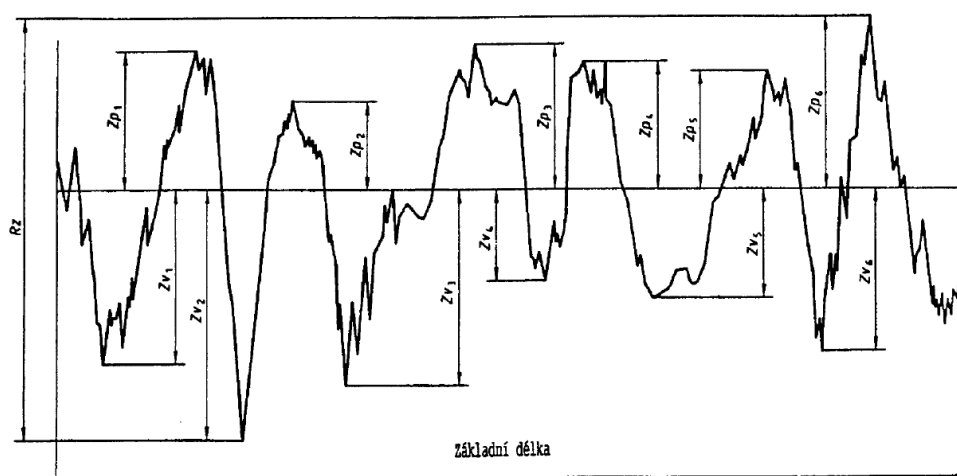
$$\frac{f^2}{4} = 2.R_z.r_\varepsilon - R_z^2 \quad (3.12)$$

Vzhledem k tomu, že člen R_z^2 je v porovnání s členem $2.R_z.r_\varepsilon$ zanedbatelný, lze jej vynechat

$$R_z = \frac{f^2}{8.r_\varepsilon} = 0,125 \cdot \frac{f^2}{r_\varepsilon} \quad (3.13)$$

Tento často používaný vztah udává funkční závislost mezi teoretickou nerovností povrchu, posuvem a poloměrem zaoblení špičky nástroje. Vyplyývá z něho, že R_z s nárůstem f stoupá parabolicky. Naopak podle zákona hyperboly klesá s nárůstem r_ε [2].

Dle definice normy ČSN EN ISO 4287 [15] je R_z součet výšky Z_p nejvyššího výstupku profilu a hloubky Z_v nejnižší prohlubně profilu v rozsahu základní délky. Viz. obr. 3.6



Obr. 3.6 Největší výška profilu (příklad profilu drsnosti)[15]

Další velmi významnou a často užívanou charakteristikou povrchu je průměrná **aritmetická odchylka profilu Ra**. Jedná se o aritmetický průměr absolutních hodnot pořadnic $Z(x)$ v rozsahu základní délky.

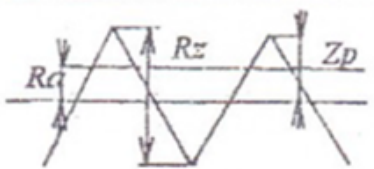
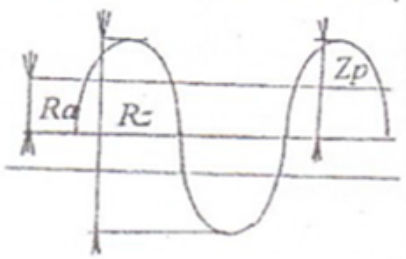
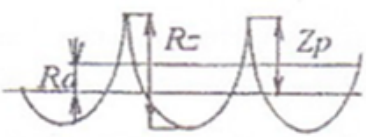
$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx \quad (3.14)$$

kde lzákladní délka ve směru osy X, použitá pro rozpoznání nerovností charakterizujících vyhodnocovaný profil (také l_p , l_r , l_w)

V případě, že je ve výkresu zadaná hodnota Ra , je třeba znát vztah mezi Ra a Rz . Ten lze zjistit například experimentálním ověřením. Pro základní výpočty obrábění lze zobecnit na:

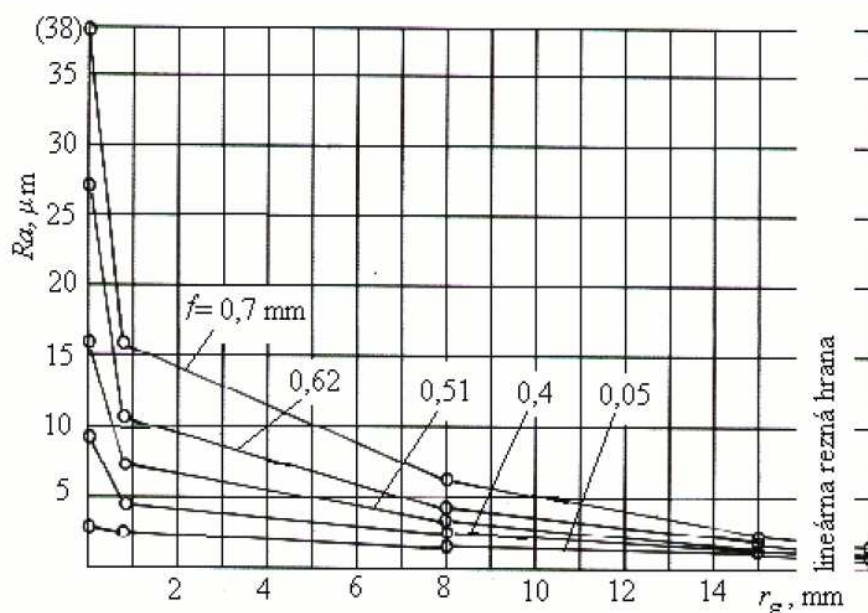
$$\frac{Rz}{Ra} \approx 4 \Rightarrow f_{\max} = \sqrt{32 \cdot Ra \cdot r_\epsilon} \quad (3.15)$$

Při přesnějším určování tohoto poměru však musíme vědět, o jaký tvar profilu či způsob obrábění jde. V tab. je tento poměr definovaný pro některé případy profilu povrchu. Je patrné, že vztah mezi Ra a Rz se liší v závislosti na profilu. Z toho vyplývá, že samotný údaj Ra nedostatečně charakterizuje profil povrchu.

Způsob obrábění	Idealizovaný profil	Rz [μm]	Ra [μm]	Z_p [μm]	Rz/Ra
Nástroje bez poloměru hrotu		20	5	10	4
Nástroj se zaobleným hrotem		20	6,3	10	3,2
Broušený povrch		20	3,65	15,4	5,4

Tab. 3.1 Vztah mezi Ra a Rz pro některé způsoby obrábění [2]

Na obrázku č. je znázorněna teoretická závislost drsnosti povrchu na poloměru zaoblení špičky nástroje a posuvu při soustružení. Tato úvaha vychází z teoretického předpokladu. Při reálném obrábění je kvalita obrobeneho povrchu modifikovaná vlivem plastické deformace [4].



Obr. 3.7 Závislost R_a na f , určená ze vztahu: $R_a = \frac{f^2}{32 \cdot r_e}$ [46]

3.2.1.1 Obrábění nástroji s velkým poloměrem zaoblení špičky

Je zřejmé, že při zvětšování poloměru špičky nástroje se bude kvalita obrobenej plochy zlepšovat. Ovšem při větších poloměrech roste délka řezné hrany, která je ve styku s obrobkem, což může vést ke vzniku kmitů v soustavě stroj-nástroj-obrobek [2].

Je třeba tomuto kmitání předejít, protože může způsobit zhoršení jakosti obrobenej plochy, zvýšení opotřebení nástroje, vylamování částic břitu nástroje nebo celkovou destrukci břitu nástroje či dokonce poruchu obráběcího stroje. A všechny tyto jevy mají na obrobenej povrch, při dokončovacím obrábění, fatální následky [19].

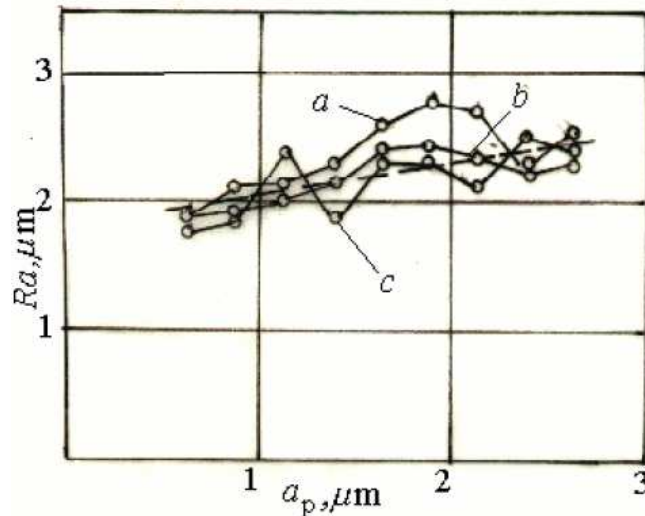
Kmitání a nárůstu R_z při minimálních posuvech f a velkých poloměrech břitu r_e lze zabránit skloněním nástroje o úhlu $\pm \lambda_s$. V podstatě dojde ke zkrácení aktivní délky řezné hrany v záběru a změně pracovních úhlů čela a špičky. Nástroj může být statický a nebo rotovat. Kromě toho může mít kladný a nebo záporný úhel sklonu řezné hrany [14].

V dnešní době existují moderní přístupy, jak lze optimalizovat vibrace na minimum. Jedním z nich je například metoda variance otáček, kdy při aktivaci systému, řídicí program CNC stroje reguluje otáčky vřetena. Tím naruší, případně odstraní posunutí vln a kmitů vzniklých na obrobenej povrchu např. štíhlého nástroje či obrobku. Systém tak pomáhá najít optimální řezné podmínky k potlačení kmitání při obrábění a tím zlepšuje produktivitu [22].

3.2.2 Vliv hloubky řezu na kvalitu obrobenej plochy

Na geometrické parametry obrobenej povrchu mají důležitý vliv řezné podmínky. Dle experimentálního ověření prof. Vasilka [2] byla získána závislost R_a na hloubce řezu

a_p . V tomto experimentu byl soustružen kuželový obrobek, který umožňuje plynule měnit hloubku řezu.



Obr. 3.8 Experimentální závislost $R_a = f(a_p)$, získaná při obrábění nízkouhlíkových ocelí. a - 12 050.1(E335); b - 11 523(Fe510); c - 12 040 (C35), d – střední průběh. $f = 0,1$ mm, $v_c = 100$ m.min⁻¹ [2]

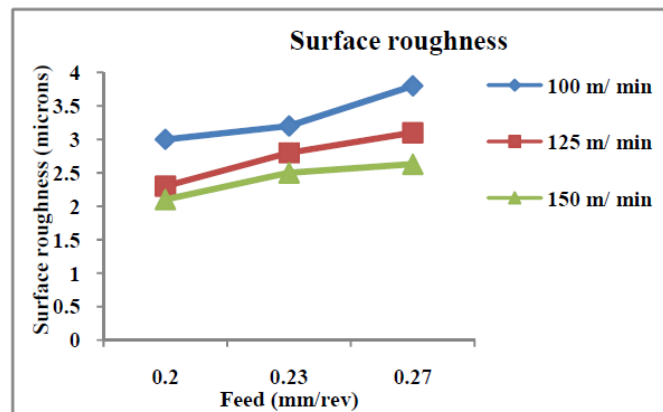
Závislost je mírně stoupající. Tvorba třísky od hlavní řezné hrany nemá vliv na geometrii obrobeného povrchu, protože hlavní řezná hrana je daleko od povrchu. Málo ovlivňuje výstupky na obrobeném povrchu třísky, která odchází šikmo od hlavní řezné hrany, tedy uhýbá od obrobeného povrchu a neovlivňuje ho [2].

3.2.3 Vliv posuvu na kvalitu obrobené plochy

Druhý důležitý parametr řezných podmínek na kterém závisí nejvíce výška nerovností obrobeného povrchu je posuv f . S tím, že hodnota posuvu také velmi ovlivňuje životnost nástroje. Experimentální závislost je zmíněna v předchozí kapitole ze vzorce

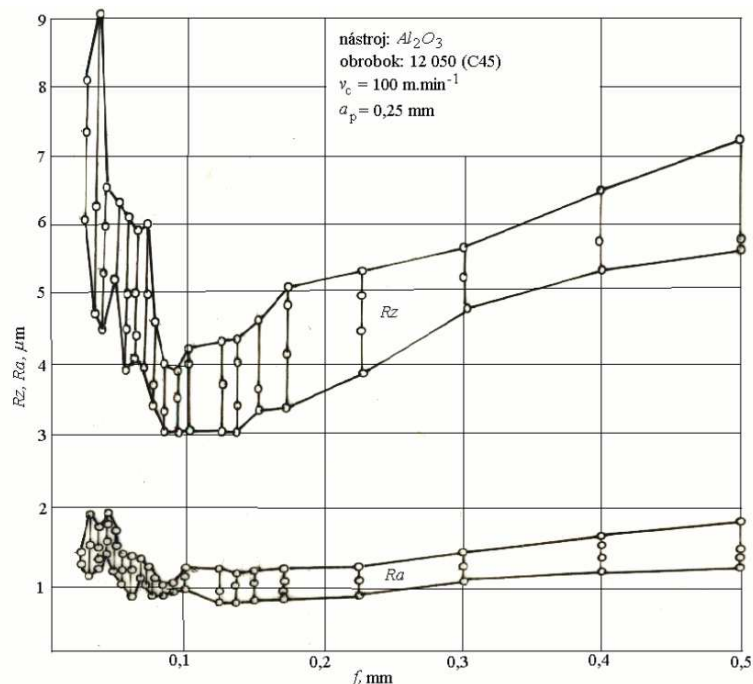
$$f = \sqrt{8 \cdot R_z \cdot r_\epsilon} \cong \sqrt{32 \cdot R_a \cdot r_\epsilon} \quad (3.16)$$

Tento trend rostoucí závislosti byl potvrzen experimentálním ověřením Kulkarniho, Kirana a Deeleepkumara [43]:



Obr. 3.9 Vliv posuvu a řezné rychlosti na drsnost povrchu Ra. Obrobek: šedá litina, nástroj: SNMG 120408, $r_\epsilon=08\text{mm}$

Rozdíl je v oblasti malých posuvů. Při dokončování povrchů je zajímavá právě oblast posuvů pod 0,2 mm. Podle experimentu prof. Vasilka [14] po překonání určité hranice směrem k malým posuvům už Ra a Rz neklesají, naopak mírně stoupají. Příčinou této skutečnosti je, že se dostáváme do podmínek, kdy poloměr zaoblení řezné hrany r_n je velikostí blízko hloubce odřezávané vrstvy. Tříška se přestává tvořit a materiál je vtlačován pod řezný klín. Za řezným klínem dochází k vytváření šupinek na obrobeném povrchu vlivem pružné a plastické deformace materiálu a jeho adheznímu spojení s materiálem nástroje. Tento problém se označuje jako „problém minimální třísky“ [14].



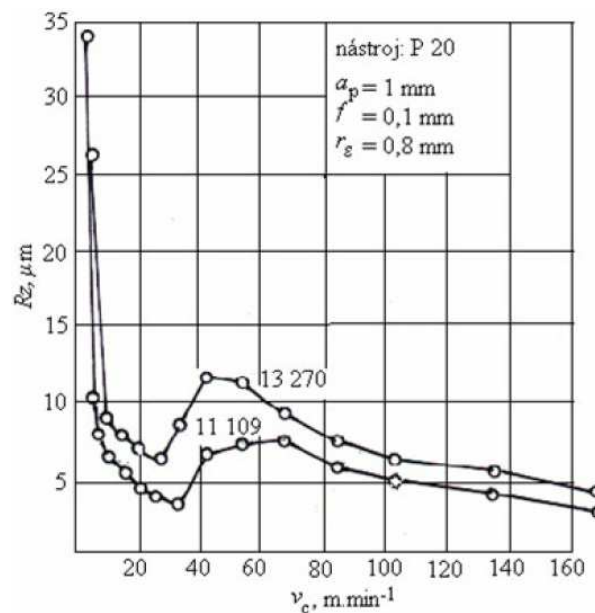
Obr. 3.10 Experimentální závislost Ra a Rz na f v oblasti malých a středních posuvů [14]

Jak je vidět z obr. 3.10, dalším zmenšováním posuvu k minimálním hodnotám při dokončování se nezlepšuje kvalita povrchu, naopak se prodlužuje strojový čas.

3.2.4 Vliv řezné rychlosti na kvalitu obrobené plochy

Třetím parametrem řezných podmínek, je řezná rychlost. Nepraktičtější pro zhodnocení vlivu řezné rychlosti na kvalitu povrchu je použití čelního soustružení s obrobkem o dostatečném průměru. Při zvolení konstantních otáček se řezná rychlost plynule mění ocelkám rozsahu. Lze tedy celou závislost získat z jediného průřezu.

Dle obr. 3.11 došlo k experimentálnímu zhodnocení nejen vlivu posuvu, ale také řezné rychlosti a zde se zvýšením řezné rychlosti lze pozitivně ovlivnit drsnost povrchu. To potvrdil také experiment experiment Selvaraje, Chandramohana a Mohanraje [44] při obrábění oceli ASTM A995 5A nástrojem SNMG 120408 MT TT5100. U obou experimentů je ovšem uvedeno pouze krátké rozpětí řezných rychlostí. Profesorem Vasilkem [2] byl tento průběh závislosti naměřen pro širokou škálu řezných rychlostí u zvolených ocelí.



Obr. 3.11 Experimentální závislost Rz na řezné rychlosti získaná při obrábění ocelí 11 109 a 13 270 nástrojem ze slinutého karbidu [2]

Lze pozorovat, že při minimálních řezných rychlostech se nerovnosti výrazně zvětšují. Je to zřejmě důsledek tvorby trhlin v třísece a pod řezným klínem. Povrch se výrazně zhoršuje. Následně výška nerovností prudce klesá a dosahuje minima při v_c okolo 20-30 m.min^{-1} . Další prudký nárůst Rz je způsobený vznikem nárůstku na řezném klíně. Po dalším zvýšení řezné rychlosti drsnost postupně klesá. Existují tedy dvě oblasti s minimálními hodnotami výšky nerovností a to [2]:

1. malé řezné rychlosti a tedy teploty před vznikem adhezního spojení nástrojového a řezného materiálu,
2. vysoké řezné rychlosti, odpovídající plastickému tečení materiálu třísky.

Tyto znalosti lze využít při volbě a optimalizaci řezných podmínek. Jednotlivé průběhy se liší od obráběných materiálů a jejich vlastností. Například u obrábění titanových slitin

existuje pouze úzká oblast řezných rychlostí, při kterých je povrch kvalitní. U dřeva je situace jednodušší, kde se s zvyšující řeznou rychlostí kontinuálně klesají nerovnosti. [2]

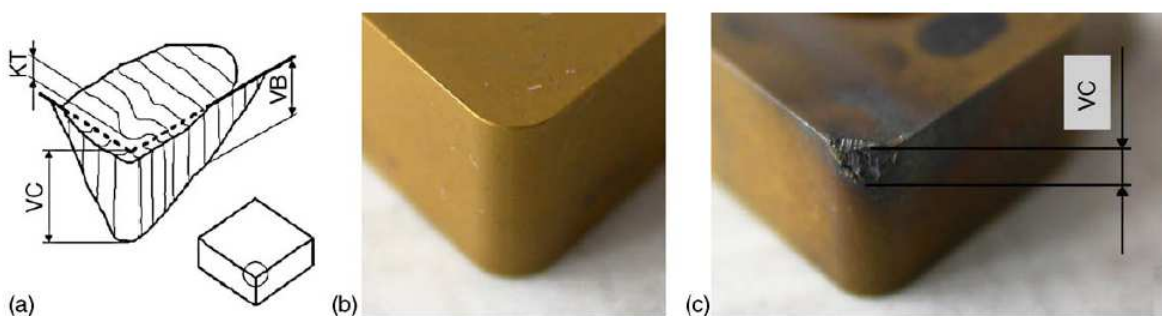
3.2.5 Vliv opotřebení nástroje na kvalitu obrobené plochy

Existuje předpoklad, že aktuální stav a opotřebení řezného nástroje bude mít významný vliv na kvalitu obrobené plochy. V důsledku skutečnosti, že hodnota posuvu f se volí menší než poloměr břitu nástroje r_e , vznikající nerovnosti povrchu opotřebovávají špičku nástroje a vytváří na něm postupně rýhy. K experimentálnímu zjištění životnosti nástroje se používají dva druhy testů, krátkodobé či dlouhodobé. [2, 30].

Vztah mezi životností nástroje a řeznými podmínkami je popsán jako funkční závislost

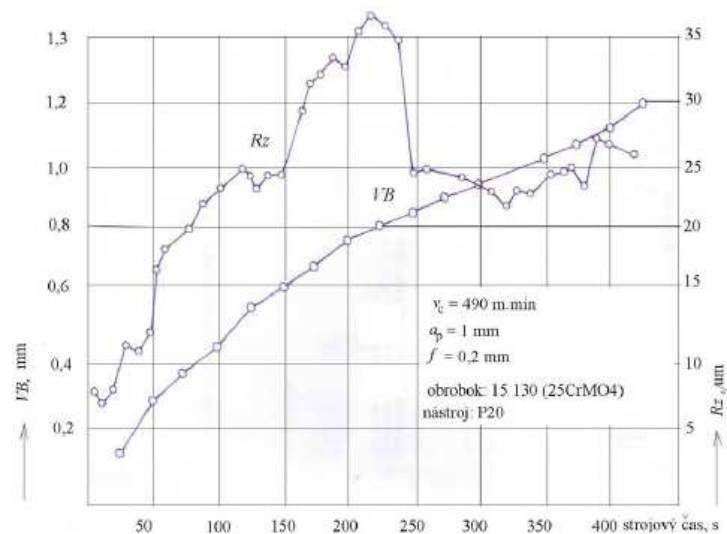
$$T = f(v_c, f, a_p) \quad (3.17)$$

Tento vztah je elementární pro optimalizaci z hlediska ekonomiky procesu a samotné obrábělnosti materiálu, kterou popisuje Taylorův vztah. Z ekonomického hlediska jsou nejdůležitější kritéria 1. minimálních výrobních nákladů, 2. maximální produktivity nebo 3. maximálního zisku [30].



Obr. 3.12 Tvar opotřebení špičky nástroje.. VB – šířka fazetky opotřebení na hřbetě, VC – opotřebení na hřbetě, KT – hloubka výmolu na čele, a – schéma opotřebení, b – nová břitová destička, c – poškozená břitová destička [30]

Během řezného procesu při malých řezných rychlostech se materiál chová jako křehký, plocha styku třísky s čelem nástroje je malá, stejně tak teplota řezání. Proto je jeho trvanlivost vysoká. Zvyšováním řezné rychlosti se projevuje houževnatost materiálu. Mezi obráběným a řezným materiálem dochází k adheznímu otěru, narůstá koeficient tření, zvyšuje se plocha styku třísky s čelem, stoupá třecí síla. Trvanlivost nástroje prudce klesá. Tento průběh je typický při obrábění nástroji z rychlořezné oceli [14].



Obr. 3.13 Experimentální závislost průběhu opotřebení nástroje na hřbetě a odpovídající výška nerovností Rz při řezné rychlosti do 490 m.min⁻¹; $\kappa_r = 60^\circ$, $k_r = 60^\circ$, $r_\epsilon = 0,8$ mm [2]

Z experimentálního ověření viz. obr. 3.13 je vidět, že při určitém stupni opotřebení nástroje došlo k výraznému poklesu mikrone rovností profilu. Na začátku obrábění se nerovnosti řezné hrany kopírují na obrobek, kvalita povrchu je tedy blízká teoretickému vztahu pro Rz. Dále dojde ke značnému opotřebení bříty, kvalita povrchu klesá a roste Rz. Zde se projevuje vznik opotřebené plošky a projekce soustavy rýh na plochu obrobku. Následnému zlepšení drsnosti Rz dochází vlivem zaplnění a napěchování materiálu do těchto rýh, s pokračující tendencí udržování zlepšené kvality povrchu. Tyto zákonitosti se dají využít na zvyšování produktivity soustružení [2].

Po výrazném opotřebení, při kterém nástroj není schopen obrobit povrch v požadované kvalitě, je třeba jej vyměnit za nový, nebo pokud to jeho koncepce dovoluje, nabrousit. V současné době je dostupná široká paleta břitových destiček, které nejsou tolik nákladné. Nicméně pokud se jedná o nástroj z jednoho kusu materiálu nebo s pájenými destičkami, vyplatí se jej za určitých okolností nabrousit. Nabroušení a opatření jej novým povlakováním totiž obvykle vychází na 1/5 nákladů nože nového, což může být z ekonomického hlediska významné [17].

3.3 Kontrola struktury povrchu a její definice

3.3.1 Metodika hodnocení parametrů

Mezinárodní norma ČSN EN ISO 4288 stanovuje pravidla pro metodiku měření hodnot s tolerančními mezemi stanovenými pro parametry struktury povrchu dle ISO 4287. Zároveň stanovuje standardní pravidla pro výběr mezních vlnových délek cut-off λ_c pro parametry profilu drsnosti podle ISO 4287, měřených dotykovými (hrotovými) přístroji dle ISO 3274.

Na následujících řádcích budou popsány a vysvětleny základní definice a postupy pro měření drsnosti povrchu periodických profilů dle normy ČSN EN ISO 4288 [48], které jsou typické pro soustružení.

Definice pojmů

Střední čára profilu drsnosti je čára odpovídající dlouhovlnné složce profilu potlačené filtrem profilu λ_c

Základní délka l_p , l_r , l_w je délka ve směru osy X, použitá pro rozpoznání nerovností charakterizujících vyhodnocovaný profil

Průměrná šířka prvků profilu R_{Sm} je aritmetický průměr šířek X_s prvků profilu v rozsahu základní délky

Odhad hodnot parametrů je vypočítáván pomocí dat naměřených jen na jedné základní délce.

Odhad průměrných hodnot parametrů je vypočítáván vyčíslením aritmetického průměru odhadu parametru ze všech jednotlivých základních délek. Když je pro parametry profilu drsnosti použit normalizovaný počet pěti základních délek, není potřebné doplňovat symbol parametru indexem. Pro parametr hodnocený na jiném počtu základních délek, musí být tento počet u značky parametru uveden jako index (např. R_{z1} , R_{z3}).

Pro parametry definované na vyhodnocované délce (P_t , R_t a W_t) je odhad hodnoty parametru vypočítáván pomocí naměřených dat z vyhodnocované délky rovné normalizovanému počtu základních délek. Pro křivky a odpovídající parametry je odhad hodnoty parametru vypočítáván pomocí naměřených dat z jedné křivky, která byla počítána na základě vyhodnocované délky

Pravidla pro porovnávání měřených hodnot s tolerančními mezemi

Struktura povrchu kontrolovaných obrobků se může jevit jako homogenní, nebo může být na jednotlivých plochách zcela rozdílná. To může být zjištěno vizuální zkouškou povrchu. V případech, kdy se struktura povrchu jeví homogenní, hodnoty parametrů určené z celého povrchu budou použity pro porovnání s požadavky uvedenými na výkresu, nebo ve výrobní dokumentaci. Jsou-li na povrchu jednotlivé plochy s nápadně rozdílnou strukturou, hodnoty parametrů, které jsou určeny pro každou jednotlivou plochu, budou pro porovnání s požadavky specifikovanými na výkresu, nebo ve výrobní dokumentaci použity odděleně.

Pravidlo 16%

Pro požadavky specifikované horní mezí parametru jsou povrchy považovány za přijatelné, jestliže ne více než 16 % všech naměřených hodnot vybraných parametrů zjišťovaných na vyhodnocované délce přesahuje hodnotu uvedenou na výkresu nebo ve výrobní dokumentaci. Pro požadavky specifikované dolní mezí parametru, jsou povrchy považovány za přijatelné, jestliže ne více než 16 % všech naměřených hodnot vybraných parametrů, zjišťovaných na vyhodnocované délce je menších než hodnota uvedená na výkresu nebo ve výrobní dokumentaci.

„Parametry struktury povrchu nejsou použitelné pro popis vad povrchu. Z toho důvodu vady povrchu, tj. rýhy a póry nesmí být při kontrole struktury povrchu uvažovány. Pro rozhodnutí, zda povrch obrobku je či není ve shodě se specifikací, je použit soubor

jednotlivých hodnot parametru struktury povrchu, z nichž každý je určen na vyhodnocované délce. Spolehlivost rozhodnutí, zda kontrolovaný povrch vyhovuje či nevyhovuje specifikaci, a přesnost průměrné hodnoty parametru struktury povrchu získané na témže povrchu, závisí na počtu základních délek ve vyhodnocované délce, na které byly jednotlivé hodnoty parametru struktury povrchu získány a také na počtu vyhodnocovaných délek, tj. na počtu měření na povrchu.“

Pravidlo maxima

Při požadavcích specifikovaných největší hodnotou parametru (viz ISO 1302:1992), nesmí v průběhu kontroly žádná z měřených hodnot parametru na celém kontrolovaném povrchu přestoupit hodnotu uvedenou na výkresu nebo ve výrobní dokumentaci. Toto pravidlo platí pouze, když je to na výkrese uvedeno.

Nejistota měření

Pro dokázání shody nebo neshody se specifikací musí být měřené hodnoty parametrů porovnány se specifikovanými mezními hodnotami s uvážením nejistot měření podle pravidel daných v ISO 14253-1. V případě porovnávání výsledků měření s horními a dolními mezemi jsou nejistoty měření odhadovány bez uvážení nehomogenit povrchu, které už jsou započítány přídavkem 16 %.

Parametry profilu drsnosti

„Pokud se vyhodnocovaná délka pro R-parametry podle ISO 4287 nerovná pěti základním délkám, je jejich horní a dolní mez přepočítána a vztažena vyhodnocované délce rovnající se pěti základním délkám. Čím větší je počet měření a delší vyhodnocovaná délka, tím větší je spolehlivost rozhodnutí o tom, vyhovuje-li kontrolovaný povrch specifikaci, a tím menší je nejistota průměrné hodnoty parametru. Nárůst počtu měření však vede k nárůstu času a nákladů naměření.“

Pravidla a postupy pro kontrolu dotykovými přístroji

„Základní pravidla pro určení mezní vlnové délky cut-off pro měření parametrů profilu drsnosti: Je-li základní délka specifikovaná požadavkem na výkresu nebo ve výrobní dokumentaci, mezní vlnová délka cut-off λ_c je vybrána rovnou této základní délce. Není-li drsnost specifikována (na výkresu nebo ve výrobní dokumentaci) nebo základní délka není specifikována v dané specifikaci drsnosti, je mezní vlnová délka volena postupem. Obrobek je polohován tak, že směr řezu odpovídá největším hodnotám parametrů drsnosti (R_a , R_z). Tento směr bude kolmý k poloze povrchu. Měření je provedeno na té části povrchu, na které lze očekávat kritické hodnoty; to může být posouzeno vizuálním pozorováním. Pro určení hodnot parametrů profilu drsnosti je potřeba nejprve pohledem rozhodnout, zda profil drsnosti je periodický nebo neperiodický.“

Postup pro periodický profil drsnosti

„Pro povrchy s periodickým profilem drsnosti se použije následující postup:

- a) Na povrchu s neznámou grafickou drsností graficky odhadne parametr R_{Sm} .
- b) Pro odhadnutý parametr R_{Sm} použitím tabulky 1.4 se určí doporučená hodnota mezní vlnové délky cut-off.
- c) Je-li to nezbytné, tj. ve sporném případě, se změří hodnota R_{Sm} za použití hodnoty mezní vlnové délky cut-off, určené podle b).

d) Jestliže hodnota R_{Sm} z kroku c) odpovídá podle tabulky 1.4 menší nebo větší hodnotě mezní vlnové délky cut-off, než v kroku b), použije menší nebo větší hodnota mezní vlnové délky cut-off.

e) Získá se reprezentativní měření žádaných parametrů při použití hodnoty mezní vlnové délky (základní délky) odhadnuté v předchozích krocích.“

R_a [μm]	Základní délka drsnosti l_r [mm]	Vyhodnocovaná délka drsnosti l_n [mm]
$(0,006) < R_a \leq 0,02$	0,08	0,4
$0,02 < R_a \leq 0,1$	0,25	1,25
$0,1 < R_a \leq 2$	0,8	4
$2 < R_a \leq 10$	2,5	12,5
$10 < R_a \leq 80$	8	40

Tab. 3.2 Základní délka drsnosti pro měření R_a a křivek a odpovídající parametry pro neperiodické profily (např. broušené profily) [23]

Při kontrole povrchů, u níž neznáme rozmezí drsnosti a tedy základní délku, je třeba ji volit odhadem na základě zkušeností a v případě nevhodné volby, měření opakovat s již správnou základní délkou. Pokud dojde k vyhodnocení drsnosti na kratší, než je požadovaná základní délka jsou změřená data pouze informativní [23].

3.3.2 Vztah mezi rozměrovou tolerancí a drsností

Stanovení závislosti drsnosti povrchu na velikosti předepsané rozměrové tolerance nebylo zatím exaktně vyřešeno. Je to z důvodu toho, že mohou obsahovat řadu nepřesných součinitelů a proto jsou matematické vztahy příliš složité. V závislosti na použitém způsobu obrábění se mění výsledek, který se pohybuje v určitém rozsahu. Nepraktičtější, v tomto případě, se jeví zpracování tabulek na základě zkušenosti [1].

Závislost lze odvodit například způsobem podle obrázku a postupu [1]:

- předpokládejme, že po obvodu válcového hřídele je rozloženo toleranční pole šířky T ,
- největší výška nerovností R_y nesmí překročit hodnotu $T/2$,
- protože nelze stanovit matematický vztah mezi nahodilou výškou R_y a průměrnou výškou nerovností R_z , musíme předpokládat, že R_z musí mít rovno nejvýše polovině rozměru $T/2$. Tato hodnota se bude odrážet od způsobu obrábění. Při dokončovacím obrábění může nabývat hodnot až, řekněme $R_z \leq \frac{3}{4} \cdot \frac{T}{2}$ a při

hrubování příklad $R_z \leq \frac{1}{3} \cdot \frac{T}{2}$,

- poměr mezi R_a R_z není přesně daný a závisí na dalších podmínkách /pohybuje se v rozmezí $R_z/R_a = 4$ až 6, i více), vyplývá pro předepsanou drsnost na výkrese R_a závislost na toleranci T : $R_a \leq 1/2 \cdot T/2 \cdot (1/4 \dots 1/6) = T/16 \dots T/24$.

4 EXPERIMENTÁLNÍ VERIFIKACE

4.1 Vliv hloubky řezu na kvalitu obrobené plochy

4.1.1 Popis experimentu

Nástroj určený pro výrobu zápchů bude použit pro podélné soustružení. Výrobce tohoto nástroje, firma ISCAR, vyzdvihuje univerzálnost této konfigurace a široký rozsah použití s tím, že uživatel ušetří na nákupu velkého množství nástrojů pro specifické účely. Břitová destička má velký poloměr špičky a proto bude pozornost zaměřena na dokončovací obrábění s požadavkem na kvalitu obrobené plochy. Pro nástroj budou voleny různé hloubky řezu a bude hodnocen jeho vliv na kvalitu obrobené plochy a silové zatížení nástroje. Zároveň se zhodnotí možné odpružení nástroje, vzhledem k úzkému profilu, během zatížení a jeho vliv na geometrickou přesnost obrobené plochy.



Obr. 4.1 Konfigurace během měření na konvenčním soustruhu

4.1.2 Obráběcí stroj

Konvenční soustruh TOS Kuřim SU50 A

Konvenční soustruh vyrobený firmou TOS Kuřim, určený k přesnému soustružení obrobků střední velikosti. Vzhledem k tomu, že tento soustruh je staršího data výroby a neobsahuje nástrojovou hlavu, musel být pro nástroj CUT-GRIP vyroben speciální upínač.

Tento konvenční soustruh byl použit z důvodu dostupného dynamometru, který byl kompatibilní pouze s tímto obráběcím strojem. Naměřená data budou zároveň sloužit pro vzájemné porovnání naměřených hodnot s číslicově řízeným soustruhem.

Technická data:

- Pracovní prostor:

- Oběžný průměr nad ložem: 500 mm
- Oběžný průměr nad suportem: 250 mm
- Vzdálenost mezi hroty: 1500 mm
- Hodnoty posuvů:
 - Pracovní posuv – počet stupňů: 22
 - Pracovní posuv – rozsah: 0,0027 – 3,8 mm/min
 - Rychloposuv: 3000 mm.min⁻¹
- Vřeteno:
 - Vrtání vřetena: 56 mm
 - Otáčky vřetena – počet stupňů: 48
 - Otáčky vřetena – rozsah: 11,2 – 1400 ot/min
- Motor vřetena:
 - Celkový příkon: 2 x 5,5 kW
- Rozměry stroje: 1180 x 3900 mm
- Hmotnost stroje: 2980 kg



Obr. 4.2 Konvenční soustruh TOS Kuřim SU 50A

Číslicově řízený soustruh MAS SP 280SY

Pro experiment byl zvolen CNC soustruh od české firmy KOVOSVIT MAS, a.s. pod označením SP 280 SY. Tento moderní, dvouvřetenový, číslicově řízený soustruh je modulárního uspořádání a jeho konstrukce zajišťuje vysokou tuhost, vysoký krouticí moment na vřetenu, dynamiku a vysoké rychlosti v jednotlivých osách. Použitím valivého vedení je dlouhodobě zajištěno obrábění s vysokou přesností.

Řídicí program tohoto konkrétního CNC soustruhu je od firmy SIEMENS, verze SINUMERIK 840D.

Technická data:

- Pracovní prostor:
 - Oběžný průměr nad ložem: 570 mm
 - Max. délka soustružení: 490 mm
 - Max. průměr soustružení: 280 mm
- Pojezdy os:
 - Osy X1/Z1: 194/610 mm
 - Osa Y1: ±50 mm
 - Max. vzdálenost mezi vřeteny: 725 mm
- Rychloposuv:
 - Osy X1/Z1: 30/30 m.min⁻¹
- Hlavní vřeteno:
 - Max. otáčky: 4700 min⁻¹
- Nástrojová hlava:
 - Počet poloh: 12
 - Průměr otvoru VDI: 40 mm
 - Max. otáčky nástrojového vřetena: 4000 min⁻¹
- Motor hlavního vřetena:
 - Výkon S1/S6 – 40%: 20,9/27 kW
 - Max. krouticí moment S1/S6 – 40%: 200/257 Nm
- Rozměry stroje: 3875 x 2122 x 2345 mm
- Hmotnost stroje: 7900 kg

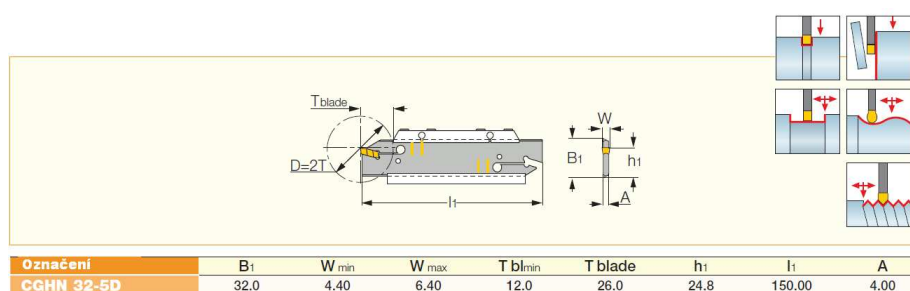


Obr. 4.3 Číslicově řízený soustruh MAS SP280 SY

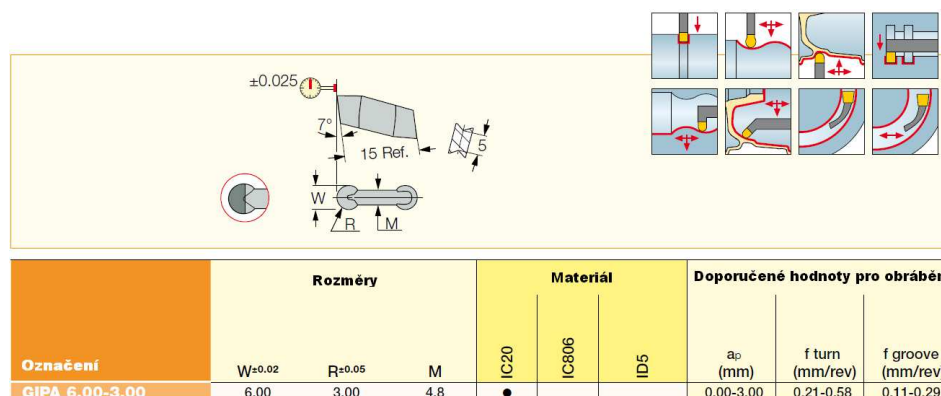
4.1.3 Nástroj

Pro experimentální verifikaci byl zvolen nástroj firmy ISCAR po označení **CGHN 32-5D**. Tento nástroj je součástí upínacího systému označovaného jako CUT-GRIP. CUT-GRIP je systém obráběcích nástrojů, který umožňuje výhodně kombinovat procesy podélného soustružení a upichování bez nutnosti výměny nástroje či změny polohy upnutí v nástrojové hlavě. Jedná se tedy o multifunkční nástroj, jež je navržen pro zvýšení produktivity a efektivity výroby [5].

Vyměnitelná břitová destička v něm upevněna nesla označení **GIPA (Full Radius W=3-6)** z materiálu IC20. Jedná se o materiál ze slinutého karbidu bez povlakování. Je určen pro polohrubovací, polodokončovací až dokončovací operace hliníkových slitin, litinových a nerezových ocelí. Nástroj je vhodný pro pomalé až střední otáčky včetně a posuvy.



Obr. 4.4 Technický popis upínacího nástroje [5]



Obr. 4.5 Technický popis vyměnitelné břitové destičky [5]

Ozn.	Složení [hm. %]				ρ [g cm ⁻³]	Zrnitost [μm]	Tvrdost [HV]	Pevnost [MPa]		E [GPa]	λ [W m ⁻¹ K ⁻¹]	α [10 ⁻⁶ K ⁻¹]	Užití podle ISO
	WC	TiC	TaC.NbC	Co				Ohyb	Tlak				
IC20	91,7		2,5	5,8	15,0	1,5	1750	2250	5700	630	95	5,8	K10-K20

Pozn.: ρ - měrná hmotnost; E - modul pružnosti v tahu; λ - měrná tepelná vodivost; α - součinitel délkové roztažnosti v rozsahu teplot 20÷800 °C

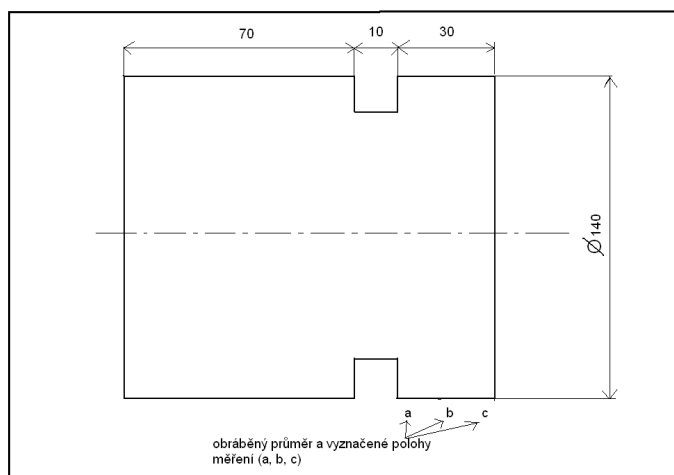
Tab. 4.1 Složení a vlastnosti materiálu IC20 [16]



Obr. 4.6 Použitý nástroj s vyrobeným upínačem pro použití na soustruhu TOS Kuřim SU 50A

4.1.4 Obráběný vzorek

Pro experiment byly použity vzorky válcového tvaru o průměru 140 mm a výšce 110 mm ze slitiny hliníku EN AW 7075 (ALZn5,5MgCu). Ve vzdálenosti 30-40 mm od čela polotovaru po upnutí byl proveden zápich, který byl určený pro bezpečný výběh nástroje. Dráha pro opracování byla tedy zvolena 30 mm od čela polotovaru.



Obr. 4.7 Rozměry zkušebního obrobku s vyznačenou obráběnou plochu

Mechanické vlastnosti		
Mez kluzu $R_{p0,2}$	331	MPa
Pevnost v tahu R_m	503	MPa
Tažnost A_{50}	11	%
Tvrdost	175	HV

Fyzikální vlastnosti		
Objemová hmotnost	2,81	g/cm ³
Modul pružnosti	71,7	GPa
Koeficient tepelné roztažnosti	23,4	10 ⁻⁶ /K
Tepelná vodivost	130	W/m.K

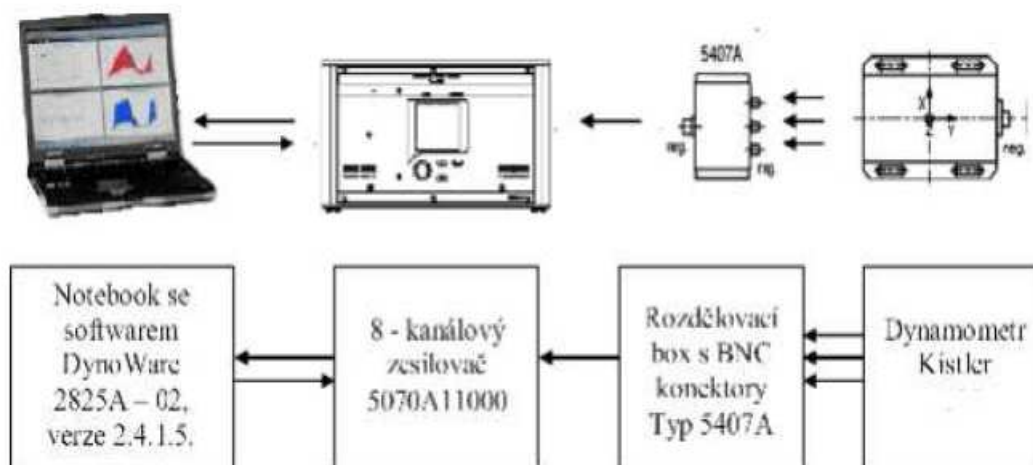
Tab. 4.2 Vlastnosti materiálu EN AW 7075 (ALZn5,5MgCu) [21]

4.1.5 Měřidla použitá při experimentu

Dynamometr Kistler 9272B

Ke změření silového zatížení v průběhu řezného procesu byl použit dynamometr od firmy KISTLER (katalogové označení 9272B) a 8 - kanálový zesilovač (katalogové označení

5070A). Sestava byla nastavena na nejvyšší možný počet snímaných dat (6000 Hz) a veškerá data by vyhodnocena na přenosném počítači pomocí softwaru Dynoware. Dynamometr byl obsluhou před začátkem měření mechanicky kalibrován pomocí speciálního zařízení. Schéma měřící aparatury je znázorněno na obr. 4.8



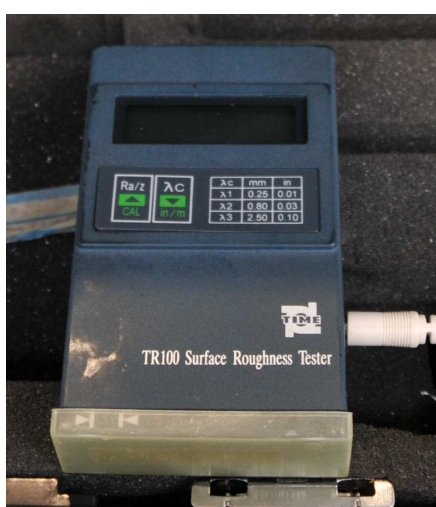
Obr. 4.8 Schéma zapojení aparatury [26]

Drsnoměr TR 100

Ke změření střední aritmetické drsnosti R_a mezi jednotlivým průjezdy byl použit ruční přenosný drsnoměr TR100. Drsnoměr byl před měřením zkalibrován pomocí etalonu.

Technická data drsnoměru TR100	
Parametry drsnosti	R_a, R_z
Jednotky	$\mu\text{m}, \mu\text{inch}$
Měřicí rozsah	$R_a: 0,05 - 15 \mu\text{m} / R_z: 0,1 - 50 \mu\text{m}$
Délka posuvu	0,25 mm, 0,8 mm, 2,5 mm
Hodnotící délka	1,25 mm, 4 mm, 5 mm
Přesnost	Přesnost odpovídá normě ISO, třída 3... $\pm 15\%$
Měřicí hrot	Diamantový, poloměr $5 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$
Rozměry přístroje	125 x 73 x 26 mm
Váha přístroje	200 g

Tab. 4.3 Technická data drsnoměru TR100 [27]



Obr. 4.9 Přenosný drsnoměr TR100

Mikrometr SOMET 125-150 mm a 100-125 mm

Ke změření geometrických odchylek povrchu byly použity dva mikrometry firmy Somet pro rozpětí průměrů 125-150 mm a 100-125 mm.

4.1.6 Řezné podmínky použité při experimentu

Pro toto měření byl v průběhu všech průjezdů zachován stejný posuv f a řezná rychlost v_c . Hloubka třísky se zvyšovala až k maximální možné hodnotě s ohledem na geometrii nástroje, tedy 3 mm. V průběhu řezného procesu byla použita emulzní chladicí kapalina.

Podélné soustružení			
	posuv vf [mm]	řezná rychlost vc [m/min]	hloubka třísky [mm]
průjezd č.1	0,3	200	0,5
průjezd č.2	0,3	200	1
průjezd č.3	0,3	200	2
průjezd č.4	0,3	200	3

Tab. 4.4 Řezné podmínky použité při podélném soustružení

4.1.7 Výsledky experimentu

4.1.7.1 Silové působení a drsnost povrchu při podélném soustružení

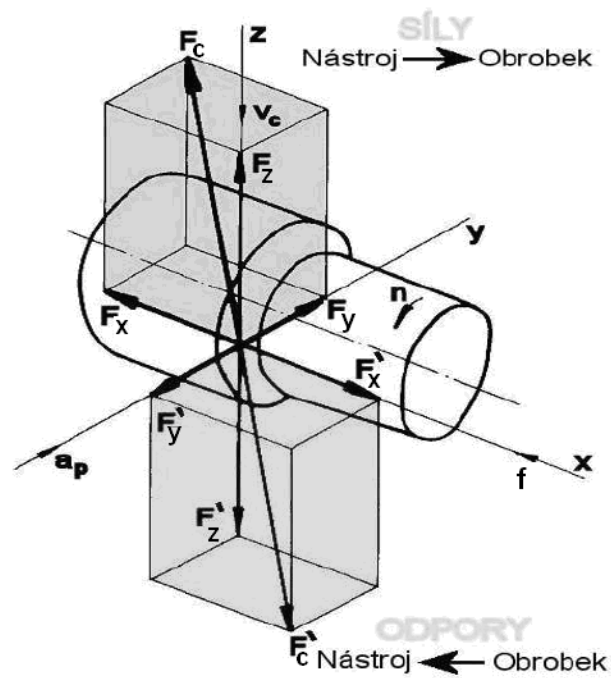
V průběhu experimentu byly pomocí dynamometru měřeny jednotlivé složky sil v osách X, Y, Z.

F_xsíla posuvu [N]

F_ypasivní síla [N]

F_zřezná síla [N]

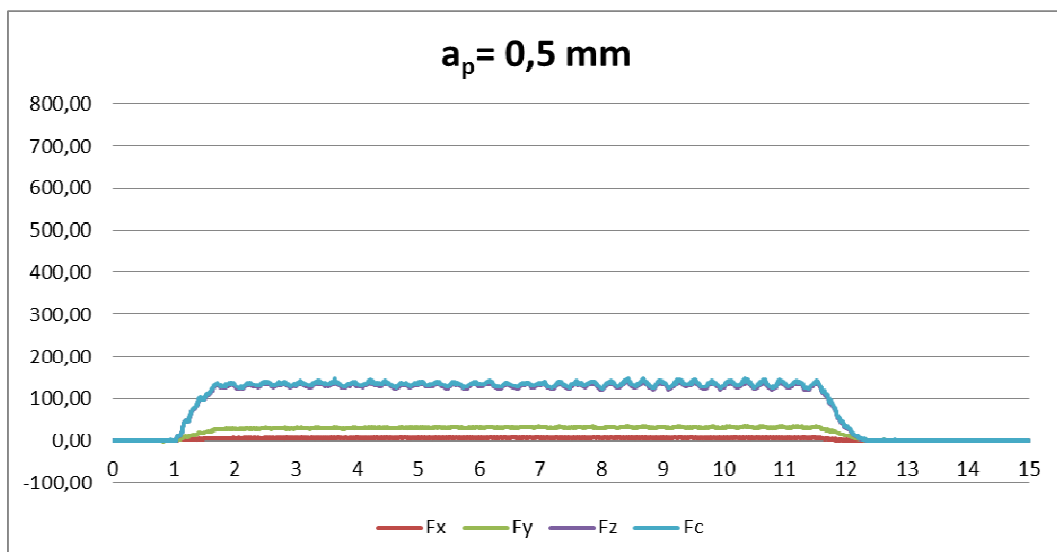
Při zachování hodnoty řezné rychlosti a posuvu se měřil nárůst silového zatížení vzhledem k odlišné hloubce řezu.



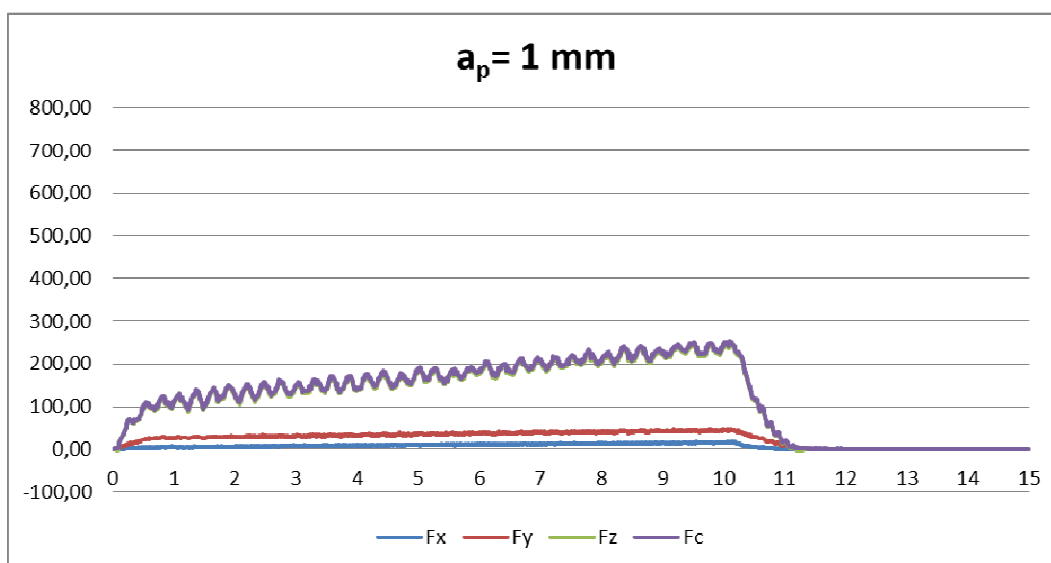
Obr. 4.10 Schéma rozložení složek síly řezání při soustružení [6]

f [mm]	v_c [m/min]	a_p [mm]	F_x [N]	F_y [N]	F_z [N]
0,3	200	0,5	5,40	25,80	111,51
0,3	200	1	7,98	31,94	156,68
0,3	200	2	24,74	40,50	299,79
0,3	200	3	49,92	49,01	466,98

Tab. 4.5 Naměřené silové působení při jednotlivých hloubkách třísky

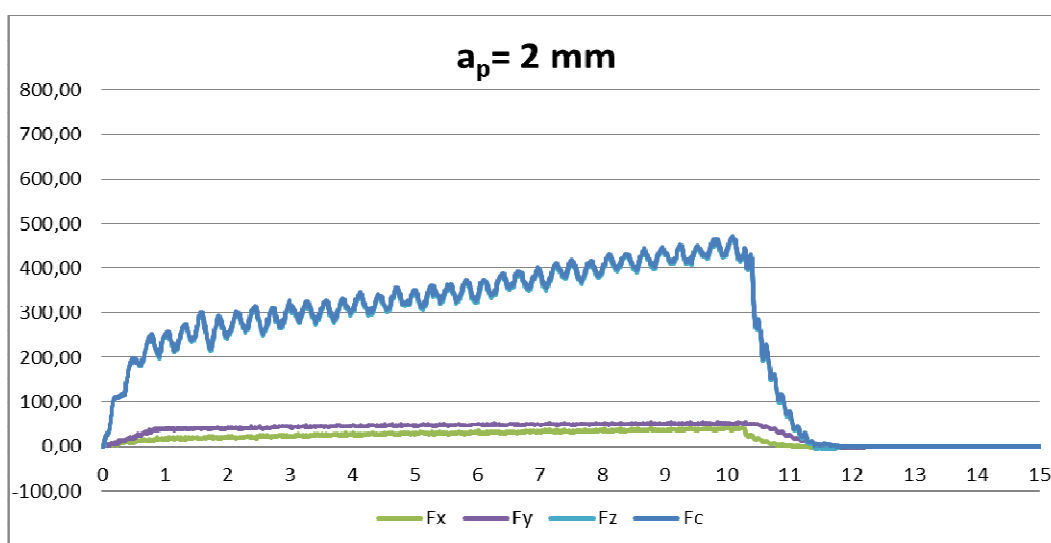
Obr. 4.11 Silové zatížení pro $a_p = 0,5$ mm

Drsnost povrchu Ra [μm]				
		poloha		
		a	b	c
TOS 50	ap = 0,5 mm	0,67	0,64	0,62
MAS SP280SY		0,53	0,61	0,63

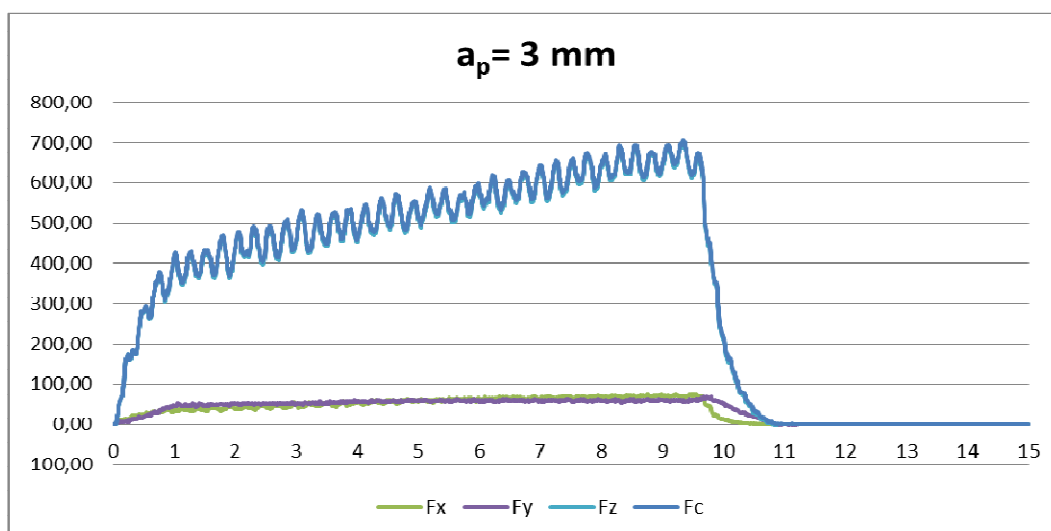
Tab. 4.6 Drsnost obrobeného povrchu v jednotlivých polohách měření pro $a_p = 0,5$ mmObr. 4.12 Silové zatížení pro $a_p = 1$ mm

Drsnost povrchu Ra [μm]				
		poloha		
		a	b	c
TOS 50	ap = 1 mm	0,65	0,74	0,67
MAS SP280SY		0,64	0,72	0,65

Tab. 4.7 Drsnost obrobeného povrchu v jednotlivých polohách měření pro $a_p = 1$ mm

Obr. 4.13 Silové zatížení pro $a_p = 2 \text{ mm}$

		Drsnost povrchu R_a [μm]		
		poloha		
		a	b	c
TOS 50	$a_p = 2 \text{ mm}$	0,71	0,67	0,59
MAS SP280SY		0,62	0,75	0,67

Tab. 4.8 Drsnost obrobeneho povrchu v jednotlivých polohách měření pro $a_p = 2 \text{ mm}$ Obr. 4.14 Silové zatížení pro $a_p = 3 \text{ mm}$

Drsnost povrchu Ra [μm]				
		poloha		
		a	b	c
TOS 50	ap = 3 mm	0,77	0,79	0,86
MAS SP280SY		0,72	0,62	0,74

Tab. 4.9 Drsnost obrobeného povrchu v jednotlivých polohách měření pro ap = 3 mm

4.1.7.1 Odpružení nástroje

V určených polohách a, b, c (viz. obr 4.7) bylo pomocí mikrometru Somet provedeno několik měření průměrů pro zhodnocení geometrické přesnosti obrobené plochy, resp. kuželovitosti.

Přesnost obrobené plochy [mm]					
		poloha			celkový rozdíl
		a	b	c	
TOS 50	ap = 0,5 mm	-0,007	-0,007	0,000	0,007
MAS SP280SY		0,000	-0,002	-0,005	0,005
		a	b	c	celkový rozdíl
TOS 50	ap = 1 mm	-0,035	-0,030	-0,020	0,015
MAS SP280SY		0,007	0,005	0,004	0,003
		a	b	c	celkový rozdíl
TOS 50	ap = 2 mm	-0,030	-0,040	-0,020	0,010
MAS SP280SY		0,008	0,000	-0,003	0,011
		a	b	c	celkový rozdíl
TOS 50	ap = 3 mm	-0,035	-0,048	-0,035	0,000
MAS SP280SY		0,006	-0,005	-0,007	0,013

Tab. 4.10 Naměřené hodnoty geometrické přesnosti obrobené plochy

4.1.8 Rozbor výsledků experimentu

4.1.8.1 Silové působení

Celkové silové zatížení F_c bylo vypočteno ze středních hodnot jednotlivých složek F_x , F_y , F_z pomocí následujícího vzorce.

$$F_c = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (4.1)$$

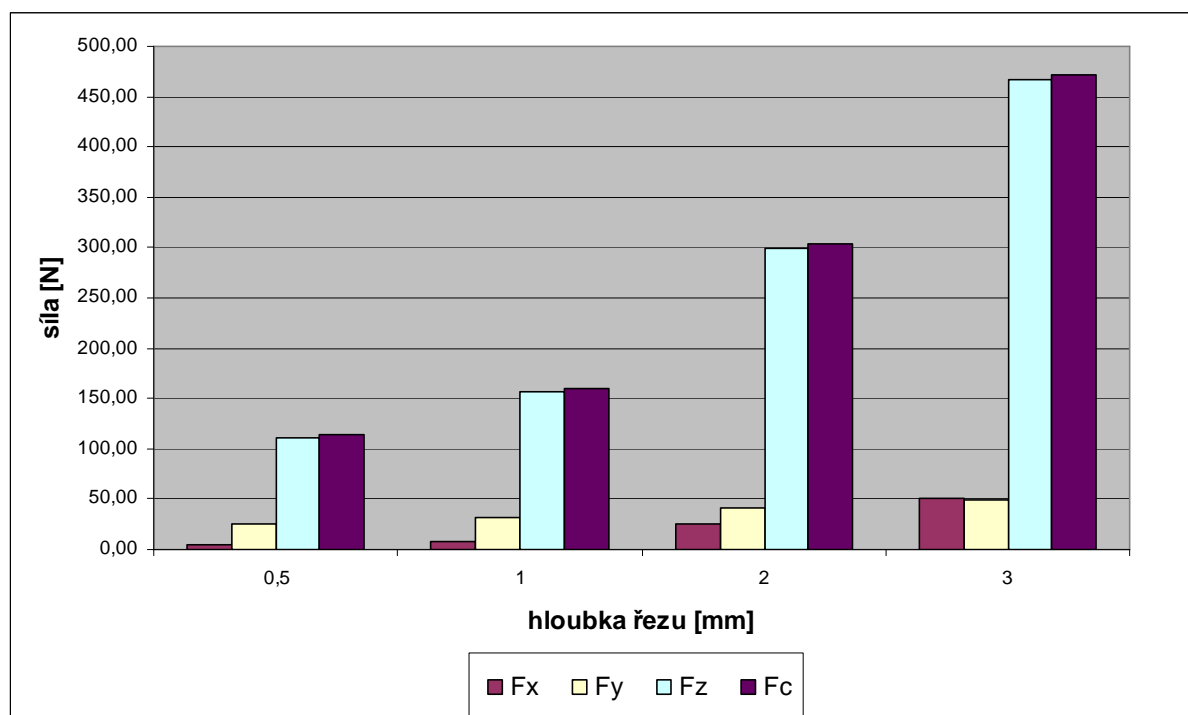
F_xsíla posuvu [N]

F_ypasivní síla [N]

F_zřezná síla [N]

f [mm]	vc [m/min]	ap [mm]	F _x [N]	F _y [N]	F _z [N]	F _c [N]
0,3	200	0,5	5,40	25,80	111,51	114,58
0,3	200	1	7,98	31,94	156,68	160,01
0,3	200	2	24,74	40,50	299,79	303,52
0,3	200	3	49,92	49,01	466,98	472,19

Tab. 4.11 Silové působení při jednotlivých hloubkách třísky



Obr. 4.15 Porovnání hodnot složek silového zatížení a jejich výslednice

Z naměřených hodnot lze jednoznačně vyčíslit nárůst celkové řezné síly F_c během zvyšování hloubky řezu. Hodnoty sil při hloubce řezu $a_p = 3$ mm jsou maximální dosažitelné při těchto hodnotách posuvu a řezné rychlosti, protože geometrie nástroje a především poloměr zaoblení špičky nástroje r_c nám nedovoluje větší hloubku řezu.

Pasivní síla F_y při hloubce třísky 0,5, 1 a 2 mm převyšovala sílu posuvu F_x na čemž má zřejmě podíl velký poloměr špičky nástroje, protože je při řezném procesu v záběru velká část ostří.

Síla posuvu F_x se zvyšováním hloubky řezu postupně rostla, až v nejvíce silově zatíženém průjezdu, při hloubce řezu $a_p = 3$ mm, její hodnota dokonce převýšila další složku řezné síly a to sílu posuvu F_y .

Během měření nedošlo k významnějšímu opotřebení nástroje. Ovšem předpokládá se, že se vzrůstajícími hodnotami posuvu či řezné rychlosti by došlo k významnějšímu opotřebení nástroje.

4.1.8.2 Drsnost povrchu v závislosti na hloubce řezu při podélném soustružení

Níže jsou uvedeny naměřená data pro oba použité obráběcí stroje. Při zvolených řezných podmínkách má hloubka třísky pouze nepatrný vliv na drsnost povrchu. Vzhledem k tomu, že břitová destička má kruhový tvar s velkým poloměrem, odrazilo se to pozitivně na kvalitě obrobenej plochy.

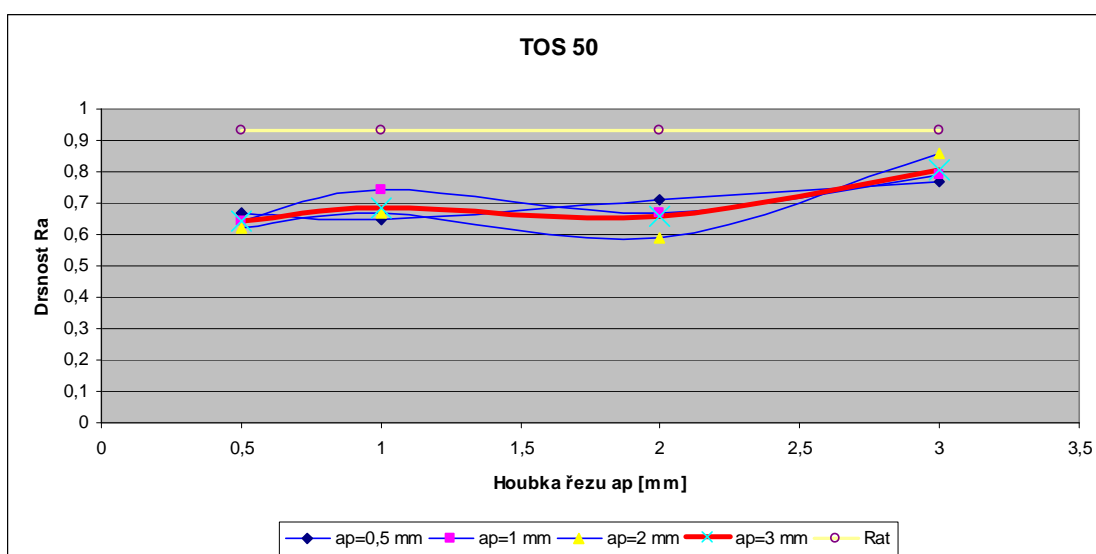
Drsnost povrchu R_a [μm]					
		poloha			stř. hodnota
		a	b	c	
TOS 50	$a_p = 0,5 \text{ mm}$	0,67	0,64	0,62	0,64
MAS SP280SY		0,53	0,61	0,63	0,59
TOS 50	$a_p = 1 \text{ mm}$	0,65	0,74	0,67	0,69
MAS SP280SY		0,64	0,72	0,65	0,67
TOS 50	$a_p = 2 \text{ mm}$	0,71	0,67	0,59	0,66
MAS SP280SY		0,62	0,75	0,67	0,68
TOS 50	$a_p = 3 \text{ mm}$	0,77	0,79	0,86	0,81
MAS SP280SY		0,72	0,62	0,74	0,69

Tab. 4.12 Souhrn naměřených hodnot drsnosti povrchu R_a

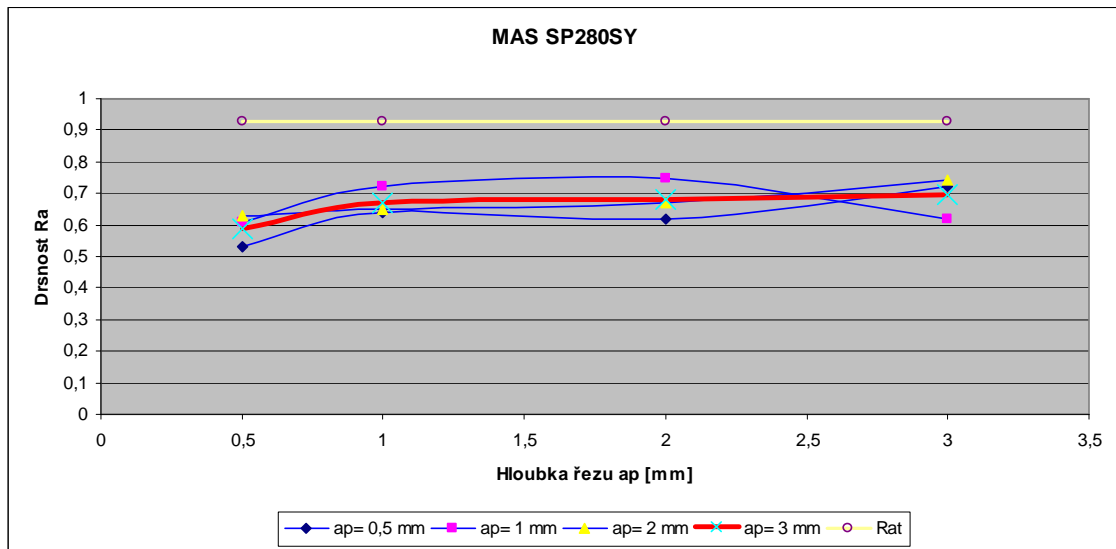
Pokud porovnáme naměřenou drsnost povrchu R_a , která se pohybovala v rozmezí 0,59 až 0,86 s teoreticky vypočtenou hodnotou pomocí vzorce

$$R_a = \frac{f^2}{32 \cdot r_\epsilon} = \frac{0,3^2}{32 \cdot 3} = 9,375 \cdot 10^{-4} \text{ mm} \approx 0,93 \mu\text{m} \quad (4.2)$$

zjistíme, že bylo dosaženo mnohem lepších výsledků ve všech hloubkách řezu. Tlustá červená křivka vystupuje jako střední hodnota naměřených hodnot ve všech bodech měření (a,b,c).



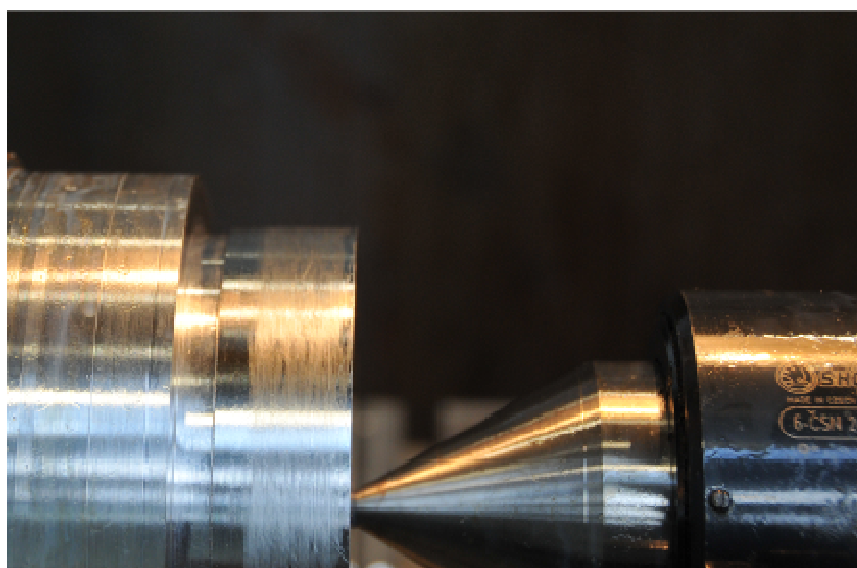
Obr. 4.16 Naměřená drsnost povrchu R_a v závislosti na hloubce řezu pro konvenční soustruh TOS 50 v porovnání s vypočtenou hodnotou (žlutě)



Obr. 4.17 Naměřená drsnost povrchu Ra v závislosti na hloubce řezu pro CNC obráběcí centrum MAS SP280 SY v porovnání s vypočtenou hodnotou (žlutě)

Při průjezdu č. 3 ($a_p = 2$ mm) a č. 4 ($a_p = 3$ mm) nesly zhruba dvě třetiny obrobenej povrchu známky poškrábání, viz. obr. 4.18 Tento jev způsobil nejspíše nevhodný odvin třísky směrem na obrobenej povrch. Nutno podotknout, že se neprojevil negativně na drsnosti povrchu. Zbylá část obrobenej povrchu si zachovala jak vizuální, tak geometrickou kvalitu a to protože byl v této části odvin třísky ovlivněn vytvořeným zápichem, který třísku usměrňoval pryč od řezného nástroje.

Z bezpečnostních důvodů nebylo možno výše popsany jev zaznamenat v průběhu řezného procesu.

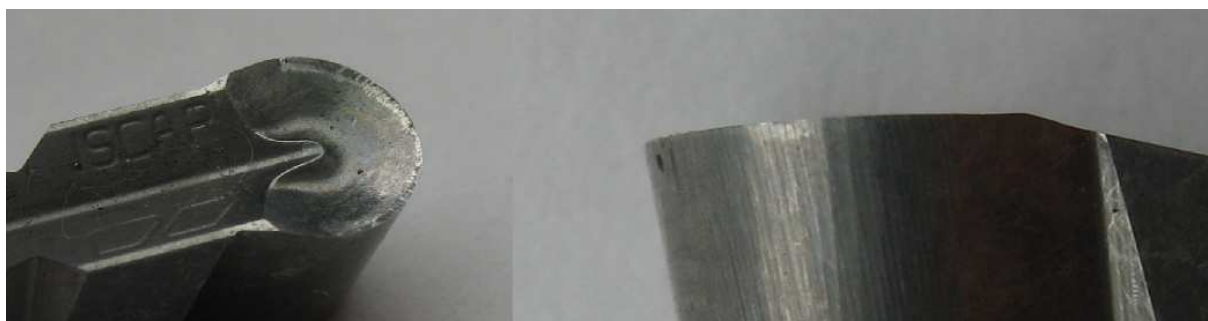


Obr. 4.18 Ukázka vizuálního poškození obrobenej povrchu při hloubce řezu $a_p = 3$ mm

4.1.8.3 Opatření nástroje

Použitá břitová destička prakticky nenesla žádné známky opotřebení. Pouze na čele nástroje se objevily drobné pozůstatky po nárůstu. Hřbet nástroje zůstal v neporušeném stavu. Řezná hrana nástroje, typicky pro břitové destičky určené pro obrábění hliníkových slitin, měla velmi malý rádius zaoblení a ani ta nebyla narušena.

Nutno podotknout, že doba, kdy byla destička v záběru lze odhadnout na 120 s a to v kombinaci s obráběným materiálem, slitinou hliníku, není významné. Lze předpokládat vznik opotřebení při delších obráběcích časech, nicméně tento parametr nebyl předmětem experimentu.



Obr. 4.19 Stav břitové destičky po ukončení měření

4.1.9 Optimalizace řezných podmínek

4.1.9.1 Optimalizace řezných podmínek v závislosti na silovém zatížení

Měrná řezná síla je úzce svázána s hloubkou řezu a posuvem. Nárůst hloubky řezu a_p tedy vede ke snížení měrné řezné síly a tedy, čím je průřez třísky menší, tím větší je měrná řezná síla a také příkon.

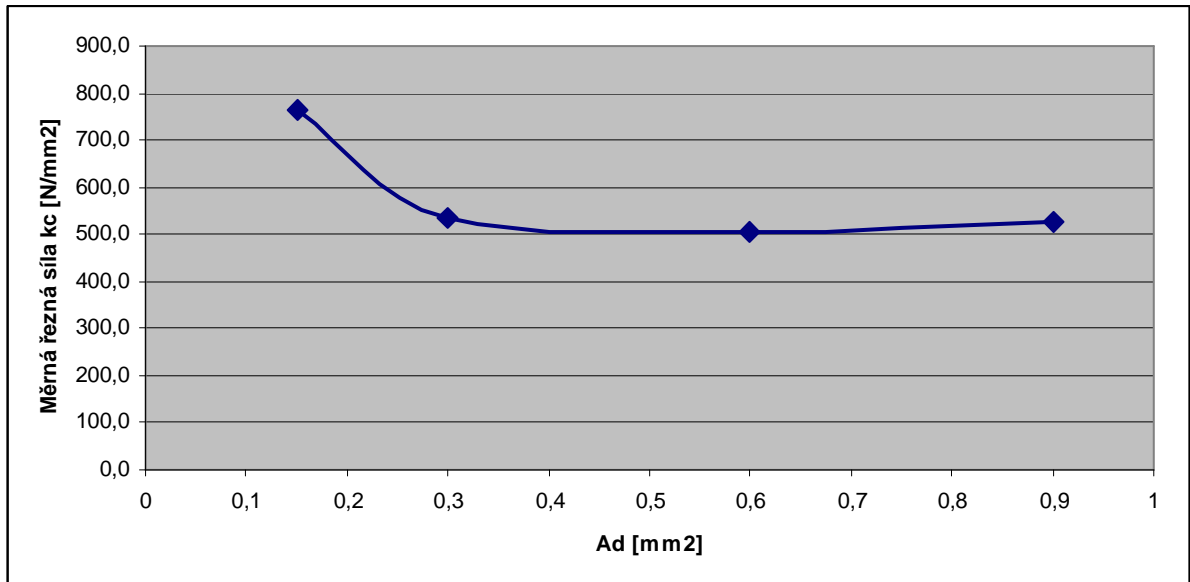
$$k_c = \frac{F_c}{A_D} = \frac{F_c}{a_p \cdot f} = \frac{114,58}{0,5 \cdot 0,3} = 763,9 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2} \quad (4.3)$$

A_Dplocha řezu [mm^2] (daná součinem posuvu a hloubky řezu)

f [mm]	vc [m/min]	ap [mm]	Fc [N]	kc [N/mm ²]
0,3	200	0,5	114,58	763,9
0,3	200	1	160,01	533,4
0,3	200	2	303,52	505,9
0,3	200	3	472,19	524,7

Tab. 4.13 Vypočtená měrná řezná síla pro parametry obrábění

Z hlediska měrné řezné síly vychází nejvýhodněji hloubka řezu $a_p = 2$ mm. Pokud bychom jej ovšem porovnali s nejnáročnějšími podmínka, tedy $a_p = 3$ mm, není rozdíl tolik významný. Proto lze doporučit volbu pro hloubku řezu 3 mm.



Obr. 4.20 Závislost měrné řezné síly na průřezu odřezávané vrstvy

4.1.9.2 Optimalizace řezných podmínek v závislosti na energetické náročnosti výroby

Výkon stroje

Z ekonomického hlediska má velký vliv příkon stroje, potřebný k provedení operace řezání. S volbou náročnějších řezných podmínek přímo úměrou roste také potřebný příkon stroje a tím celková ekonomická náročnost výroby.

Pomocí vzorců byl vypočítán požadovaný příkon stroje.

$$P = \frac{F_C \cdot v_c}{60 \cdot 10^3} \quad (4.4)$$

F_Ccelková síla [N]

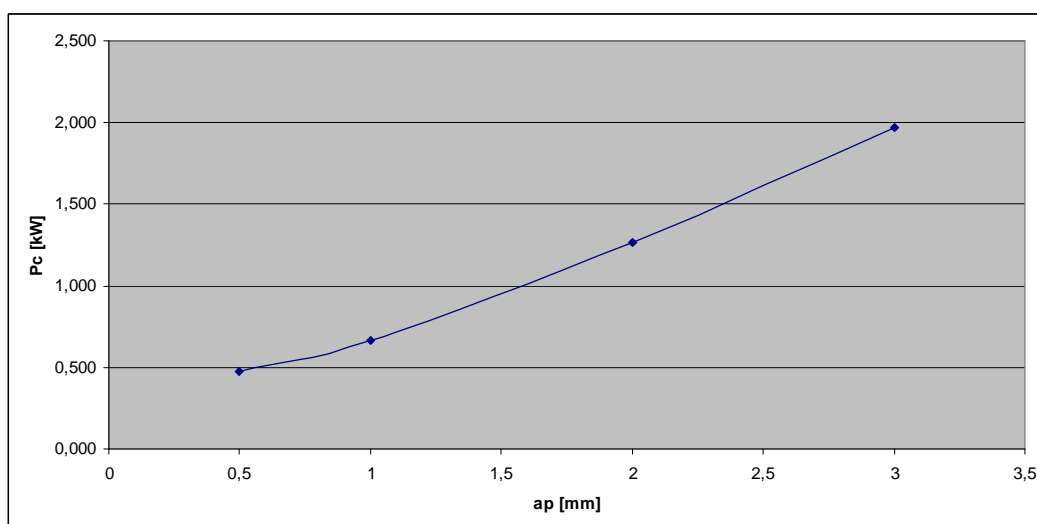
v_cřezná rychlost [m/min]

$$P_c = \frac{P}{\eta} \quad (4.5)$$

ηúčinnost

f [mm]	vc [m/min]	ap [mm]	Fc [N]	η	P[kW]	Pc [kW]
0,3	200	0,5	114,58	0,80	0,382	0,477
0,3	200	1	160,01	0,80	0,533	0,667
0,3	200	2	303,52	0,80	1,012	1,265
0,3	200	3	472,19	0,80	1,574	1,967

Tab 4.14. Požadovaný příkon stroje vzhledem k jednotlivým řezným podmínkám



Obr. 4.21 Závislost příkonu stroje na hloubce řezu

Nebyla známa konkrétní účinnost stroje a proto byla zvolena 0,8.

Nejmenší energetická náročnost byla spočtena pro hloubku řezu $a_p = 0,5$ mm. Z grafu lze odečíst téměř lineární stoupající závislost se zvyšující se hloubkou řezu.

Náklady na provoz stroje

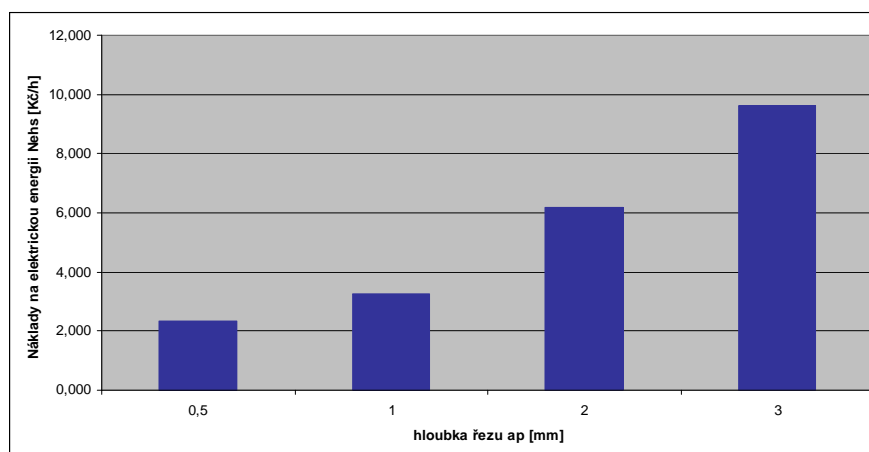
Se změnou řezných podmínek se mění silové zatížení. Se zvyšujícím silovým zatížením se kladou vyšší nároky na výkon stroje a tedy roste i spotřeba elektrické energie. Náklady na spotřebu elektrické energie N_{Ehs} jsou důležité při hodnocení produktivity výroby.

$$N_{Ehs} = P_c \cdot E_N = 0,477 \cdot 4,89 = 2,33 \text{ K}\check{\text{c}} \cdot \text{h}^{-1} \quad (4.6)$$

E_Nprůměrná sazba za elektrickou energii [kWh]

ap [mm]	Pc [kW]	Nehs [Kč/h]
0,5	0,477	2,330
1	0,667	3,260
2	1,265	6,185
3	1,967	9,619

Tab. 4.15 Vypočtené náklady na hodinu provozu stroje



Obr. 4.22 Náklady na hodinu provozu stroje

Je třeba upozornit, že vypočtené hodnoty jsou spjaty s příkonem elektromotoru hlavního vřetena během procesu řezání. Nejsou v něm zahrnuty náklady na spotřebu energie podpůrných zařízení obráběcího centra.

Další elektrické energie je spotřebována při nastavování stroje a upínání jednotlivých polotovarů. Při těchto činnostech je sice stroj v klidu a spotřebovává minimální množství elektrické energie, nicméně je třeba také s nimi při optimalizaci v podniku kalkulovat.

4.1.9.3 Optimalizace řezných podmínek v závislosti na množství obrobeneho materiálu

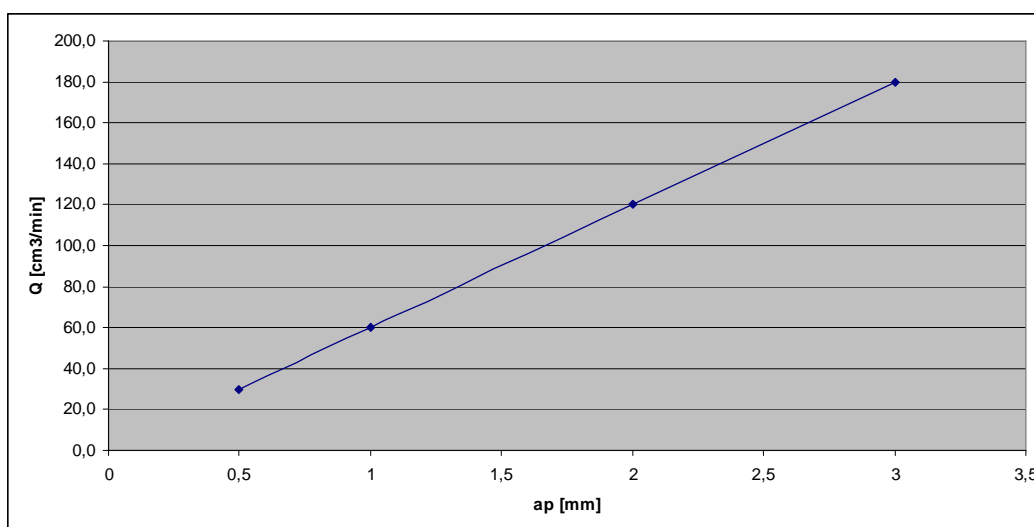
S množstvím obrobeneho materiálu roste produktivita, při tom je ovšem nutné hledět na energetické a výkonové charakteristiky.

$$Q = A_D \cdot v_c = a_p \cdot f \cdot v_c = 0,3 \cdot 200 \cdot 0,5 = 30 \text{ cm}^3 / \text{min} \quad (4.7)$$

Q.....množství odebraného materiálu [cm^3/min]

f [mm]	v_c [m/min]	a_p [mm]	Q [cm ³ /min]
0,3	200	0,5	30,0
0,3	200	1	60,0
0,3	200	2	120,0
0,3	200	3	180,0

Tab. 4.16 Vypočítané množství odebraného materiálu v závislosti na hloubce řezu

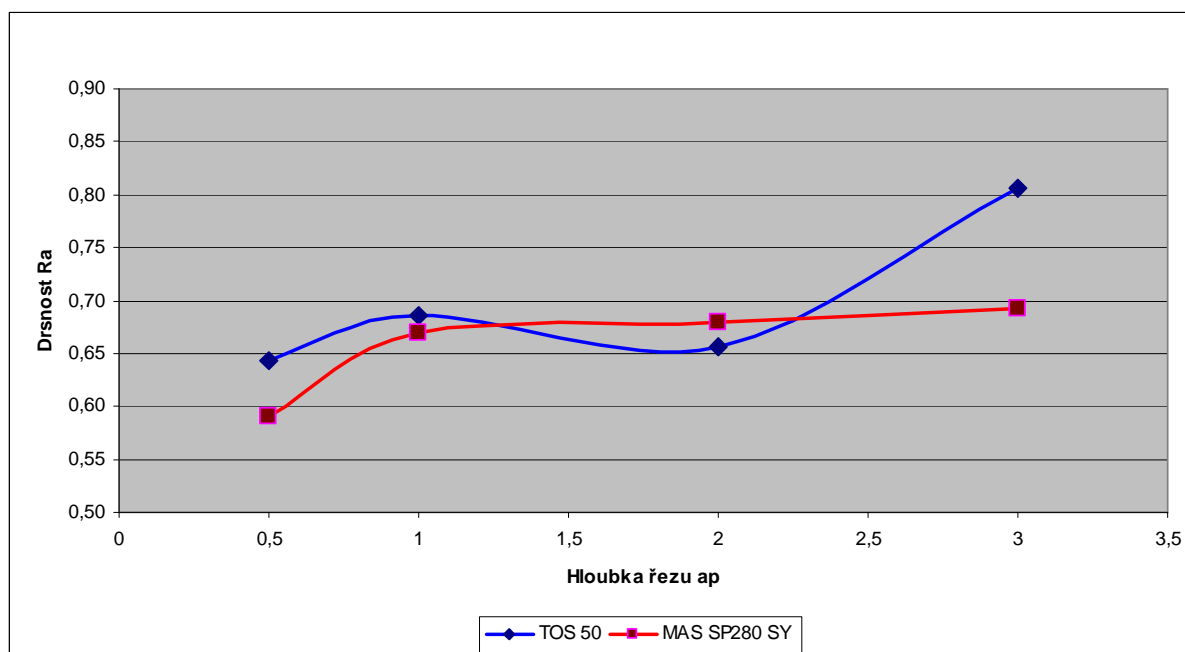


Obr. 4.23 Závislost množství odebíraného materiálu na hloubce řezu

Ze vzorce vyplývá, že množství odebíraného materiálu je lineárně závislé na jednotlivých činitelích a obdobně to bude také v tomto případě. Množství odebíraného materiálu lineárně roste a nejvyšší hodnoty dosahuje při hloubce řezu $a_p = 3$ mm a to konkrétně $180 \text{ cm}^3/\text{min}$.

4.1.9.4 Optimalizace řezných podmínek v závislosti na drsnosti obrobené plochy

Na obr. 4.24 je uvedeno porovnání naměřených drsností povrchu R_a u obou strojů. Z celkového hlediska vychází lepší hodnoty pro CNC obráběcí centrum. Příčina je zřejmě v přesnosti a tuhosti obráběcího centra a použitých moderních technologiích.



Obr. 4.24 Porovnání dosažených hodnot drsnosti povrchu pro konvenční soustruh a CNC obráběcí centrum

4.1.9.5 Odpružení nástroje

Pro velikost prohnutí g ohýbaného nosníku obdélníkového průřezu, platí po odvození dle [31]:

$$g = \frac{F.l^3}{3.E.J} = \frac{49,01.25^3}{3.210.10^3.170,7} = 0,007\text{mm} \quad (4.8)$$

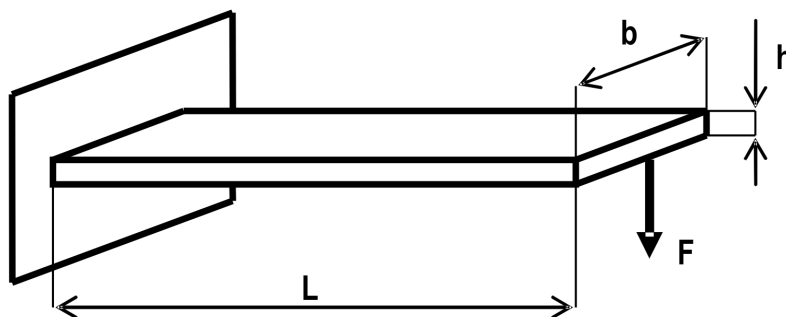
$$J = \frac{b.h^3}{12} = \frac{32.4^3}{12} = 170,7\text{mm}^4 \quad (4.9)$$

F.....působící síla [N]

l.....délka ohýbané části nosníku [mm]

E.....modul pružnosti v tahu materiálu [MPa]

J.....plošný moment určený tvarem průřezu nosníku [mm⁴]



Obr. 4.25 Teoretický grafický pohled na silové zatížení nástroje [45]

ap [mm]	Fx [N]	g [mm]	Δd [mm]
0,5	5,40	0,001	0,007
1	7,98	0,002	0,015
2	24,74	0,005	0,010
3	49,01	0,007	0,013

konvenční soustruh
CNC soustruh

Tab. 4.17 Vypočtené hodnoty teoretického prohnutí nástroje

Jedním ze sledovaných parametrů byla geometrická přesnost povrchu. Použitý nástroj je z materiálu AISI O1 a je vhodný především pro upichování a vypichování a proto má úzký profil. Při podélném soustružení mohlo vzniknout riziko odpružení nástroje a tím vzniku drobné kuželovitosti obrobku. Vypočtené odpružení nástroje v bodě dotyku g a naměřený rozdíl průměrů v různých polohách obrobene plochy tomuto jevu

nenasvědčují. Naměřené hodnoty lze tedy považovat za hodnoty na rozhraní měřitelnosti a požadovaná kvalita povrchu byla zachována.

Použitý nástroj je propagován jako univerzální a proto by se nežádané odpružení mohlo eventuálně projevit při větším vysunutí planžety z důvodu požadavku na hlubší zápich a následném použití nástroje pro podélné obrábění.

4.1.9.6 Optimalizace řezných podmínek z hlediska třískového hospodářství

Z přiloženého obrázku lze vidět, že pro pro hloubku řezu $a_p = 2$ mm a $a_p = 3$ mm vznikala dělená tříska, což je z hlediska nakládání s odebíraným materiálem výhodnější. Pro hloubku řezu $a_p = 1$ mm vznikala dlouhá vinutá tříska, která se v určitých intervalech oddělovala. Nejhorší v tomto případě vystupuje hloubka řezu $a_p = 0,5$ mm, kde vznikala průběžná tříska, která se namotávala na obrobek a nástroj,. To by za určitých okolnostech mohlo snížit kvalitu povrchu, pokud by se dostala zpět do prostoru řezu. Navíc tato situace prodlužuje dobu výměny hotového obrobku, protože obsluze zabere nějaký čas, než ji odstraní ze zmíněného prostoru.



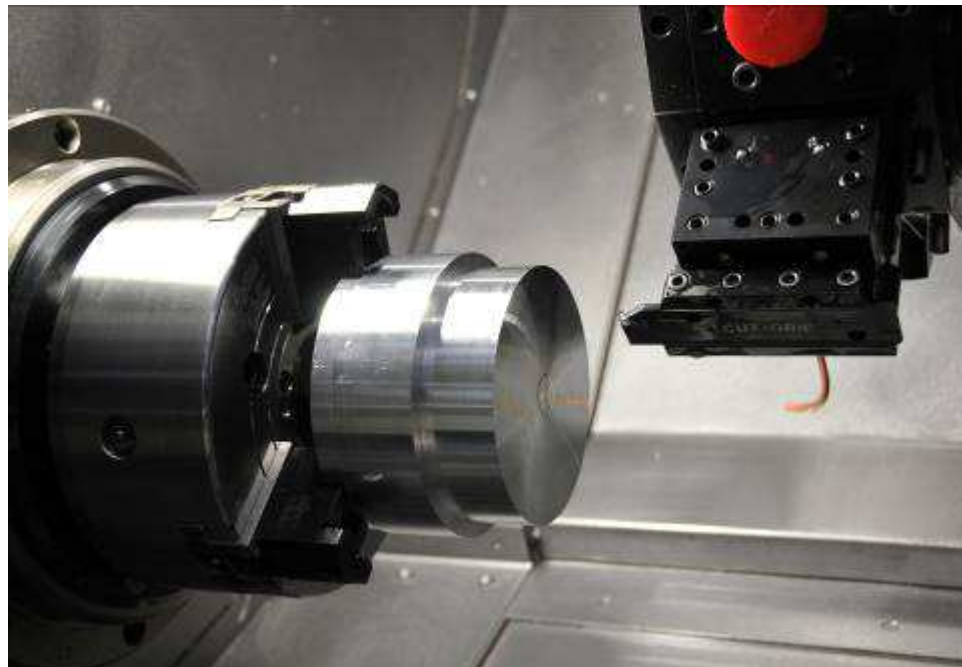
Obr. 4.26 Vzniklé třísky pro různé hodnoty hloubky řezu a_p

4.2 Vliv posuvu v oblasti tvorby minimální třísky na kvalitu obrobené vrstvy

4.2.1 Popis experimentu

Nástrojový systém CUT-GRIP z předchozího experimentu byl využit také pro čelní soustružení. Cílem bylo dosáhnout co možná nejlepší kvality obrobené plochy, kterou je nástroj schopný vytvořit. Byl použit shodný polotovár z hliníkové slitiny EN AW 7075 o průměru 140 mm. Zvolilo se několik hodnot posuvů menších hodnot s tím, že je zde předpoklad, že posuv může významně ovlivnit kvalitu obrobené plochy. Jednotlivými posuvy se obrábělo mezikruží čelní plochy s odstupem průměrů 20 mm metodou konstantní řezné rychlosti.

Tímto způsobem reguluje systém obráběcího centra otáčky vřetena v závislosti na poloze nože a nastaveném programu. Tento systém je již dnes na vysoké úrovni, nicméně může dojít odchylkám, které by ovlivnily kvalitu povrchu.



Obr. 4.27 Konfigurace při čelním soustružení

4.2.2 Obráběcí stroj

Číslicově řízený soustruh MAS SP 280SY

- viz. výše

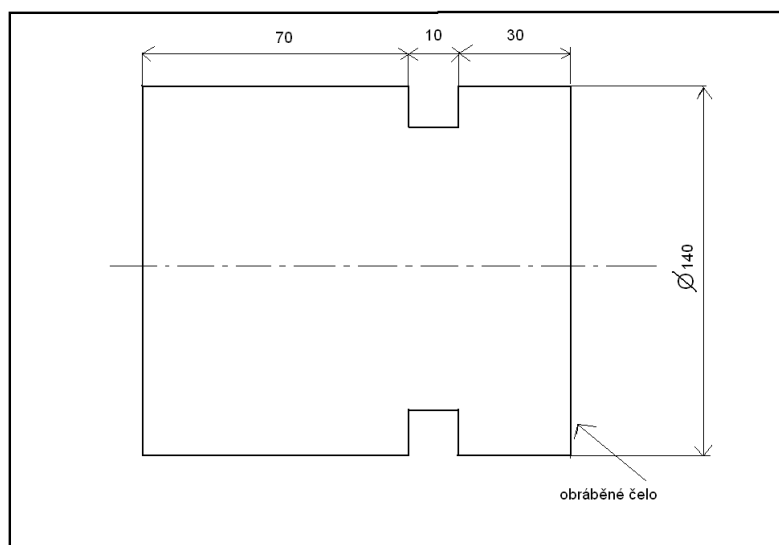
4.2.3 Nástroj

planžeta ISCAR CGHN 32-5D – viz. výše

břitová destička ISCAR GIPA 6.00-3.00 – viz. výše

4.2.4 Obráběný vzorek

Slitina EN AW 7075 (ALZn5,5MgCu) – viz výše.



Obr. 4.28 Obráběný vzorek s vyznačenou obráběnou plochou

4.2.5 Měřidla použitá při experimentu

Drsnoměr Tailor Hobson Precision – FORM TALYSURF 50

Tento dotykový drsnoměr je určen pro přesné měření tvarů, rozměrů i drsností. Byl použit pro změření průměrné aritmetické odchylky profilu povrchu R_a a největší výšky profilu R_z podle postupů popsanych v ČSN EN ISO 4288.

Technická data drsnoměru Taylor Hobson Precision – FORM TALYSURF 50	
Horizontální charakteristika	
Délka snímání	0,1 mm až 50 mm
Rychlost snímání / měření	10 mm/s max - 0,25 mm/s
Datová rozteč v X	0,5 μm
Uchylka přímosti (Pt)	0,4 μm na 50 mm
	0,2 μm na libovolných 20 mm
Vertikální charakteristika	
Nominální rozsah měření (Z)	1 mm
Rozlišení (Z)	16 nm v rozsahu 1 mm
	3 nm v rozsahu 0,2 mm
Poměr rozsahu k rozlišení	65.536 : 1
Standardní raménko	Kuželový diamantový hrot, R = 2 μm , délka 60 mm, síla 1 mN
Charakteristika systému	
Kulový kalibrační etalon	12,5 mm nominální rádius
Kalibrační nejistota - Pt	< 0,25 μm
Nejistota měření poloměru	0,1 - 12,5 mm = 2% až 0,04% nom. hodnoty 12,5 - 25 mm = 0,04% nominální hodnoty 25 - 1000 mm = 0,04% až 0,02% nom. hodnoty
Nejistota měření úhlu	do 1% měřeného úhlu ($\pm 35^\circ$ max. rozsah)
Nejistota v výškového parametru	do 2% +6 nm (jen parametry výstupku)
Rozměry L x D x H	Posuvová jednotka: 343 x 116 x 160 mm
Hmotnost	4,9 kg

Tab. 4.18 Technická data drsnoměru FORM TALYSURF 50 [49]



Obr. 4.29 Průběh měření pomocí přesného drsnoměru FORM TALYSURF 50

4.2.6 Řezné podmínky použité při experimentu

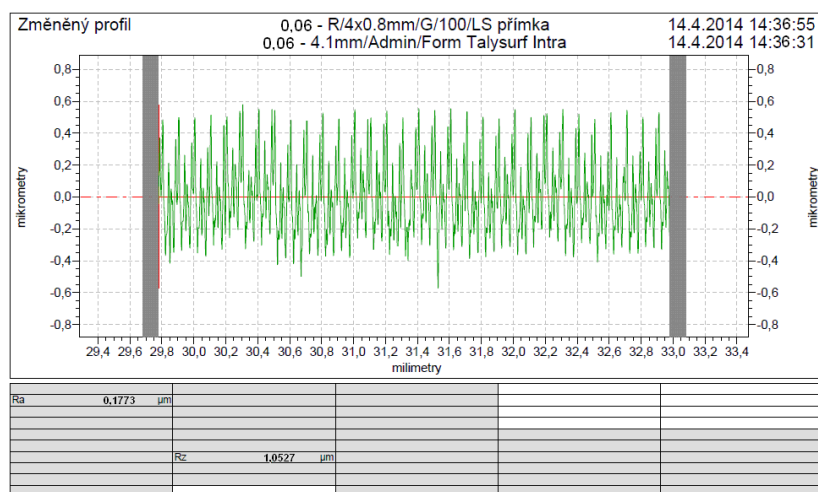
Při příčném soustružení se obrábělo čelo polotovaru konstantní řeznou rychlostí. Cílem bylo vyhodnotit kvalitu povrchu v oblasti malých hodnot posuvu v_f , navíc při čelním soustružení, kde může kvalitu obrobené plochy ovlivnit další parametr a to synchronizace řídicího systému při regulaci mezi otáčkami včetně a rychlostí posuvu.

Čelní soustružení			
obráběný průměr [mm]	posuv v_f [mm]	řezná rychlost v_c [m/min]	hloubka třísky [mm]
140-120	0,06	200	0,3
120-100	0,08	200	0,3
100-80	0,10	200	0,3
80-60	0,12	200	0,3
60-40	0,14	200	0,3
40-20	0,16	200	0,3

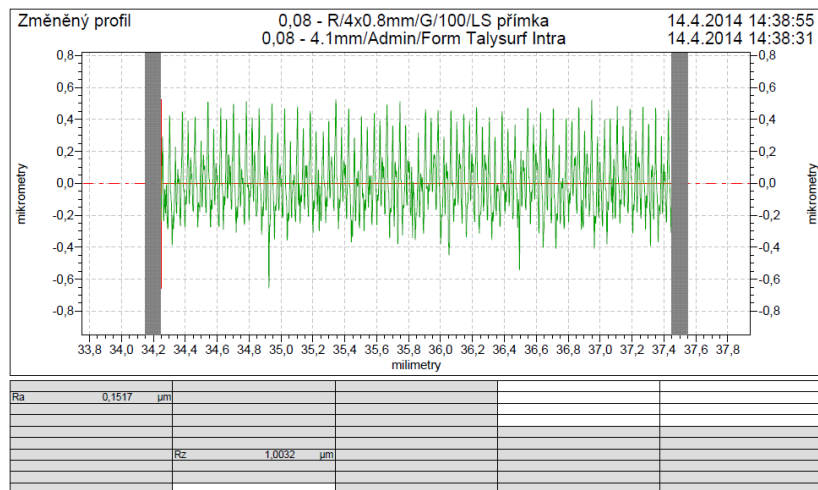
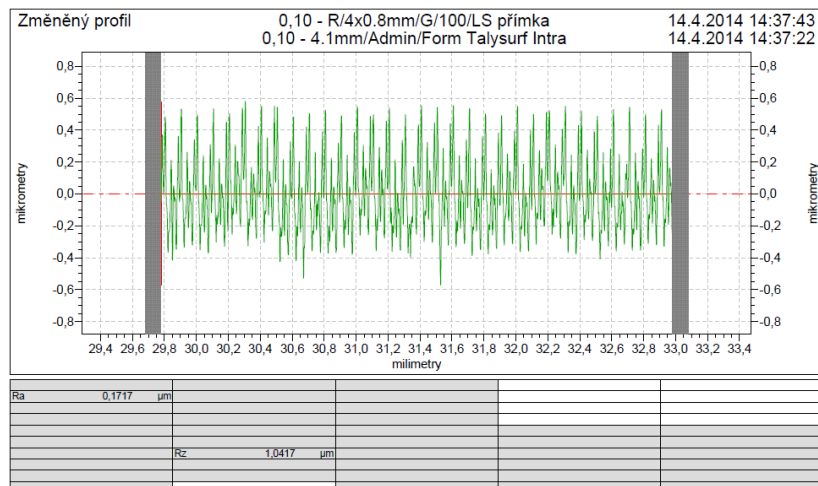
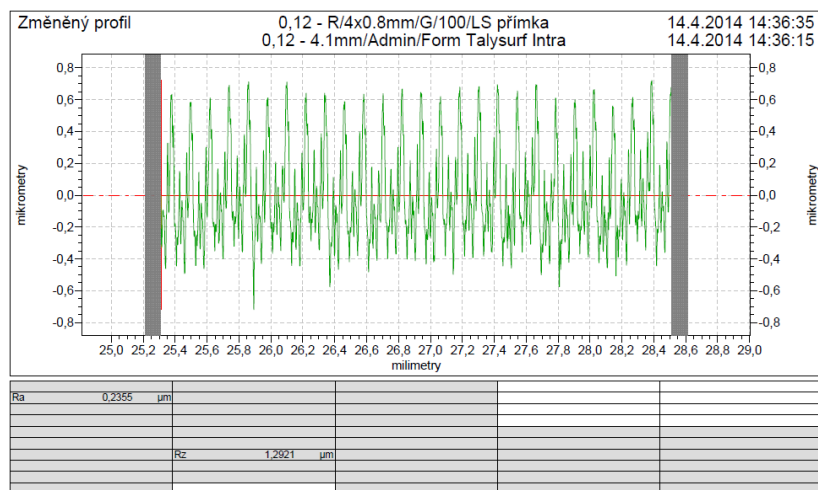
Tab. 4.19 Řezné podmínky použité při čelním soustružení

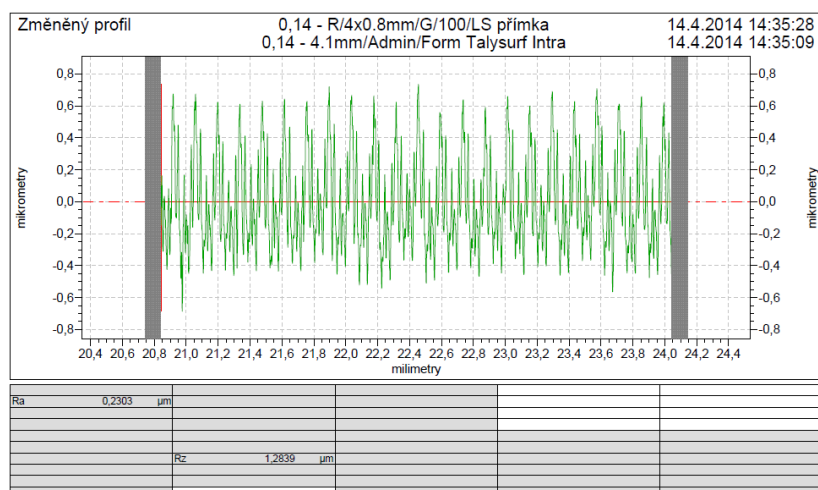
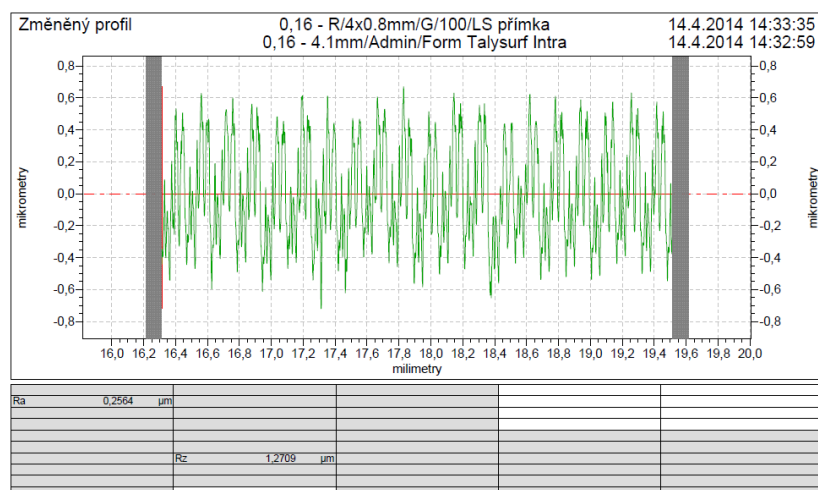
4.2.7 Výsledky experimentu

Drsnost povrchu při čelním soustružení



Obr. 4.30 Vyhodnocená drsnost povrchu Ra a Rz pro $f = 0,06$ mm

Obr. 4.31 Vyhodnocená drsnost povrchu Ra a Rz pro $f = 0,08$ mmObr. 4.32 Vyhodnocená drsnost povrchu Ra a Rz pro $f = 0,10$ mmObr. 4.33 Vyhodnocená drsnost povrchu Ra a Rz pro $f = 0,12$ mm

Obr. 4.34 Vyhodnocená drsnost povrchu Ra a Rz pro $f = 0,14$ mmObr. 4.35 Vyhodnocená drsnost povrchu Ra a Rz pro $f = 0,16$ mm

4.2.8 Rozbor výsledků experimentu

Obecně jsou při čelním soustružení konstantní řeznou rychlostí kladeny vysoké nároky na řídicí systémy obráběcího centra, které musí plynule regulovat otáčky vřetena vůči poloze nástroje tak, aby byly zachovány shodné řezné podmínky na celé ploše a bylo na ní možno zachovat shodnou kvalitu obrobeneho povrchu.

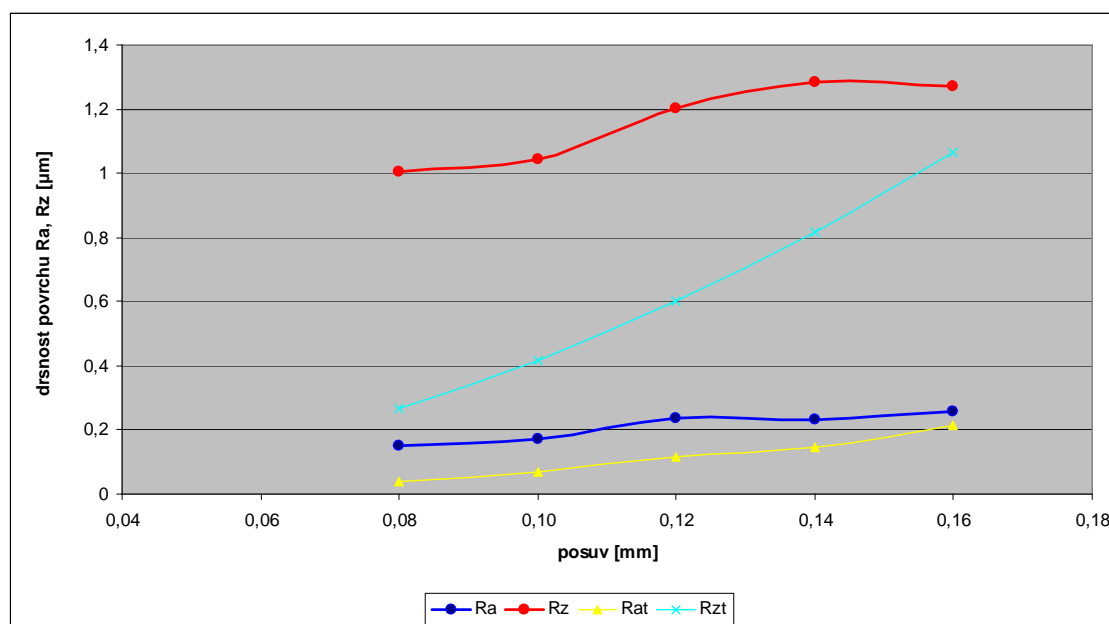
Nehledě na fakt, že čím více se blíží nástroj k ose obrobku, výrazně se zvyšují otáčky vřetena. Teoreticky až do nekonečna. Prakticky mohou dosáhnout maximálních hodnot, které nám dovoluje pohon vřetena. Za této situace je také třeba dbát zvýšenou pozornost na omezení otáček sklíčidla. Ty jsou zejména u větších průměrů dimenzována na nižší hodnoty maximálních otáček než samotný pohon obráběcího centra. V případě

hydraulického systému upínání by mohlo vlivem odstředivých sil dojít k uvolnění obrobku a poškození stroje.

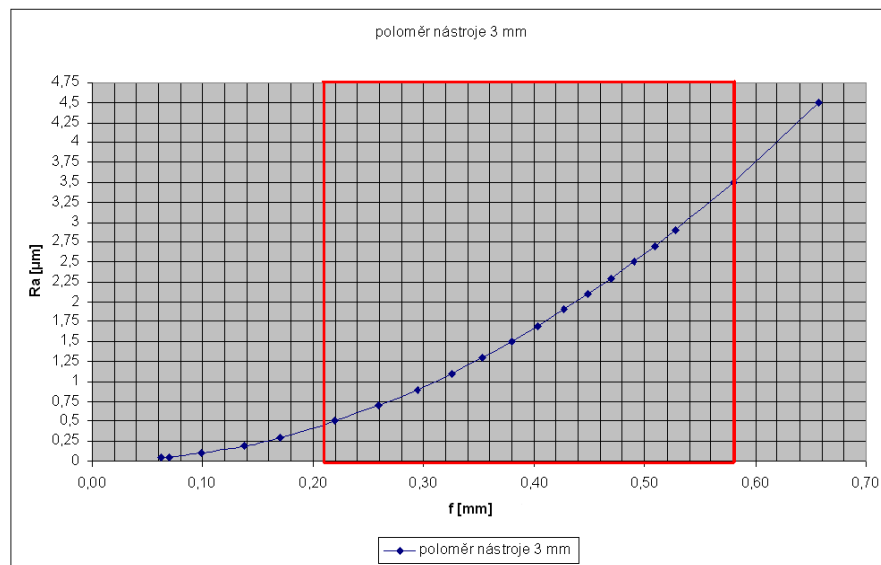
Naměřená drsnost pro čelní soustružení			
obráběný průměr [mm]	posuv f [mm]	Ra [μm]	Rz [μm]
140-120	0,06	0,1773	1,0527
120-100	0,08	0,1517	1,0032
100-80	0,10	0,1717	1,0417
80-60	0,12	0,2355	1,2021
60-40	0,14	0,2303	1,2839
40-20	0,16	0,2564	1,2709

Tab. 4.20 Naměřená drsnost pro čelní soustružení

Zvolením velmi malých hodnot posuvu f bylo dosaženo vynikající kvality povrchu, která se pohybovala v rozmezí Ra 0,15 až 0,25 a Rz 1,00 až 1,29. Jak je vidět z přiloženého grafu, zlepšuje se kvalita povrchu při těchto změnách pouze nepatrně. S dalším snižováním posuvu lze předpokládat, že se obrobek výrazněji nezlepší a naopak se prodlužuje strojní čas. První hodnota pro nejnižší hodnotu posuvu 0,06 mm byla z vyhodnocení v grafu odstraněna, jelikož vykazovala odchylku od měření.



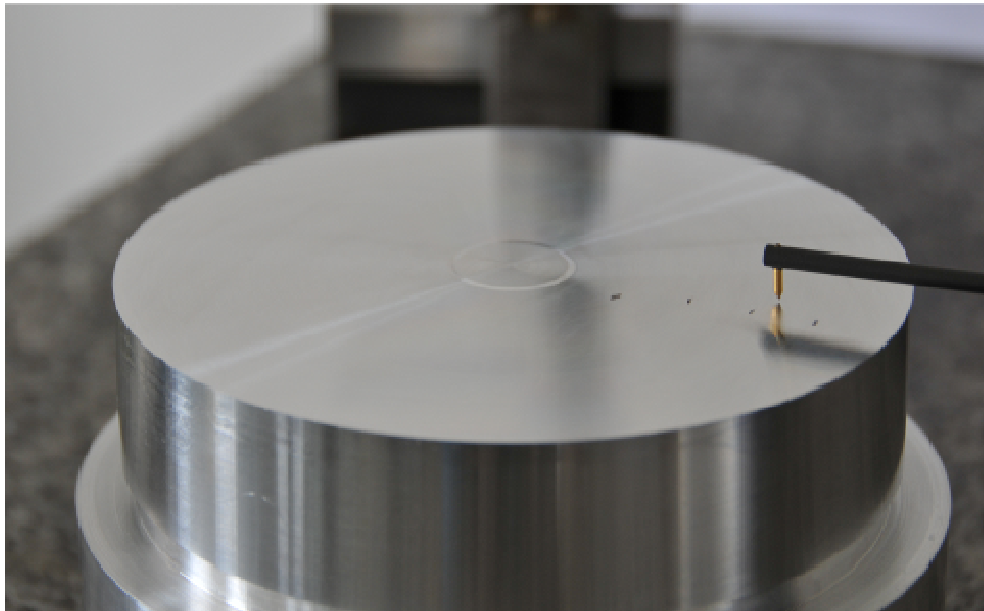
Obr. 4.36 Závislost drsnosti povrchu na rychlosti posuvu s porovnáním teoretických předpokladů při shodných hodnotách posuvu



Obr. 4.37 Teoretická závislost drsnosti povrchu R_a na posuvu f pro použitý nástroj o poloměru zaoblení špičky 3 mm s vyznačeným polem hodnot posuvů dle doporučení výrobce

Očekávalo se, že při velmi malém posuvu může dojít k problému minimální třísky a tedy k tendenci zhoršení kvality. Použitá břitová destička GIPA 6.00-3.00 je ovšem určena pro obrábění hliníkových slitin a má úhel zaoblení břitu velmi malý. Proto by se možné zhoršení drsnosti povrchu z tohoto důvodu nemuselo projevit.

Dosažené výsledky lze zařadit do kategorie jemného obrábění.

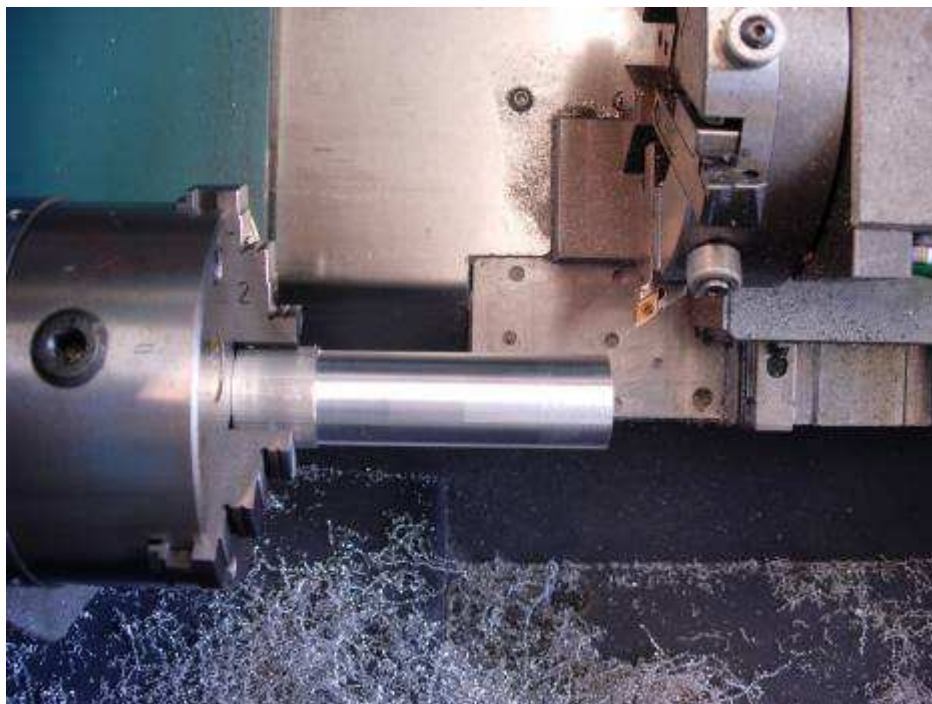


Obr. 4.38 Náhled na precizně obrobenou plochu po čelním soustružení

4.3 Vliv posuvu na kvalitu obrobené plochy

4.3.1 Popis experimentu

Během tohoto experimentu byl posouzen vliv posuvu f na kvalitu obrobené plochy pro různé hodnoty poloměru břítu nástroje r_e . Aplikována bude Taguchiho metoda. Byly použity konvenční břitové destičky pro obrábění ocelí dle aplikační tabulky ISO. Pro zjištění dalších vlivů, byla jedna břitová destička aplikovaná bez použití chladicí kapaliny a další byla určena pro obrábění hliníkových slitin.



Obr. 4.39 Konfigurace během měření vlivu posuvu na obrobenou plochu

4.3.2 Obráběcí stroj

Číslicově řízený soustruh ELTEK Kroměříž S500/125L

CNC soustruh určený pro přesnou výrobu rotačních součástí z ocelí, barevných kovů i plastů. Použitelný od kusové po sériovou výrobu. Výroba závitů závitníkem až do M12 nebo nožem do stoupání 6.28 (modul 2) až do rozměrů pracovního prostoru stroje.

Základní údaje:

(pro základní provedení)

Hmotnost stroje	340 kg
Napájení	220V /50Hz
Spotřeba	3,2 kW max
Rozměry stroje š*h*v	1100 * 940 * 1600
Uložení suportů	valivé na lineárním vedení REXROTH
Pohybové prvky	kuličkové šrouby REXROTH

Technologické údaje

Točný průměr nad suportem	130 mm
Točný průměr nad ložem	160 mm
Průchozí otvor vřetene	30 mm
Točná délka	500 mm
Posuvy	0,01 až 5000 mm/min plynule reg.
Inkrement polohování	0,0025 mm

Vřeteno

Upínací systém	Pro UNI sklíčidlo 125
Otáčky	100 až 3000 ot/min, plynule regulovatelné
Výkon motoru	2.2 kW

Upínání nástrojů

Revolverová hlava pro 6 nástrojů ovládaná řídicím systémem
Nástroje pro vnější obrábění soustružnické nože s profilem dřívku 12*12
Nástroje pro vnitřní obrábění soustružnické nože s průměrem dřívku do 16 mm

Chlazení

Chladicí zařízení pro běžné chladicí kapaliny ovládané řídicím systémem

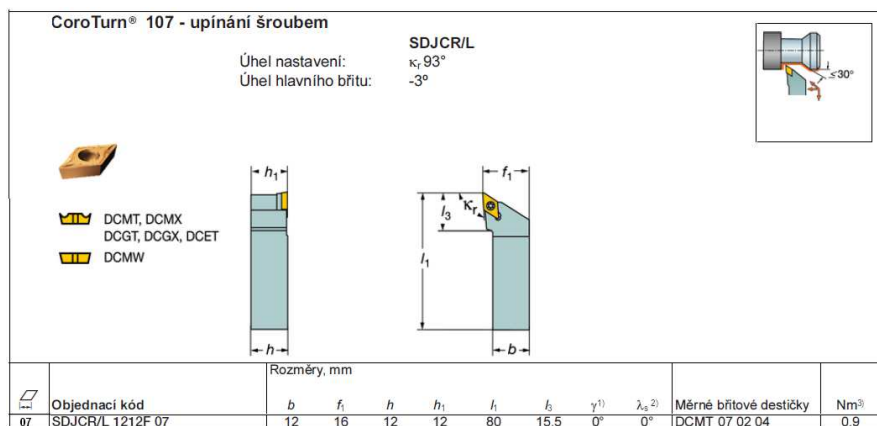


Obr. 4.40 Číslíkově řízený obráběcí stroj S500

4.3.2 Nástroj

Byly zvoleny čtyři různé druhy břitových destiček dle značení ISO s tím, že jedna z nich byla pro porovnání určena pro obrábění hliníkových slitin. Všechny měly kosočtvercový tvar s nástrojovým úhlem břitu 55°. Jednotlivé břitové destičky se liší výrobci, nicméně vzhledem k dodržení standardů ISO všemi výrobci, lze předpokládat, že

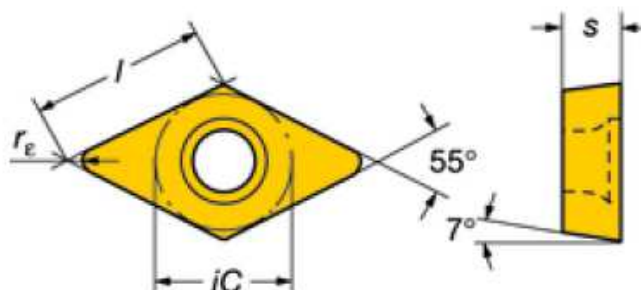
jsou všechny na shodné kvalitativní úrovni z hlediska kvality obrábění. Všechny destičky byly nové, nepoužité a jejich trvanlivost nebyla v tomto experimentu hodnocena.



Obr. 4.41 Technický popis upínacího nástroje [24]

Utvařec	Výrobce	značení ISO	značení ANSI	materiál	rs [mm]
	ARNO	DCMT 070202EN-PM1	DCMT 2(1.5)(0.5)E-PM	AP2110	0.2
	Sandvik	DCMT 070204-PM	DCMT 2(1.5)(1)-PM	4225	0.4
	Sandvik	DCMT 070208-PM	DCMT 2(1.5)(2)-PM	4225	0.8
	Pramet	DCGT 070204F-AL	DCGT 2(1.5)1F-AL	HF7	0.4

Tab. 4.21 Použité typy břitových destiček při experimentu



Obr. 4.42 Tvar břitové destičky [24]

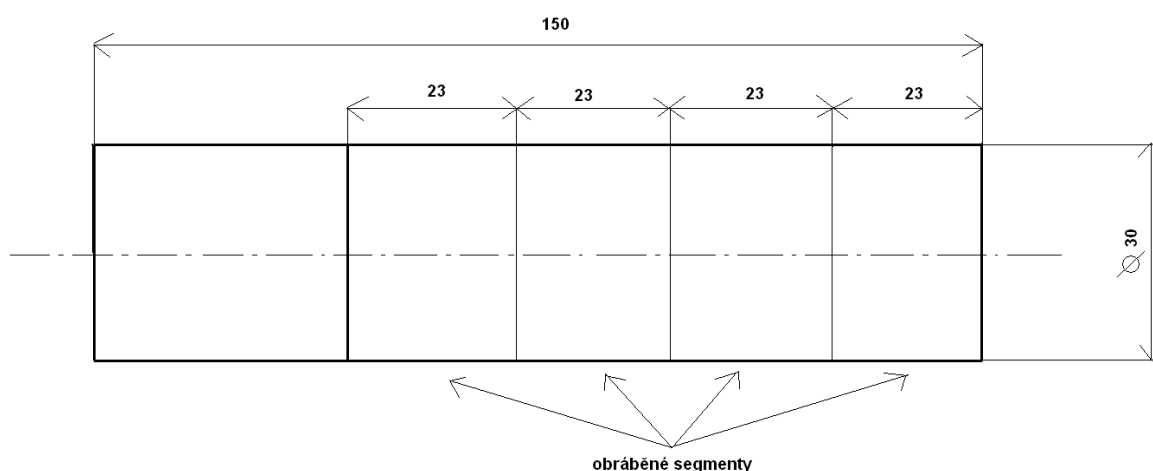
4.3.3 Obráběný vzorek

Pro experiment byl zvolen extrudovaný polotovár ze slitiny hliníku pod označením EN AW 6082-T6 (AlSi1MgMn). Obrobek byl válcového tvaru o průměru 30 mm a délce 150 mm. Na jeden průjezd byly zvoleny čtyři různé hodnoty posuvů, každý na dráze 23 mm.

Mechanické vlastnosti		
Mez kluzu $R_{p0,2}$	170	MPa
Pevnost v tahu R_m	260	MPa
Tažnost A50	19	%
Tvrdomost	75	HV

Fyzikální vlastnosti		
Objemová hmotnost	2,7	g/cm ³
Modul pružnosti	70	GPa
Koeficient tepelné roztažnosti	24	10 ⁻⁶ /K
Tepelná vodivost	180	W/m.K

Tab. 4.22 Vlastnosti materiálu EN AW 6082-T6 (AlSi1MgMn) [29]



Obr. 4.43 Obráběný vzorek s vyznačenou obráběnou plochou

4.3.4 Měřidla použitá při experimentu

Drsnoměr Zeiss SURFCOM FLEX 50A

Ke změření drsnosti povrchu R_a a R_z byl použit dotykový drsnoměr SURFCOM FLEX 50 od firmy Zeiss.

Technická data drsnoměru Zeiss - SURFCOM FLEX 50A	
Horizontální charakteristika	
Délka snímání	0,1 mm až 50 mm
Rychlost snímání / měření	0,15 mm/s - 1,5 mm/s
Vertikální charakteristika	
Nominální rozsah měření (Z)	± 400 μm
Rozlišení (Z)	0,00016 μm/±4 μm - 0,016 μm/±400 μm
Standardní raménko	Kuželový diamantový hrot, R = 2 μm, síla 0,75 mN nebo méně

Tab. 4.23 Technická data drsnoměru Zeiss – SURFCOM FLEX 50A [25]

4.3.5 Řezné podmínky použité při experimentu

Pro všechny břitové destičky byly zajištěny shodné řezné podmínky a s každým nástrojem byl proveden jeden průjezd. Řezná rychlost $v_c = 140$ m/min, hloubka řezu $a_p = 1$ mm. Ostatní ortogonálního rozdělení dle Taguchiho metody tabulky

symbol	řezný parametr	jednotka	úroveň 1	úroveň 2	úroveň 3	úroveň 4	úroveň 5
A	poloměr špičky nástroje r_s	mm	0,2	0,4	0,4 Al	0,4 bez chlazení	0,8
B	posuv f	mm	0,05	0,10	0,15	0,20	

experiment č.	A	B
1	1	1
2	1	2
3	1	3
4	1	4
5	2	1
6	2	2
7	2	3
8	2	4
9	3	1
10	3	2
11	3	3
12	3	4
13	4	1
14	4	2
15	4	3
16	4	4
17	5	1
18	5	2
19	5	3
20	5	4

Tab. 4.24 Přehled zvolených řezných podmínek pomocí ortogonálního rozdělení

4.3.6 Výsledky experimentu

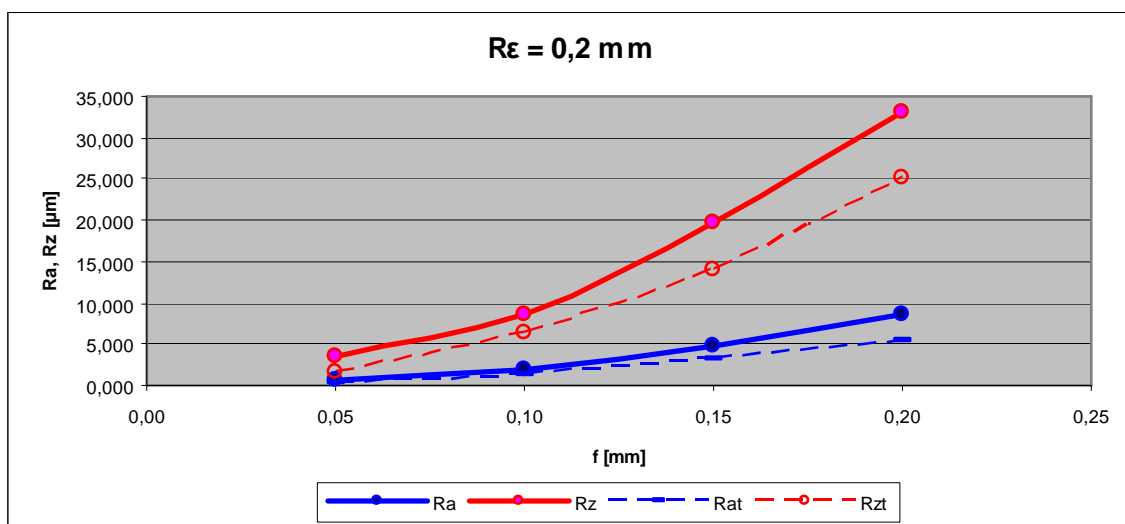
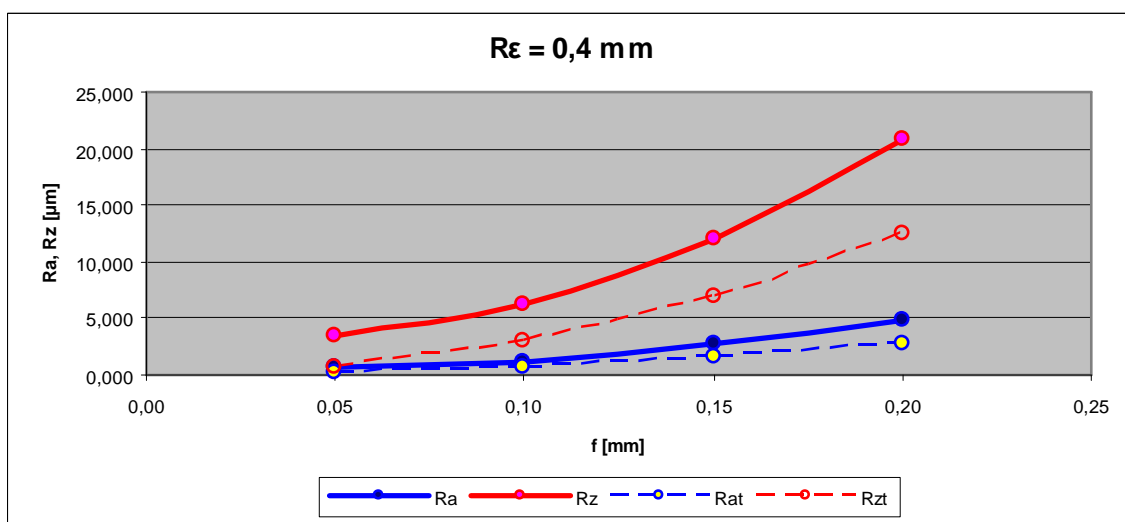
U jednotlivých vzorků byla změřena drsnost povrchu R_a a R_z pomocí drsnoměru Zeiss SURFCOM FLEX 50A dle požadavků normy ČSN EN ISO 4288.

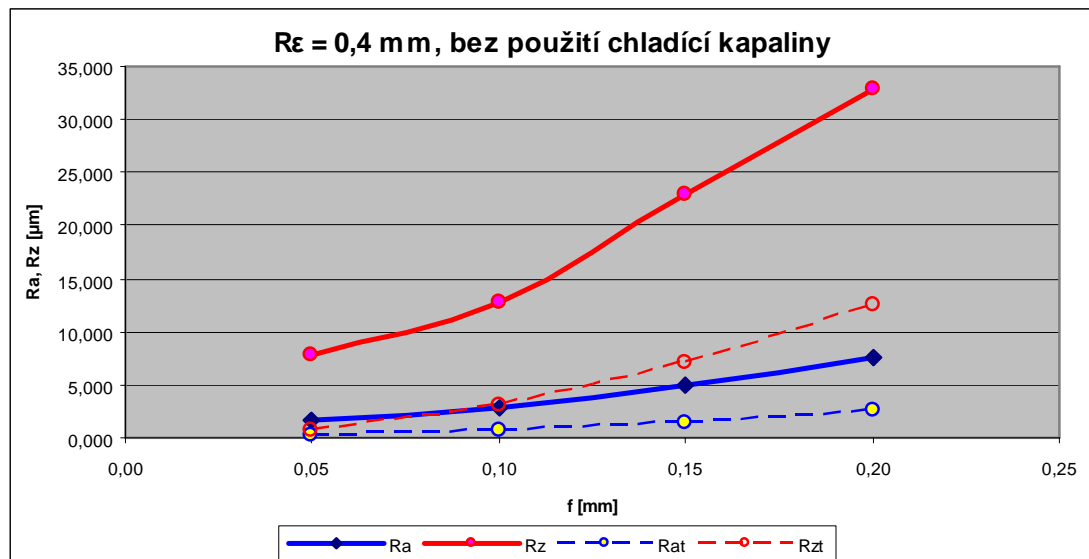
Ra [μ m]					
hodnota posuvu f [mm/ot]	poloměr zaoblení hrotu r_s [mm]				
	0,2	0,4	0,4 sucho	0,4 Al	0,8
0,05	0,596	0,598	1,724	0,627	0,717
0,10	2,006	1,242	2,723	1,490	1,108
0,15	4,900	2,711	4,916	3,863	2,128
0,20	8,488	4,937	7,622	6,658	3,644

Tab. 4.25 Naměřené hodnoty R_a pro všechny průjezdy

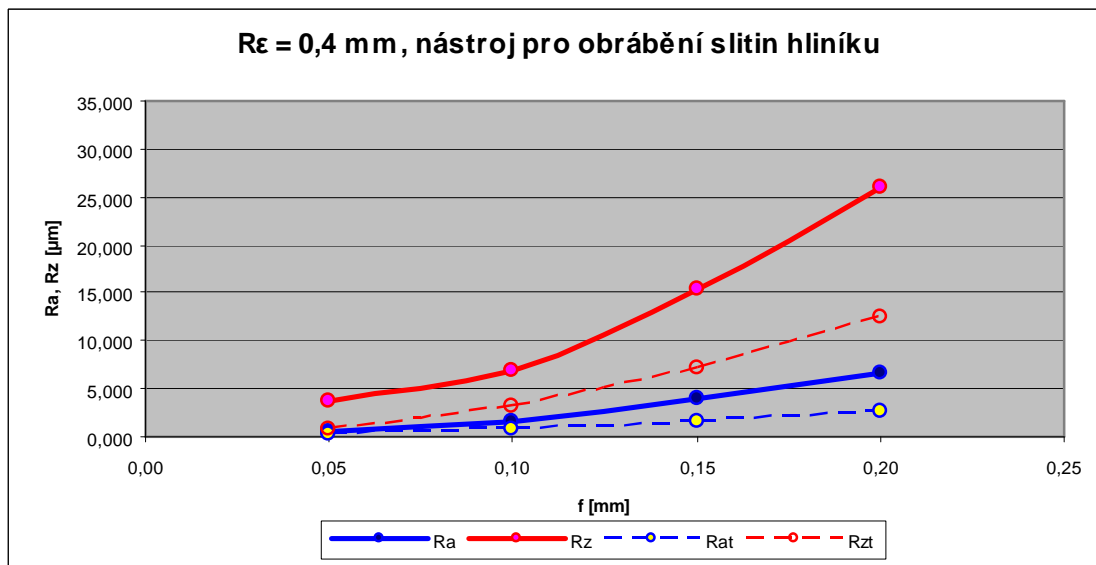
Rz [μm]					
hodnota posuvu f [mm/ot]	poloměr zaoblení hrotu r_e [mm]				
	0,2	0,4	0,4 sucho	0,4 Al	0,8
0,05	3,579	3,368	7,915	3,652	4,140
0,10	8,706	6,183	12,886	7,006	5,362
0,15	19,601	11,954	22,933	15,331	9,237
0,20	33,010	20,815	32,976	25,889	14,410

Tab. 4.26 Naměřené hodnoty Rz pro všechny průřezy

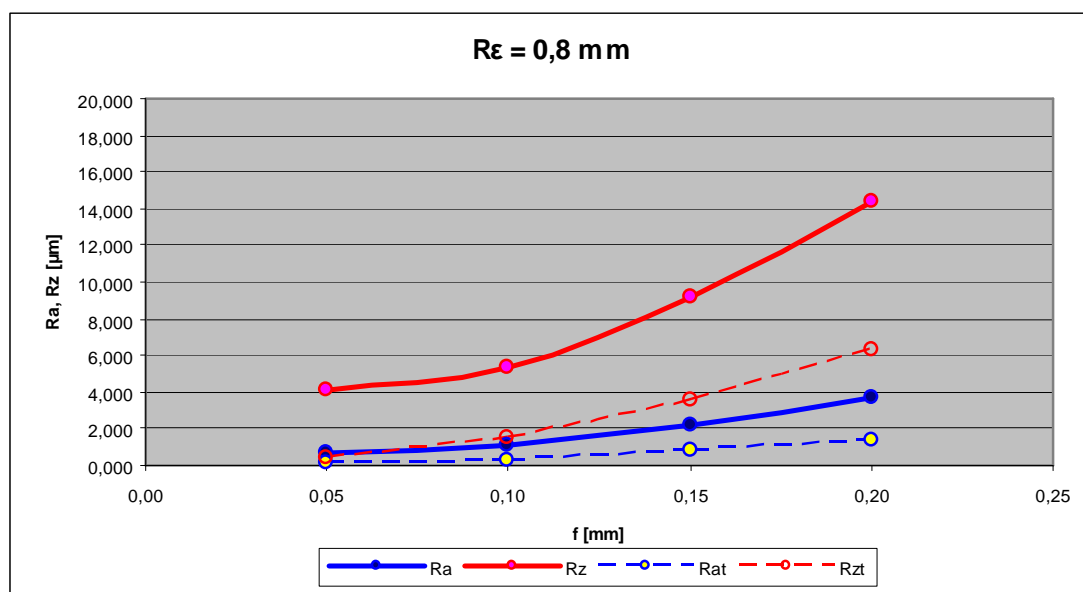
Obr. 4.44 Závislost posuvu na naměřených hodnotách drsnosti Ra a Rz pro břitovou destičku s poloměrem špičky 0,2 mm a porovnání s teoretickými hodnotami Ra_t a Rz_tObr. 4.45 Závislost posuvu na naměřených hodnotách drsnosti Ra a Rz pro břitovou destičku s poloměrem špičky 0,4 mm a porovnání s teoretickými hodnotami Ra_t a Rz_t



Obr. 4.46 Závislost posuvu na naměřených hodnotách drsnosti Ra a Rz pro břitovou destičku s poloměrem špičky 0,4 mm bez použití chladicí kapaliny a porovnání s teoretickými hodnotami Ra_t a Rz_t



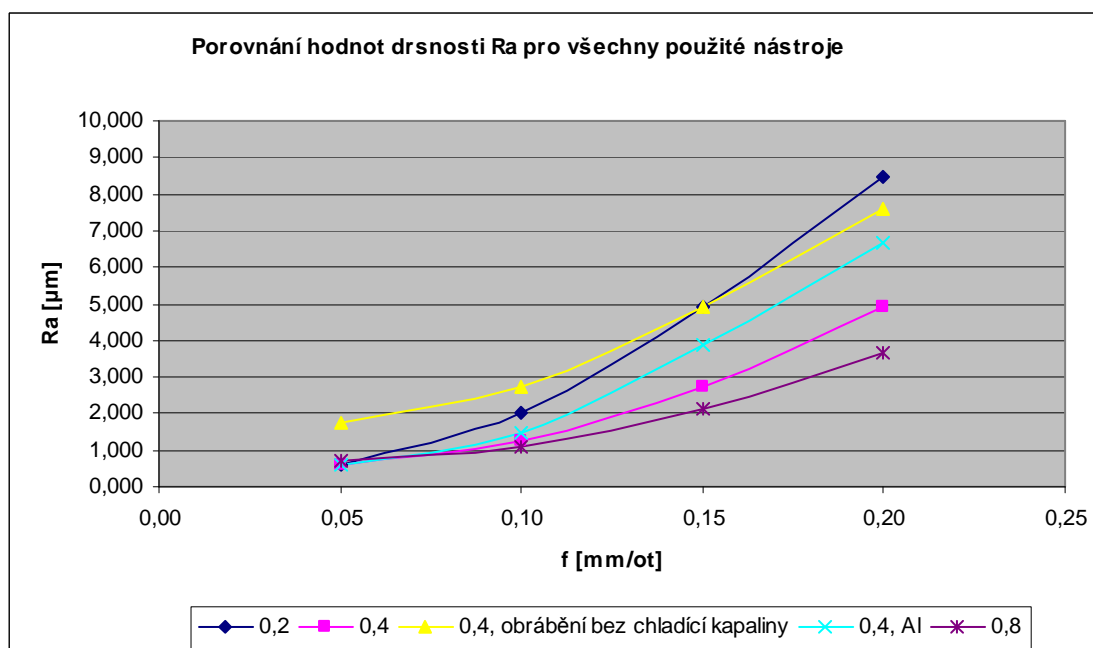
Obr. 4.47 Závislost posuvu na naměřených hodnotách drsnosti Ra a Rz pro břitovou destičku s poloměrem špičky 0,4 mm určenou pro obrábění slitin Al a porovnání s teoretickými hodnotami Ra_t a Rz_t



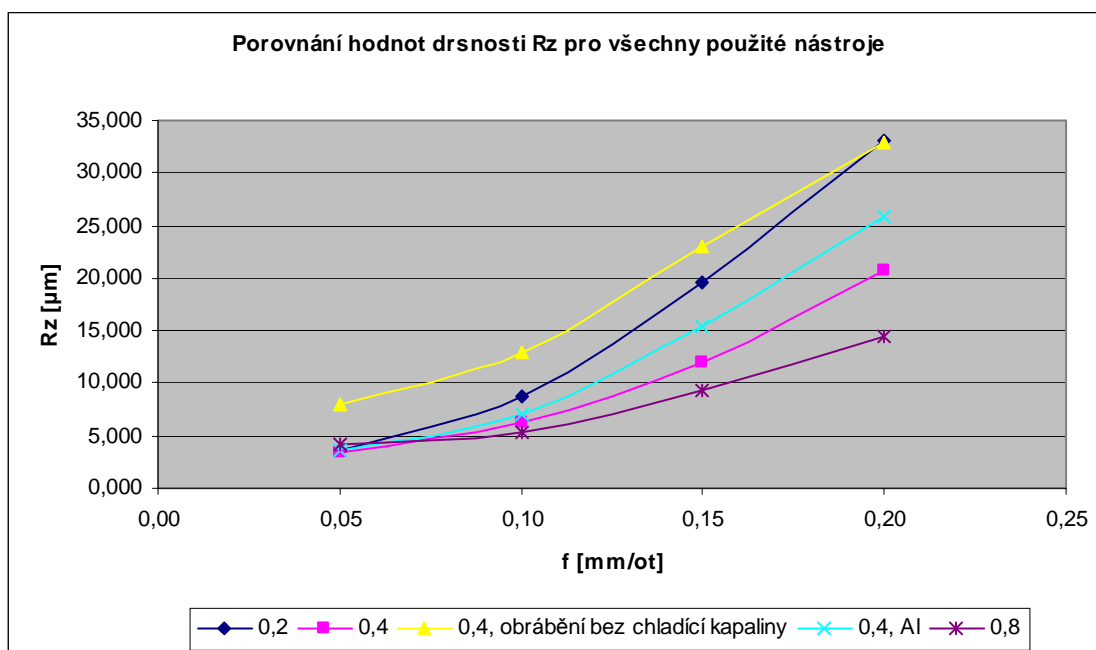
Obr. 4.48 Závislost posuvu na naměřených hodnotách drsnosti R_a a R_z pro břitovou destičku s poloměrem špičky 0,8 mm a porovnání s teoretickými hodnotami R_{a_t} a R_{z_t}

4.3.7 Rozbor výsledků experimentu

Nutno podotknout, že u všech průjezdů se tvořila dlouhá vinutá tříska, která není úplně vhodná z hlediska třískového hospodářství. Při vzájemném porovnání veškerých naměřených hodnot je jasně patrný vliv hodnoty posuvu f a poloměru špičky r_e na kvalitu povrchu. Se zvyšujícím se posuvu kvalita povrchu výrazně klesá. Se zvětšujícím se poloměrem zaoblení břitu se kvalita povrchu postupně zlepšuje.



Obr. 4.49 Graf porovnání drsností povrchu R_a pro jednotlivé břitové destičky



Obr. 4.50 Graf porovnání drsností povrchu Rz pro jednotlivé břitové destičky

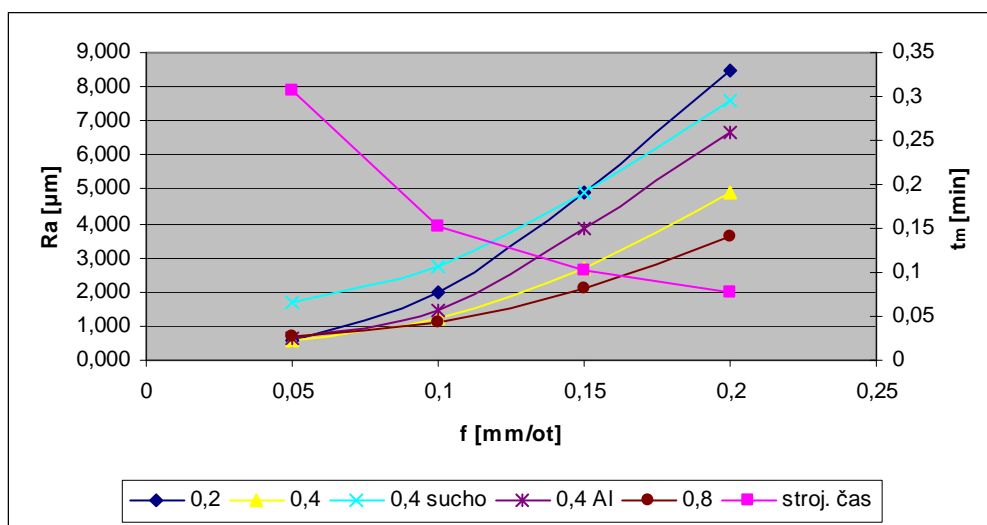
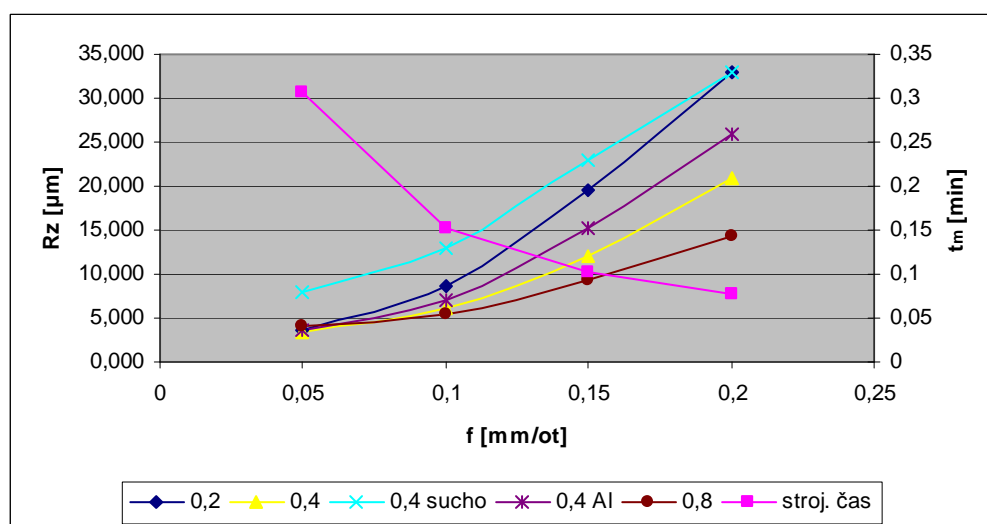
Břit s poloměrem špičky 0,8 mm vykazoval nejlepší hodnoty při všech hodnotách posuvu, kromě toho nejmenšího $f = 0,05$ mm/ot. Obrobený povrch mohl částečně ovlivnit problém s minimální třísky. Poloměr zaoblení špičky nástroje je velikostí blízkou hloubce odřezávané vrstvy a část materiálu třísky není tvářena, ale vtačována mezi nástroj a obráběný povrch.

Důležitý poznatek se týká vlivu řezné kapaliny na kvalitu obrobené plochy. Se stejným nástrojem o poloměru špičky 0,4 mm za použití chladicí kapaliny byl povrch s výrazně lepší drsností než při obrábění bez chladicí kapaliny. Tento ukazatel lze přisuzovat zřejmě tvorbě nárůstku na břitové destičce, který se po dosažení určité velikosti odtrhne, část z něj zůstane na obrobené ploše a zhoršuje její drsnost.

U všech průjezdů byly naměřené hodnoty drsnosti Ra a Rz horší v porovnání s teoretickým předpokladem Ra_t , Rz_t . Na tom měl nejspíše vliv materiál obráběného polotovaru, který byl vyroben technologií extruzního protlačování a není přímo vhodný pro obrábění. V struktuře tohoto materiálu se vyskytují hrubší zrna, která se při obrábění vytrhávají z obrobeného povrchu a tím způsobují zhoršení povrchu.

4.3.8 Optimalizace řezných podmínek

Změnou hodnot posuvu lze ovlivnit ekonomiku provozu. Snižováním posuvu se prodlouží doba, za kterou se zvolená plocha obrobí. Všechny neproduktivní pohyby CNC stroje se realizují pomocí rychloposuvu, který je shodný pro všechny průjezdy. Strojní čas tedy nejvíce ovlivňuje pracovní posuv, jehož časové ztráty se výrazně projeví při sériové výrobě.

Obr. 4.51 Optimalizace kvality obrobené plochy R_z v závislosti na strojovém časeObr. 4.52 Optimalizace kvality obrobené plochy R_z v závislosti na strojovém čase

V uvedených grafech je znázorněna závislost strojního posuvu na všech možnostech posuvu experimentu. Pokud bude upřednostněno určité kompromisní řešení, bude se oblast zájmu vyskytovat někde v oblasti hodnot posuvů 0,1 až 0,15 mm. V případě, že by byla vyžadována nižší drsnost povrchu, je nutné počítat s prodloužením strojního času. Naopak, pokud by drsnost povrchu nebyla pro konečný stav obrobku kritická a priorita by byla rychlost výroby, lze využít možnost vyšší rychlosti posuvů.

5 ZÁVĚR

Při optimalizaci řezných podmínek je důležité mít směrodatné vstupní údaje. Bez nich může vést jakýkoliv postup k nesmyslným výsledkům a nelze dosáhnout cíle. V současnosti máme k dispozici výpočetní techniku, která z tohoto pohledu situaci velmi usnadňuje.

V této diplomové práci byly optimalizovány řezné podmínky metodou plánovaných experimentů. Hodnocen byl vliv řezných podmínek na kvalitu obrobené plochy pro dokončovací procesy obrábění. V teoretické části byl stanoven určitý předpoklad pro obrábění ocelových slitin a v praktické části byly tyto předpoklady konfrontovány s obráběním hliníkových slitin. Výsledky ve větší míře potvrdily předpoklad, nicméně oproti teoretickému výpočtu bylo dosaženo výsledků horších.

Můžeme přesto potvrdit skutečnost, že hloubka řezu nemá významný vliv na drsnost obrobené plochy. Lze ji ovšem považovat jako účinný nástroj, jak zvýšit produktivitu. Je nutné ale počítat s vyššími požadavky na tuhost soustavy stroj-nástroj-obrobek. V našem případě byl použit nástroj, který je primárně určen pro tvorbu drážek a u kterého se očekávali problémy se zmíněnou tuhostí. Použitý nástroj přesto ve zkoušce obstál a byl schopen vytvořit velmi kvalitní povrch, který se lze srovnávat s jemným obráběním, případně až povrchem broušeným.

Vliv na tento výsledek měla především geometrie břitové destičky, která měla velký poloměr špičky. Poloměr špičky je také významný parametr, který ovlivňuje drsnost obrobené plochy. Velikost poloměru špičky nástroje byl proto podroben měření při dalším experimentu za pomoci Taguchiho metody. Zde byly použity standardní břitové destičky dle ISO. Naměřené hodnoty potvrdily trend a tedy volbou větších poloměrů špiček nástrojů jsme schopni zlepšit drsnost povrchu. Větší poloměr špičky za odříznutým materiálem dokáže nově vzniklou plochu uhladit a zatlačit část nerovností.

Naměřené hodnoty lze uplatnit jako výchozí údaj pro další individuální optimalizaci výrobního procesu. Samotná optimalizace může vycházet z různých kritérií, ať už v tomto případě silového zatížení, drsnosti povrchu, úchyly válcovitosti obrobené plochy, ale může mít i další kritéria, např. z pohledu výkonu obráběcího centra či životnosti nástroje. V každém případě by cílem optimalizace mělo být zvýšení produktivity a s tím se úzce váže také snížení nákladů na výrobu.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] DRASTÍK, F.: Přesnost strojních součástí podle mezinárodních norem. 1.vyd. Ostrava: MONTANEX, a.s. 1996. 271 s. ISBN 80-85780-18-6
- [2] VASILKO, K.: Analytická teória trieskového obrábania. 1.vyd. Prešov: Fakulta výrobných technológií Technické univerzity v Košiciach, so sídlom v Prešove. 2007. 481 s. ISBN 978-80-8073-759-7
- [3] KOČMAN, K., NĚMEČEK, P.: Aktuální příručka pro technický úsek. Praha: Verlag Dashöfer. 2000. 3950 s. 15.ed. ISBN 80-902247-2-5
- [4] VASILKO, K.: Možnosti zvýšenia produktivity základných metód obrábania (soustruženie, frézovanie)
- [5] ISCAR. Groove Turn Tools (katalog). dostupný z: <<http://www.iscar.com>>
- [6] BRYCHTA, J., ČEP, R., SADÍLEK, M., PETŘKOVSKÁ, L., NOVÁKOVÁ, J.: Nové směry v progresivním obrábění. 1.vyd. Ostrava: Ediční středisko VŠB – TUO. 2007. ISBN 978-80-248-1505-3
- [7] KOČMAN, K.: Speciální technologie. Obrábění. 3.vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM s.r.o. 2004. ISBN 80-214-2562-8
- [8] MÁDL, J., KAFKA, J., VRABEC, M., DVOŘÁK, R.: Technologie obrábění 1.díl. 1. vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT. 2000. ISBN
- [9] KOVOSVIT MAS. SP Line – CNC Lathes – 180|280 – Číslicově řízené soustruhy (katalog). dostupný z: <<http://www.kovosvit.cz>>
- [10] HOLKUP, T.: Vyrábět stejně za méně - Energetická efektivita obráběcích strojů. Technický měsíčník MM Průmyslové spektrum. Listopad 2013. Číslo 11. ISSN 1212-2572
- [11] MÁDL, J., KVASNIČKA, I.: Optimalizace obráběcího procesu. 1. vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT. 1998. 170 s. ISBN 80-01-01864-6
- [12] DVOŘÁK, L.: Rozhodující je použití efektivního chlazení. Technický měsíčník MM Průmyslové spektrum, Únor 2014. Číslo 1,2. ISSN 1212-2572
- [13] MÁDL, J.: Kritický rozbor současného stavu optimalizace řezných podmínek a využití analytických metod pro optimalizaci.[Habilitační práce]. Praha. ČVUT Fakulta strojní. 1980. 163 s.
- [14] VASILKO, K.: Teoria a prax trieskového obrábania. 1.vyd. Prešov: Fakulta výrobných technológií Technické univerzity v Košiciach, so sídlom v Prešove. 2009. 523 s. ISBN 978-80-553-0152-5
- [15] ČSN EN ISO 4287: Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Termíny, definice a parametry struktury povrchu. 1999.(014450)
- [16] HUMÁR, . Materiály pro řezné nástroje [online]. 2006. 2. vyd.
- Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/mat_pro_rez_nastroje/materialy_pro_rezne_nastroje_v2.pdf>

- [17] DeGARMO, E., BLACK, T., KOHSER, R.: Materials and processes in manufacturing. London: Prentice-Hall. 1997. 1259 s. ISBN 0-02-946140-5
- [18] KRAR, S.F., GILL, A.R., SMID, P.: Technology of machine tools. New York: McGraw-Hill. 2011. ISBN 978-0-07-351083-5
- [19] KOCMAN K., PROKOP J. Technologie obrábění. Brno: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, s.r.o. 2001. 270 s. ISBN 80-214-1996-2
- [20] VIGNER M., PŘIKRYL Z. a kol. Obrábění. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury. 1984. 808s. 1.vyd. ISBN 04-250-84
- [21] GLEICH Aluminium s.r.o. – Přehled produktů. dostupné z: <<http://gleich.de/cz/produkty/vlcovan-desky/vlcovan-desky-en-aw/-en-aw-7075>>
- [22] MISAN. Soustružení bez chvění. Technický měsíčník MM Průmyslové spektrum. Duben 2014. Číslo 4. ISSN 1212-2572
- [23] ČSN EN ISO 4287. Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Termíny, definice a parametry struktury povrchu. Český normalizační institut. Praha. 04/1999.
- [24] SANDVIK COROMANT. Soustružnické nástroje 2012 (katalog). dostupné z: <www.sandvik.com>
- [25] CARL ZEISS INDUSTRIELLE MESSTECHNIK GmbH. SURFCOM FLEX – Portable Surface Texture Measuring Instrument (katalog). dostupné z: <www.zeiss.de/imt>
- [26] FLODR, Vojtěch. Testování řezných nástrojů povlakovaných nanokrystalickými povlaky. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. s. 68. Vedoucí práce doc. Ing. Miroslav PÍŠKA, CSc.
- [27] PROINEX INSTRUMENTS s.r.o. Dostupné z: <<http://www.proinex.cz/digitalni-drsnomer-tr-100.html?pop=0>>
- [28] MUKHERJEE, I., & RAY, P. K. A review of optimization techniques in metal cutting processes. Computers and Industrial Engineering 50(1–2). 2006. 15–34 s.
- [29] AALCO METALS LIMITED. Dostupné z <http://www.aalco.co.uk/datasheets/Aluminium-Alloy-6082-T6-Extrusions_338.ashx>
- [30] BROŽEK M. Cutting conditions when turning overlays. Journal of Materials Processing Technology 168. 2005. 488-495 s.
- [31] KVASNICA J. Mechanika. Praha: Academia. 2004. 476 s. ISBN 80-20-012681
- [32] MÁDL J. Optimalizace řezných podmínek v teorii obrábění – doplňkové skriptum. Praha: Ediční středisko ČVUT. 1990. 58 s. ISBN 80-01-00323-X
- [33] AGGARWAL A., SINGH H. Optimisation of machining techniques / A retrospective and literature review. Sādhanā Vol. 30, Part 6. India. 2005. 699-711 s.
- [34] MONTGOMERY D.C. Design and Analysis of Experiments. New York.: John Wiley & Sons. 2001. 752 s. ISBN-13: 978-1118146927
- [35] ADLER Y. P., MARKOVA E. V., GRANOVSKY Y. V. The design of experiments to find optimal conditions. Moscow: Mir Publisher. 1975

- [36] JOHNSTON R. E. Statistical methods in foundry experiments. AFS Trans 72. 1964. 13–24 s.
- [37] HESSAINIA Z., BELBAH A., YALLESE M. A., MABROUKI T., RIGAL J.-F. On the prediction of surface roughness in the hard turbiny based on cutting parameters and tool vibrations. Measurement 46. 2013. 1671-1681 s.
- [38] PÍŠKA, M. A KOL.: Speciální technologie obrábění. Brno: Akademické nakladatelství CERM s.r.o. 2009. 1. vyd. ISBN 978-80-214-4025-8
- [39] DOUPNÍK, P.: Využití optimalizačních metod při návrhu transsonického křídla s implementací základních konstrukčně pevnostních omezení. Disertační práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. 2010. 54 s. Vedoucí práce: prof. Ing. Antonín Píštěk, CSc
- [40] YUSUP, N., ZAIN, A. M., HASHIM, S. Z. M.: Evolutionary techniques in optimizing machining parameters: Review and recent applications (2007-2011). Expert Systems with Applications 39. 2012. 9909-9927 s.
- [41] WANG, X., JAWAHIR, I. S.: Web based optimization of milling operations for the selection of cutting conditions using genetic algorithms. Proc. Inst. Mech. Eng. 218. 2004. 212–223 s.
- [42] ŠMÍD, J.: Novinky laserového přehřevu při obrábění. Technický měsíčník MM Průmyslové spektrum. Prosinec 2013. Číslo 12. ISSN 1212-2572
- [43] KULKARNI, P.P., KIRAN, J.O., DEELEPKUMAR, S.G.: International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST) Vol 6. No.3. 2014. 69-75 s. ISSN: 0975-5462
- [44] SELVARAJ, D.P., CHANDRAMOHAN, P., MOHANRAJ, M.: Optimisation of surface roughness, cutting force and tool wear of nitrogen alloyed duplex stainless steel in a dry running process usány Taguchi method. Measurement 49. 2014. 205-215 s,
- [45] ŠPANIEL M. Dostupné online (25.5.2014) <http://mechanika2.fs.cvut.cz/old/pme/predmety/mkpb/obr/01/zadani_01.jpg>
- [46] TARAOSVIČOVÁ, A., ŠOMŠÁKOVÁ, Z.: Charakteristika drsnosti povrchu pri zvyšování produktivity sústruženia. Odborný časopis Transfer inovácií. 15/2009. ISSN 1337-7094
- [47] KITAGAWA EUROPE LTD. Dostupné z <<http://www.kitagawaeurope.cz/silov-sklidla/prchoz-sklidla/b-200/b-205>>
- [48] ČSN EN ISO 4288. Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Pravidla a postupy pro posuzování struktury povrchu. Český normalizační institut. Praha. 04/1999.
- [49] TAYLOR HOBSON. Form Talysurf (katalog). Dostupné z: <www.taylor-hobson.com>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Jednotka	Popis
AISI	[-]	American Iron and Steel Institute
ASTM	[-]	American Society for Testing and Materials
CNC	[-]	Computer numeric control
ČSN	[-]	Československé normy
DOE	[-]	Design of experiment
DP	[-]	Dynamic programming
EN	[-]	Evropská norma
GA	[-]	Genetic Algorhythm
ISO	[-]	International Organization for Standardisation
LP	[-]	Linear programming
NLP	[-]	Non-linear programming
RSM	[-]	Response surface methodolgy
SA	[-]	Simulated annealing
TS	[-]	Tabu searching

Symbol	Jednotka	Popis
A_D	mm^2	průřez třísky
a_p	mm	hloubka řezu
c_v	-	konstanta
d_b	mm	tloušťka třísky
D_u	mm	průměr upnutí
E	MPa	modul pružnosti materiálu
E_e	J	vynaložená energie na odebrání materiálu
f	mm	posuv
F_c	N	celková řezná síla
F_u	N	upínací síly působící na čelist
F_{u0}	N	upínací síly působící na čelist pro vřetenno v klidu

F_x	N	síla posuvu
F_y	N	pasivní síla
F_z	N	řezná síla
g	mm	velikost prohnutí
h_d	mm	šířka třísky
J	mm ⁴	centrální moment setrvačnosti
k_c	N.mm ⁻²	měrná řezná síla
k_{def}	mm	koeficient zahrnující deformaci v radiálním směru
k_{fc}	-	konstanta
k_{pc}	-	konstanta
k_u	-	koeficient způsobu upnutí
KV	mm	radiální opotřebení špičky nástroje
L_0	mm	vzdálenost působíště řezných sil od sklíčidla
L_0	mm	délka obrobku
L_3	mm	radiální deformace obrobku od radiální složky řezné síly F_y
L_4	mm	deformace obrobku
l_p, l_r, l_w	mm	základní délka
M_k	Nm	kroučící moment na vřetenu
n	min ⁻¹	otáčky vřetena
N_{Ehs}	kWh	průměrná sazba za elektrickou energii
n_s	min ⁻¹	otáčky na vybraném stroji
P	kW	teoretický výkon
P_c	kW	příkon stroje
P_{ef}	kW	efektivní příkon
Q	cm ³ /min	množství odebraného materiálu
R_a	μm	střední hodnota obrobené plohy
R_{Sm}	μm	průměrná šířka prvků profilu
R_z	μm	maximální výška nerovností profilu
r_ϵ	mm	poloměr zaoblení špičky nástroje

t_{def}	s	deformační čas
T_{opt}	min	optimální trvanlivost nástroje
u	J/mm^3	měrná energie
V	cm^3	objem třísky
v_c	m/min	řezná rychlost
VS	mm	šířka opotřebení na hřbetě nástroje
w	$\text{mm} \cdot \text{N}^{-1}$	poddajnost pružné soustavy
y	mm	posunutí nástroje ve směru osy Y
α_p	°	nástrojový zadní úhel hřbetu
η	-	účinnost
κ_r	°	úhel nastavení
κ_r'	°	vedlejší úhel nastavení
μ	-	koeficient tření na čelisti

