

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Parametry řezného procesu

Autor: Eliška Netolická
Studijní program: B2343 Výroba a ekonomika ve strojírenství
Studijní obor: 2303R014 Technologie, materiály a ekonomika strojírenství
Vedoucí práce: Ing. Vítězslav Rázek, CSc.
Praha 2016

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracovala samostatně a použila jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

Praha 1.7.2016

.....
Eliška Netolická

Poděkování

Touto cestou děkuji panu Ing. Vítězslavu Rázkovi, CSc., za cenné rady a připomínky při zpracování, vyhodnocování a kompletaci mé bakalářské práce.

Anotace

Tato bakalářská práce se zabývá možnostmi monitorování průběhu řezání, jako jsou síly a teploty při řezání a opotřebení nástroje. Další náplní je hodnocení kvality povrchové vrstvy z hlediska drsnosti povrchu, tvorby třísek a mikrotvrdosti. V poslední části se věnuji experimentu, jehož výsledky, jako naměřené síly při soustružení, zjištěná drsnost obrobeného povrchu, odebrané třísky a zjištěná mikrotvrdost povrchu použiju k porovnání čtyř vyměnitelných břitových destiček s různými utvařovacími tříslečnými směsami.

Klíčová slova: síly, teploty, opotřebení nástroje, drsnost, třísky, mikrotvrdost, austenitická korozivzdorná ocel, duplexní ocel

Annotation

This bachelor thesis is about the possibilities monitoring during the cutting process as forces and temperatures at the cutting and tool wear. Another section contains quality assessment of the surface layer in term of surface roughness, chip formation and microhardness. The last section is devoted to the experiment. Results of an experiment which measured the force, roughness, chips and results microhardness will be used to compare the four replaceable cutting edge which have different chip breaker.

Keywords: forces, temperature, tool wear, roughness, chips, microhardness, austenitic stainless steel, duplex steel

Obsah

Čestné prohlášení

Poděkování

Anotace

Annotation

Obsah	7
1 Úvod	9
2 Použité symboly	10
3 Možnosti monitorování průběhu řezání.....	11
3.1 Síly při řezání	11
3.1.1 Nepřímé měření sil při obrábění	12
3.1.2 Přímé měření sil při obrábění.....	14
3.1.3 Síla řezání a řezný výkon.....	15
3.2 Teplo a teplota při řezání.....	17
3.2.1 Měření teploty.....	18
3.2.2 Snižování teploty	19
3.3 Opotřebení nástroje	19
3.3.1 Formy opotřebení.....	21
3.3.2 Trvanlivost nástroje	23
3.4 Tvorba třísek	24
4 Hodnocení kvality povrchové vrstvy.....	27
4.1 Drsnost při obrábění	27
4.1.1 Měření drsnosti	29
4.2 Další možnosti hodnocení	29
5 Experimentální zkoušky při obrábění.....	30
5.1 Popis experimentu	30
5.2 Měření mikrotvrdomosti	34
6 Vyhodnocování výsledků	37
6.1 Austenitická korozivzdorná ocel.....	37
6.1.1 Síly při soustružení	37
6.1.2 Drsnost obrobeného povrchu	39
6.1.3 Třísky	42
6.1.4 Profily mikrotvrdomosti.....	44
6.1.5 Shrnutí výsledků	46
6.2 Duplexní ocel	46

6.2.1	Síly při soustružení	46
6.2.2	Drsnost obrobeného povrchu	49
6.2.3	Třísky	51
6.2.4	Profily mikrotvrdosti.....	52
6.2.5	Shrnutí výsledků	54
6.3	Porovnání obou materiálů	54
7	Závěr.....	55
8	Literatura	57

1 Úvod

Ve své bakalářské práci se zabývám na teoretické úrovni možnostmi, jak lze monitorovat průběh řezání, jako na příklad zjišťováním sil vznikajících při obrábění, měřením teploty a zjišťováním, kde vzniká nejvíce tepla a jak ho lze snižovat. Dále jsem zpracovala možnosti opotřebení nástroje, tvorbu třísek a varianty utvařečů třísek. Další část věnuji hodnocení kvality povrchové vrstvy především z hlediska drsnosti obráběného povrchu při různých operacích. V poslední, praktické části, popisuji experiment, ve kterém mám k dispozici čtyři různé vyměnitelné břitové destičky s odlišnými utvařeči třísek, kterými soustružím dva materiály za stejných řezných podmínek. A to austenitickou korozivzdornou ocel a duplexní ocel. Každý materiál soustružím každou destičkou nejprve jednou a následně podruhé v hlubší vrstvě. Během experimentu měřím vznikající síly, drsnost obrobeného povrchu, odeírám třísky a hodnotím mikrotvrdost. Na základě získaných hodnot vyhodnocuji výsledky experimentu a hledám shodné a podobné výsledky. Porovnávám jak jednotlivé destičky mezi sebou, tak i všechny čtyři destičky zvlášť pro první soustružení a pro druhé soustružení v hlubší vrstvě, ale i oba materiály zvlášť, a to z různých hledisek.

2 Použité symboly

symbol	jednotka	použití
F	[N]	síla
A_D	[mm ²]	průřez odřezávané vrstvy
a_p	[mm]	hloubka třísky
D	[mm]	průměr nástroje nebo obrobku
f	[mm/ot]	posuv
F_c	[N]	řezná síla
F_f	[N]	síla posuvu
F_p	[N]	pasivní síla
k_c	[N/mm ²]	měrná řezná síla
M_k	[Nm]	točivý moment
M_{kb}	[Nm]	točivý moment od řezné složky síly obrábění
P_c	[W]	řezný výkon
P_c	[W]	výkon stroje při obrábění
P_o	[W]	výkon stroje při chodu naprázdno
$P_{už}$	[W]	užitkový výkon
Ra	[μm]	střední aritmetická úchylka
Rmax	[μm]	rozdíl mezi nejvyšším výstupkem a nejnižší prohlubní
T	[min]	trvanlivost
U	[cm ³ /min]	úběr materiálu
v_c	[m/min]	řezná rychlost
W	[-]	součinitel objemu třísek

3 Možnosti monitorování průběhu řezání

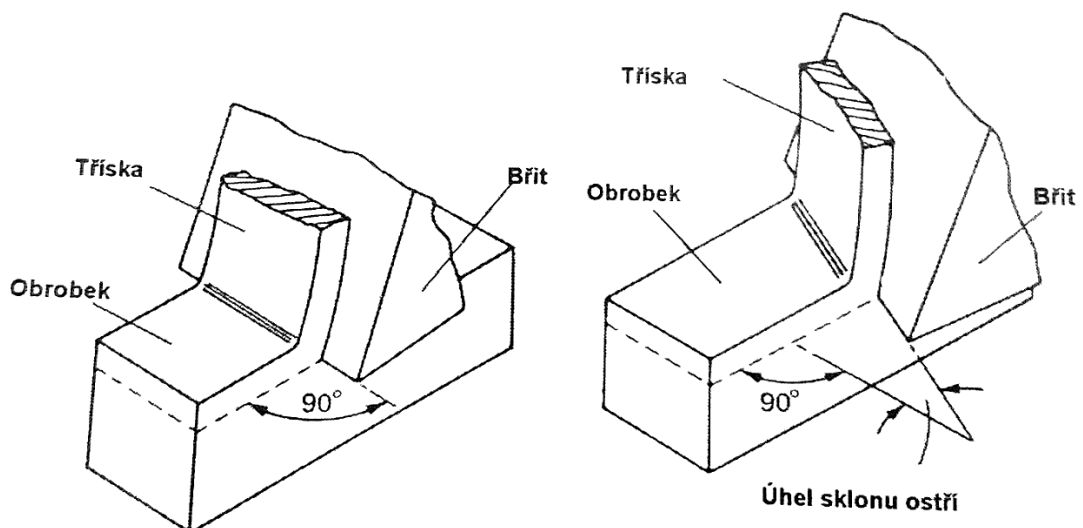
3.1 Síly při řezání

Síly při řezání jsou odlišné během ortogonálního (obr. 3.1 vlevo) a vázaného řezání (obr. 3.1 vpravo). Ortogonální řezání, neboli volné, je takové, při kterém je ostří kolmé na směr řezného pohybu a síly působí pouze v rovině. Takový způsob můžeme najít u frézování (frézou s přímými zuby), zapichování, protahování, hoblování, aj. Sílu řezání F můžeme rozložit na řeznou sílu F_c a sílu posuvu F_f (obr. 3.2). Oproti tomu u vázaného řezání, které se vyskytuje např. u podélného soustružení, vrtání nebo frézování (frézou se šikmými zuby), vznikají síly ve třech směrech, tedy v prostoru. Zde je síla řezání F složena z řezné síly F_c , síly posuvu F_f a pasivní síly F_p (obr. 3.3).

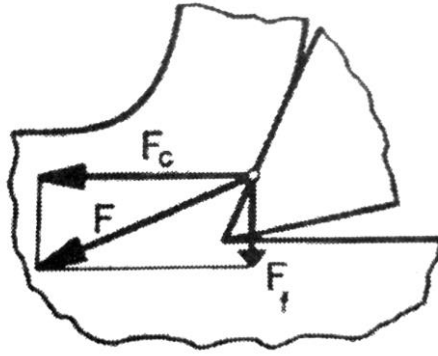
Řezná síla F_c působí ve směru hlavního pohybu obráběcího nástroje a je ze všech složek největší. Na celkovém řezném příkonu se většinou podílí až z 99%.

Síla posuvu F_f leží ve směru posuvu a ve směru největší tuhosti obráběcího stroje. Tvoří asi čtvrtinu velikosti řezné síly, ale na celkovém příkonu se podílí málo. Rychlost posuvu je v porovnání s řeznou rychlostí malá.

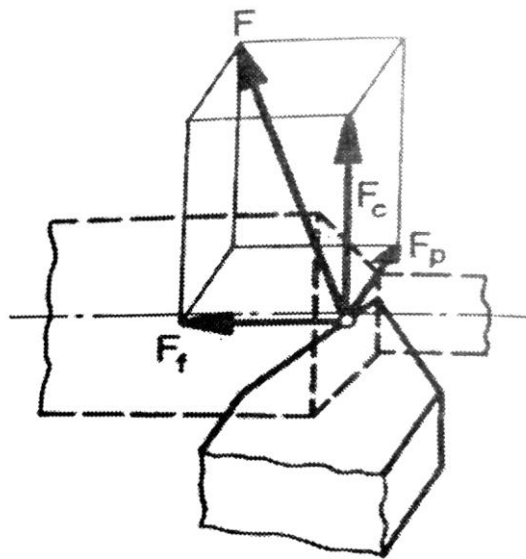
Pasivní síla F_p působí kolmo na obráběnou plochu. Tato síla bývá velká asi 40 % velikosti řezné síly. Fakt, že pasivní síla působí ve směru nejmenší tuhosti obráběcí soustavy, ovlivňuje jak přesnost obrobenej plochy (elastická deformace obrobku), tak i chvění při obrábění (čím menší tuhost soustavy, tím větší možnost chvění). [1], [2]



Obr. 3.1 Ortogonální řezání (vlevo), vázané řezání (vpravo) [1]



Obr. 3.2 Síly při ortogonálním řezání [1]



Obr. 3.3 Síly při vázaném řezání [1]

3.1.1 Nepřímé měření sil při obrábění

Síly při řezání lze zjišťovat dvěma způsoby - přímým a nepřímým. Při nepřímém měření se vychází převážně z výkonu elektromotoru obráběcího stroje. Ze vztahu:

$$P_c = F_c * v_c, \quad (3.1)$$

kde P_c je řezný výkon,

F_c řezná složka síly obrábění,

v_c řezná složka rychlosti obrábění,

vyplývá, že nepřímým měřením lze zjistit jen řeznou složku síly řezání. Tuto složku můžeme stanovit z výkonu, pro jehož zjištění se používají wattmetry, které dávají přímý údaj. Podle požadované přesnosti lze použít různé zapojení wattmetrů. Při stanovování řezné složky síly obrábění vycházíme z užitečného výkonu, který je potřebný k vlastnímu obrábění. Užitečný výkon $P_{už}$ stanovíme odečtením výkonu stroje při obrábění P_c od výkonu stroje při chodu naprázdno P_o . Pak tedy platí:

$$P_{už} = P_c - P_o , \quad (3.2)$$

potom řezná složka síly řezání je:

$$F_c = \frac{P_{už}}{v_c} . \quad (3.3)$$

Výhoda této nepřímé metody je v jednoduchosti provedení, nenáročnosti na drahé přístroje a lze ji použít u veškerého obrábění. Nevýhodou je omezená přesnost měření, což je způsobeno rozdílnou účinností stroje při zatížení a při chodu naprázdno. Další nevýhodou je vliv zanedbání všech ostatních složek síly řezání na výkon elektromotoru obráběcího stroje.

Další možností stanovení řezné složky síly obrábění je z točivého momentu. Podobně jako předchozí metodu, lze i tuto realizovat měřením celkového výkonu pomocí univerzálního zapisovacího přístroje. Nejprve se změří výkon, vysune se nástroj ze záběru a při použití stejných otáček se vřeteno obráběcího stroje zatěžuje vhodnou mechanickou brzdou do té doby, než dosáhne stejného údaje, jaký byl na měřicím přístroji v předchozím měření. Potom je točivý moment:

$$M_k = \frac{F_c * D}{2} = M_{kb} , \quad (3.4)$$

kde M_{kb} je točivý moment vyvolaný mechanickou brzdou,

D je průměr nástroje nebo obrobku,

M_k je točivý moment od řezné složky síly obrábění.

Výsledky tohoto měření neovlivňuje rozdílná účinnost obráběcího stroje při zatížení a chodu naprázdno, jak tomu bylo v předchozím případě, ale proměnlivost součinitele tření na brzdě. Tato metoda je využívána méně. [3]

3.1.2 Přímé měření sil při obrábění

Síla řezání lze měřit také přímo a to tzv. dynamometrem, který pracuje na principu měření elastické deformace soustavy stroj – nástroj - obrobek. Na všechny dynamometry jsou kladeny vysoké nároky na tuhost, citlivost, stálost údajů, reprodukovatelnost, konstrukci a minimální setrvačnost. Celý dynamometr se skládá z pružného členu, který přebírá vnější zatížení, snímač, který měří mechanickou veličinu změny pružného členu na hodnotu analogického parametru měřicí aparatury a přijímač, který zesiluje a zpracovává signál snímače a může i zapisovat velikost zatížení. Dynamometry lze rozdělit podle počtu měřených složek síly řezání – jedná se o jednosložková, dvousložková, třísložková měřidla a měřidla na měření krouticích momentů. Dál je můžeme dělit podle způsobu přenosu působení síly z deformačního členu na indikační, a to na mechanické, hydraulické, pneumatické, elektrické, optické aj. Třetí hledisko může být podle metody obrábění, jako je soustružení, frézování, vrtání nebo broušení.

Mechanické dynamometry se používají nejčastěji ke kontrole ostatních druhů vzhledem k tomu, že zde lze vyloučit nežádoucí rušivé vlivy. Působení síly se přenáší přímo např. na číselníkový úchylkoměr. Velikost síly je zjišťována z deformace silových pružin, kroužků, nosníků apod. Nevýhoda těchto měřidel je v závislosti měření na teplotě, obtížné změně rozsahu měření, potřebě vymezení vůlí v mechanismech, únavě materiálu a ve velké setrvačnosti systému, kvůli níž nelze měřit dynamicky.



Obr. 3.4 Piezoelektrický dynamometr pro soustružení [5]

Hydraulické dynamometry jsou založeny na účinku působení síly na píst, jehož pohyb způsobuje změnu tlaku v kapalině. Tato změna může být zaznamenávána např. manometrem. Výhodou těchto přístrojů je jednoduchá konstrukce a možnost snadného měření více složek současně. K nevýhodám patří malá citlivost, velká setrvačnost a nutnost velmi dobrého utěsnění celého systému, proto je nemožné použití pro dynamická měření.

Pneumatické dynamometry pracují na bázi snímače deformace pneumatického systému klapka – tryska, který využívá dynamických vlastností vzduchu procházejícího štěrbinou. Výhodou je jednoduchá obsluha a údržba, vysoká spolehlivost a citlivost vzhledem k elektrickým způsobům. Dál také nízké náklady na pořízení a provoz.

Další možností, jak měřit síly při obrábění je pomocí piezoelektrických dynamometrů (obr. 3.4). Pracují na základě vzniku elektrického náboje na povrchu určitých krystalů při mechanickém zatížení. Pro dynamometry se používá měřicí deska, která je vyříznutá z daného krystalu. Při zatížení dynamometru je velikost náboje přímo úměrná velikosti působící síly a při snížení zatížení opět klesá. [5]

3.1.3 Síla řezání a řezný výkon

Síla řezání F je rovna odmocnině z kvadratického součtu všech složek. Tedy:

$$F = \sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2} \quad (3.5)$$

a všechny síly se uvádí obvykle v N. Z řezné síly lze vypočítat řezný výkon P_c :

$$P_c = \frac{F_c \cdot v_c}{60}, \quad (3.6)$$

kde P_c se uvádí ve W,

F_c v N

a v_c je řezná rychlost udávaná v m/min.

Dalším důležitým vztahem je vztah pro výpočet měrné řezné síly k_c . Lze jej získat poměrem řezné síly na plochu řezu:

$$k_c = \frac{F_c}{A_D}, \quad (3.7)$$

kde k_c se uvádí v N/mm^2 ,
 průřez odřezávané vrstvy A_D v mm^2 .

Řezný výkon lze vyjádřit i v poměru k úběru materiálu U :

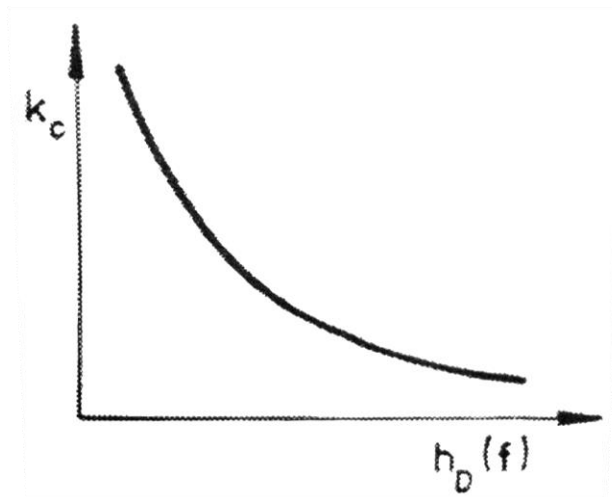
$$p_c = \frac{P_c}{U} \quad (3.8)$$

$$U = A_D * v_c, \quad (3.9)$$

kde U je v cm^3/min

z toho plyne, že $p_c = \frac{P_c}{A_D * v_c}$. (3.10)

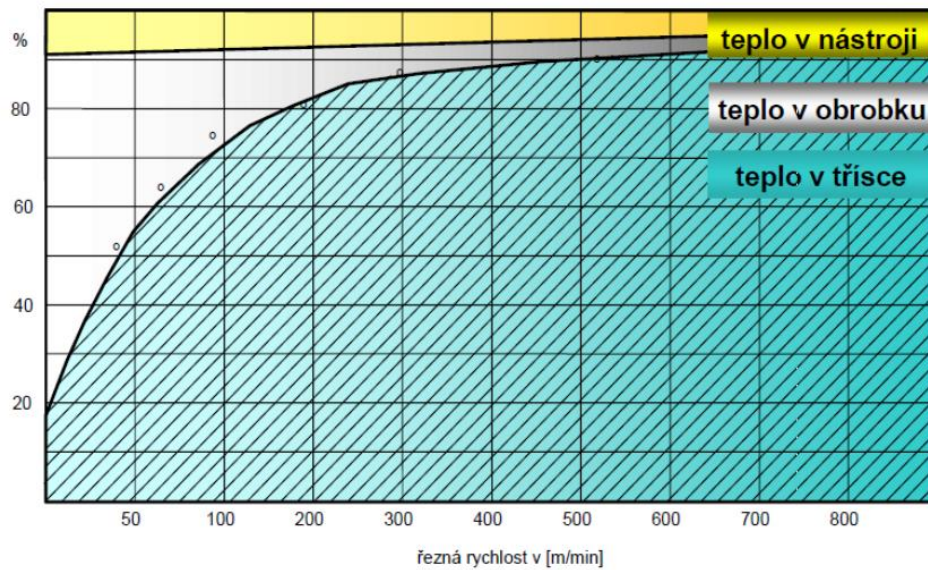
Na velikost měrné řezné síly má vliv obráběný materiál, posuv (obr. 2.5), řezná rychlost a např. úhel řezu. S rostoucím posuvem nebo tloušťkou odřezávané vrstvy klesá měrná řezná síla. [1]



Obr. 3.5 Závislost měrné řezné síly na posuvu [1]

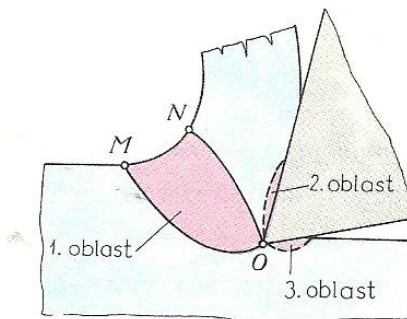
3.2 Teplo a teplota při řezání

Teplo i teplota hrají při obrábění důležitou roli. Teplo vzniká transformací příkonu obrábění. Během této transformace dochází ke zvyšování teploty jak třísky, obráběcího nástroje, obrobku, tak i řezného celého prostředí. Z obr. 3.6 je patrné, že se zvětšující se řeznou rychlostí se zvyšuje poměr tepla odvedeného třískou. Čím jsou vyšší teploty při obrábění, tím víc dochází k opotřebení nástroje, možnému zhoršení kvality obráběného povrchu a horší přesnosti.



Obr. 3.6 Odvod tepla v závislosti na řezné rychlosti [6]

Tři hlavní zdroje tepla se nacházejí v oblasti plastické deformace při tvoření třísky (obr. 3.7). Je to primární (1. oblast), sekundární oblast plastické deformace (2. oblast) a povrchová plocha řezu (3. oblast).



Obr. 3.7 Oblasti plastické deformace [7]

Na konci ostří nástroje není nikdy dokonalá špička, vždy existuje určitý poloměr ostří. V důsledku toho odchází část obráběného materiálu po čele a malá část pod hřbet obráběcího nástroje. Tam se plasticky deformuje a dochází k ohřevu povrchové vrstvy plochy řezu neboli plochy, která je obrobená. Z toho plyne, že část materiálu, která jde pod hřbet nástroje, nelze odebrat. Této vrstvě říkáme minimální tloušťka odřezávané vrstvy. Zde platí přímá úměra. Čím větší je poloměr ostří, tím je i větší minimální tloušťka odřezávané vrstvy.

Během obrábění mohou vznikat dvě odlišná teplotní pole. Jejich vznik je závislý na řezných rychlostech. Při nízkých řezných rychlostech je nejvyšší teplota na špičce nástroje. Oproti tomu při vyšších řezných rychlostech je maximální teplota vzdálena od ostří směrem do nástroje.

Největší vliv na teplotu řezání má řezná rychlost, méně posuv a nejméně teplotu ovlivňuje hloubka třísky. Proto se i v tomto pořadí stanovují řezné podmínky. Teplotu lze měřit experimentálně buď dotykově, nebo bezdotykově.

3.2.1 Měření teploty

Dotykové možnosti měření jsou např. dilatační, bimetalové, tlakové, odporové, termoelektrické, krystalové teploměry nebo tekuté krystaly. Krystalové teploměry pracují na principu změny kmitočtu krystalového výbrusu v rezonančním poli tranzistorového oscilátoru v důsledku změny teploty. Tekuté krystaly lze použít při teplotách od -20 do $+250$ °C a jsou přesné na $0,5$ °C. Jejich velkou nevýhodou je pomalé měření. Obvykle se čeká na objektivní hodnotu 15 - 20 sekund. Používají se jako fólie, které se přiloží na měřený povrch. Dále je lze použít formou nátěru. Tekuté krystaly se zbarvují v závislosti na teplotě. Teplota se tedy posuzuje vizuálně. Nevýhodou dotykových metod je požadavek přesného dotyku, takže i malého čidla, aby nedocházelo zároveň k měření jiné části, než je požadováno a tím k znehodnocení výsledků měření.

Mezi bezdotyková měřidla patří radiační teploměry (jasové pyrometry, pyrometry na celkové záření) nebo termovizní kamera. Výhodou radiačních teploměrů jsou dobré dynamické vlastnosti, ale velkou nevýhodou je malá přesnost měření, která se může pohybovat až v desítkách stupňů Celsia. Termovizní kamera pracuje na podobných principech jako radiační teploměry, ale její výhodou je vizualizace teploty, což umožní lepší sledování měnících se hodnot teploty. Lze s její pomocí hodnoty dále zpracovávat a vyhodnocovat. To s sebou ale přináší vysoké náklady na zařízení. Její nespornou výhodou je rozsah měření od -40 do $+2000$ °C s rozlišením až $0,03$ °C a s přesností

± 1 %. U bezdotykových metod měření teploty je ta výhoda, že nedochází k ovlivnění měření a měřenému místu. Ale nevýhodou je ovlivnění prostředím, vlhkostí, prašností, vzdáleností mezi měřicím přístrojem a měřeným objektem. Musí se proto co možná nejlépe upravit měřicí prostředí a správně seřídít měřidlo.

Např. u soustružení se nejčastěji měří teplota v místě řezu, na obrobku, v místě vznikající třísky a na nástroji. Teplota v místě řezu může dosahovat stovek stupňů Celsia, podle zvolených řezných podmínek. Oproti tomu na obrobku je teplota jen v řádu desítek stupňů Celsia a lze zde měřit termovizní kamerou. Vznikající tříska odvádí z místa řezu nejvíce tepla, ale je těžké ji zachytit, proto je lepší se zaměřit do oblasti utváření třísky. Nejvyšší teplota v nástroji je na břitu. Je obtížné zaměřit špičku nástroje termovizní kamerou, proto je vhodnější využít termočlánků. [1], [8]

3.2.2 Snižování teploty

Teplota při obrábění lze snižovat odváděním tepla z oblasti jeho vzniku, snížením intenzity otupování nástroje, odváděním třísek z místa řezu, snížením řezné rychlosti nebo např. užitím řezných kapalin. Řezné, neboli procesní kapaliny mají několik účinků – chladicí (odvádí teplo), mazací (zmenšuje množství vzniklého tepla), čistící (odstraňuje třísky), teplotně stabilizuje obrobek a má pozitivní vliv na vlastnosti povrchové vrstvy a tvorbu nárůstků. Procesní kapaliny mohou být ve formě vodních roztoků různých chemických sloučenin, olejových emulzí, řezných olejů nebo syntetických kapalin. Přesný přívod procesních kapalin tedy lépe odvádí teplo a zmenšuje tření. Oproti tomu jejich používání zvyšuje náklady a komplikuje recyklaci třísek. [7], [9]

3.3 Opotřebení nástroje

Během obrábění dochází vždy k opotřebení a otupení nástroje, a to především, jeho břitu. Každý nástroj má danou určitou možnou míru opotřebení. Po překročení této míry je nutné nástroj vyměnit za nový. Míra opotřebení je takový stav, při kterém nástroj nedokáže vyrobit stejně kvalitní povrch jako ve stavu, kdy byl zcela neopotřeben. Optimální opotřebení nástroje je rozdílné pro hrubování a pro obrábění na čisto. Při hrubování je optimální opotřebení určeno maximální životností, na rozdíl od obrábění na čisto, kdy je určeno schopností zajistit opakovaně stejně kvalitní povrch obrobku. Životnost nástroje je určena součtem realizovaných trvanlivostí na nástroji.

Podle toho, jaké vlivy na daný nástroj působí, můžeme rozdělit formy opotřebení na: 1) otěr - abrazivní (brusný)

- adhezní
- difúzní
- chemický

2) plastickou deformaci

3) křehký lom

Brusný otěr je určen tvrdostí břitu. Vzniká uvolňováním měkčích částic materiálu nástroje na základě tvrdších částic obrobku (důsledek nehomogenity obou materiálů). Mezi měkké částice patří např. ferit, kobalt, nebo nikl. Oproti tomu mezi tvrdé částice můžeme zařadit třeba částice cementitu. Vždy musí platit, že nástroj je v celkovém pohledu tvrdší než obrobek. Dále mohou podporovat brusný otěr i např. rozpadlé části nárůstků, zbytky písku po odlévání obráběných součástí nebo jakkoli zpevněná část po předchozí technologické operaci. K brusnému otěru dochází primárně při nízkých řezných rychlostech, protože při vyšších se tvoří na spodní straně třísky tzv. tekoucí vrstva, která neumožňuje abrazivní otěr břitu. Z toho vyplývá, že k brusnému otěru dochází hlavně během obrábění, při kterém jsou použity nástroje z nástrojových a rychlořezných ocelí.

Adhezní otěr je v podstatě vytrhávání částic z břitu obráběcího nástroje. Tento jev vzniká na základě adheze (= přilnavosti) řezného nástroje a obráběné součásti. Vyskytuje se obdobně jako brusný otěr při nižších řezných rychlostech a tedy u nástrojů z nástrojových a rychlořezných ocelí.

Difúzní otěr vzniká tam, kde dojde při obrábění k dosažení určité teploty v místě styku nástroje a obrobku. Dochází k přestupu hmoty nástroje do obrobku pomocí difúze. Oproti brusnému a adheznímu otěru se difúzní vyskytuje u nástrojů ze slinutých karbidů, keramiky nebo např. diamantu. U slinutých karbidů obrábějících oceli nebo litiny dochází k difúzi uhlíku, kobaltu, wolframu, titanu a železa. Jak prostupují prvky z nástroje do obrobku a naopak, mění se i chemické složení obou materiálů. Dochází tak ke vzniku nových vrstev. Nové vrstvy nemohou vznikat jen difúzí, ale i oxidací vzdušného kyslíku nebo reakcí s řeznou kapalinou.

Plastická deformace břitu vzniká u všech nástrojových materiálů, pokud teplota vystoupí nad určitou hodnotu. Jakmile dojde k této teplotě, okamžitě klesne tvrdost nástroje z důvodu strukturních změn v materiálu. Teplotě, při které tento děj probíhá, říkáme limitní. Pokles tvrdosti materiálů je různý. Např. u nástrojových a řezných ocelí

je pokles prudký (během několika sekund dojde ke zničení břitu), u ostatních řezných materiálů je mírnější. Během plastické deformace dochází k tzv. lavinovitému opotřebení. To spočívá v přesunu tenké vrstvy, která je na ostří nástroje a zajišťuje jeho tvrdost. Po odstranění této vrstvy dojde k rychlému opotřebení nástroje.

Křehký lom je výsledek velkého působení sil na břit nástroje. V případě křehkého lomu se vylamuje buď vnější část břitu, menší částice na ostří nebo vznikají povrchové trhliny na nástroji během jeho broušení. V prvním případě dochází ke zničení nástroje, ve druhém ke snížení kvality a tím i trvanlivosti nástroje a u posledního případu se jedná také o snížení trvanlivosti při zachování řezných podmínek. V celkovém součtu neočekávaných příčin přerušeni výroby se křehký lom vyskytuje jako jeden z deseti. Což je značné procento pokud bereme v úvahu, že taková příčina může způsobit i porušení obráběcího stroje.

3.3.1 Formy opotřebení

Podle výše zmíněných příčin můžeme vidět na nástrojích různé formy opotřebení (obr. 3.8). Jednou z nejrozšířenějších forem opotřebení, je opotřebení na hřbetu břitu (obr. 3.9). Lze zde měřit průměrnou šířku opotřebení. Mírné rovnoměrné opotřebení hřbetu u hlavního a vedlejšího ostří a poloměru špičky může být vhodné pro kvalitu obráběného povrchu. Pokud je ale příliš velké, výsledkem je kvalita povrchu neodpovídající požadavkům, nepřesné rozměry a zvyšování tření způsobené změnou geometrie břitu.



Obr. 3.9 Opotřebení hřbetu nástroje [10]

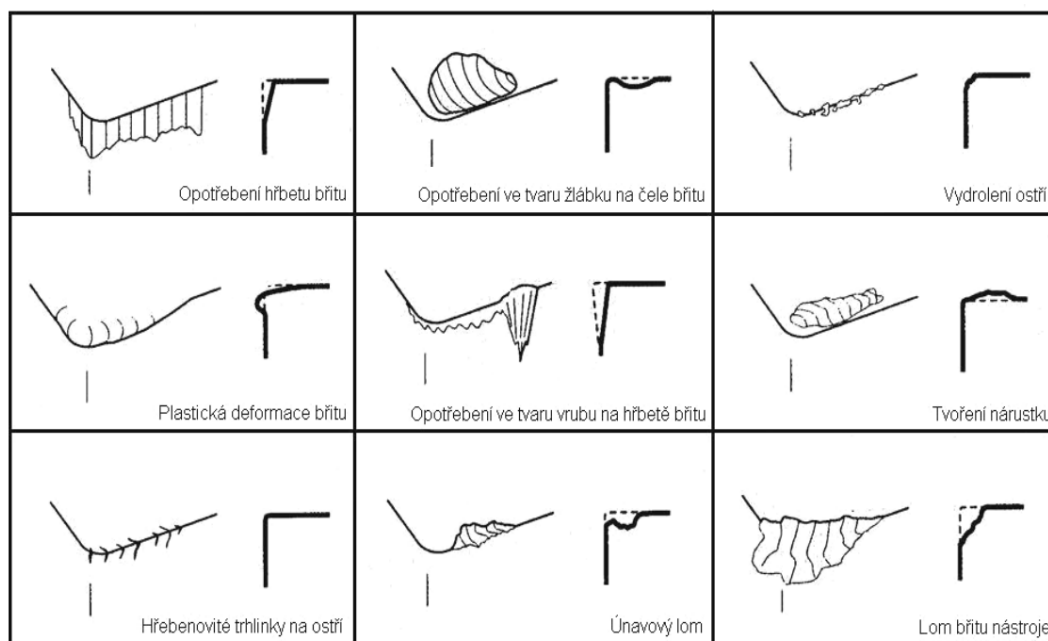
Druhou formou opotřebení může být opotřebení ve tvaru žlábků na čele (obr. 3.10). Toto opotřebení vzniká především difúzním a abrazivním otěrem a to při vyšších řezných rychlostech. Žlábek vzniká současně dvěma způsoby. Jednak úběrem řezného materiálu nástroje v důsledku abraze a dále difúzí v místě břitu s nejvyšší teplotou (mezi třískou a břitem). Této formě opotřebení lze zabránit nebo alespoň snížit její projev volením vhodných materiálů tak, aby měly k sobě co možná nejmenší možnou afinitu. Pokud dojde k příliš velkému opotřebení formou žlábků, hrozí nebezpečí zeslabení ostří v důsledku změny směru působení řezných sil a změny geometrie břitu a tvaru třísek. Nejdůležitějším parametrem pro vyhodnocení je hloubka žlábků. V dnešní době je rozšířeno využívání výměnných břitových destiček, které mají v místě čela různé utvařeče třísek. Pak tedy vyhodnocování čela řezného nástroje nemá význam.



Obr. 3.10 Opotřebení nástroje žlábkem na čele břitu [10]

Třetím příkladem může být forma hřebenových trhlinek, které vznikají únavou. Jde o důsledek střídání mechanických a tepelných vlivů na břit nástroje během přerušovaného řezu. Trhlinky vznikají kolmo na ostří. Během obrábění se mění tloušťka třísky, takže i odvod tepla z místa řezu. V tomto případě teplotní problém nevyřeší řezná kapalina, protože v případě jejího použití, by se zvětšil rozdíl teplot při záběru a při výstupu břitu z materiálu.

Poslední příklad formy opotřebení, který uvedu, je tzv. chipping. Jedná se o jev vznikající u nástrojů ze slinutých karbidů, kdy se postupně vylamují drobné částice ostří. Nástroj lze dále používat, ale jeho trvanlivost je snížena. Většinou je to výsledek nevhodné volby řezného nástroje. [1], [9], [10], [11]



Obr. 3.8 Formy opotřebení břitů nástrojů [11]

3.3.2 Trvanlivost nástroje

Trvanlivost nástroje (obr. 3.11) je doba, kterou nástroj může pracovat, dokud není potřeba jeho výměna (od naostření po otupení) a je určena především řeznými podmínkami. Pomocí řezné rychlosti lze trvanlivost vyjádřit jednoduchým Taylorovým vztahem:

$$T = C_T * v_c^{-m}, \quad (3.11)$$

kde T je trvanlivost,

C_T a m jsou empirické konstanty,

v_c je řezná rychlost [m/min].

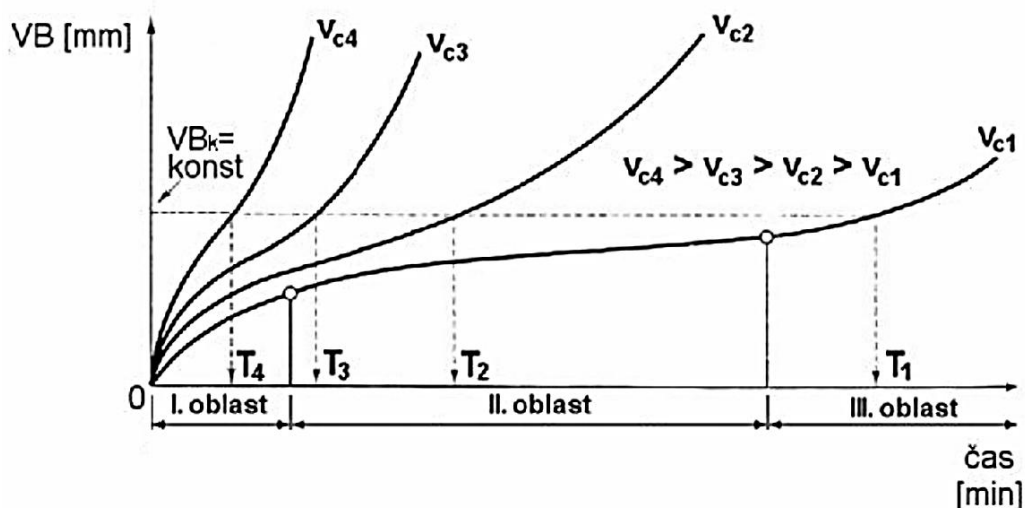
Konstanta C_T závisí na materiálu obráběné součásti a pohybuje se v rozmezí $10^8 - 10^{12}$. Velikost konstanty m je dána materiálem a určuje řezivost neboli kvalitu obráběcího nástroje. V důsledku stálého zlepšování kvality materiálů hodnota m stále klesá.

nástrojové oceli $m = 10 - 8$ (až 6)

rychlořezné oceli $m = 8 - 5$ (až 3)

slinuté karbidy $m = 5 - 2,5$ (až 2)

řezná keramika $m = 2,5 - 1,5$ (až 1,2)



Obr. 3.11 Vliv opotřebení břitu na čase [10]

Na obrázku 3.11 je označeno opotřebení nástroje jako VB , $T_1 - T_4$ časy a $v_{c1} - v_{c4}$ jsou řezné rychlosti. K určení optimálních řezných podmínek je používán komplexní Taylorův vztah. Bere v úvahu vztah mezi trvanlivostí břitu a řeznou rychlostí v_c , posuvem f a hloubkou řezu a_p .

$$v_c = \frac{C_v}{a_p^{x_v} \cdot f^{y_v} \cdot T^{\frac{1}{m}}}, \quad (3.12)$$

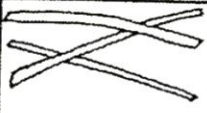
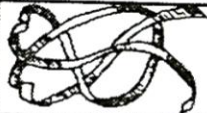

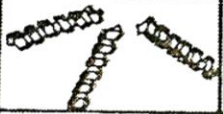
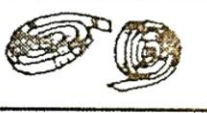


kde C_v je empirická konstanta,

x_v, y_v, m jsou empirické exponenty. [1], [10]

3.4 Tvorba třísek

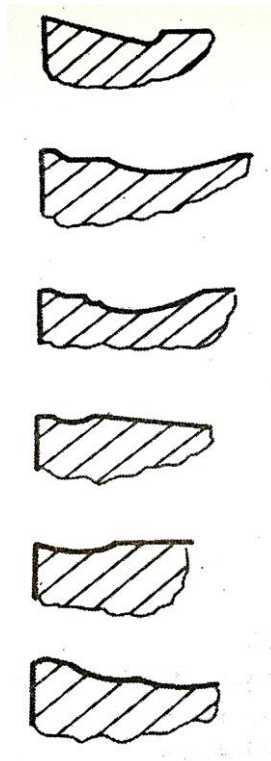
Tříška vzniká odřezáváním materiálu a její vlastnosti jsou závislé na řezné rychlosti, posuvu, hloubce řezání, chlazení, aj. U většiny materiálů vzniká tříška tvářená, což znamená, že materiál před oddělením projde primární plastickou deformací a je zpevněn. U malého počtu materiálů jako je třeba sklo, některé druhy plastů apod., se tvoří tříška netvářená. Tvářená tříška může být buď plynulá, nebo dělená. Při výrobě se kladou vysoké nároky na tvar tvořené třísky. Zde se vychází z grafů, ve kterých jsou zaznamenány oblasti vhodného utváření třísky. Závisí na materiálu, hloubce třísky, posuvu a také na tom, zda se jedná o hrubování nebo obrábění načisto.

Tvary třísek lze hodnotit podle tabulek, které uvádějí různé možnosti tvarů a hodnocení, zda jsou takové třísky vhodně nebo nevhodně utvářené. Příklad tabulky, ze které lze hodnotit tvar třísek je na obrázku 3.12.

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

Obr. 3.12 Tabulka pro hodnocení tvarů třísek (W – součinitel objemu třísek) [1]

Aby docházelo co nejvíce k lámání třísek a tím jejich lepšímu skladování méně náročnému na prostor, používají se lamače nebo tzv. utvařeče třísek. Vyrábějí se lisováním vyměnitelných břitových destiček, které se liší jak pro různé materiály, tak i pro různé operace. Nejčastěji jsou rozděleny pro hrubování, střední operace a obrábění načisto. Příklady utvařečů jsou na obrázku 3.13. [1]



Obr. 3.13 Příklady utvařečů třísek [1]

4 Hodnocení kvality povrchové vrstvy

4.1 Drsnost při obrábění

Drsnost obráběného povrchu patří mezi nejdůležitější požadavky na kvalitu obrobků. Čím je drsnost větší, tím je obrobek náchylnější k otěru. Nelze vyrobit povrch, který by měl nulovou drsnost. Drsnost je způsobena obráběcím nástrojem a udává se v mikrometrech. Břit obráběcího nástroje zanechává stopy na obrobku, které souvisí jak na fyzikálních, tak i mechanických vlastnostech. Nejčastěji na tvaru a geometrii břitu, na zvolených řezných podmínkách jako je posuv a řezná rychlost. Další faktor, který ovlivňuje drsnost obrobené plochy je tuhost obráběcí soustavy, způsob, jakým je součást upnuta do stroje, použití řezné kapaliny, opotřebením nástroje nebo třením třísky na nástroje o již obrobenou plochu. Drsnost není ani ve všech směrech daného povrchu stejná. Závisí na směru obrábění. Např. u soustružení, hoblování, vrtání nebo vyvrtávání je drsnost povrchu větší v příčném směru (= směr kolmý na řezný pohyb). Oproti tomu u frézování je větší drsnost ve směru podélném (= směr řezného pohybu). U broušení, honování, lapování a jiných dokončovacích operací je drsnost téměř stejná ve všech směrech. Při určování drsnosti vždy zapisujeme tu větší.

Požadovaná drsnost se uvádí na výkresech většinou hodnotou R_a , což je střední aritmetická úchylka. Vyjadřuje střední hodnotu nejvyšších a nejnižších hodnot profilu povrchu od střední čáry. Hodnota R_a může být uvedena jen jako jedno číslo nebo může být připsána horní a dolní hranice. Požadavky na drsnost se volí podle funkce součásti a jejího namáhání. Záleží na tom, jestli bude součást na jinou součást dosedat, nebo bude v pevném spojení nebo se třeba bude posouvat. Vždy se předepisuje takový povrch, aby vyhovoval svému využití, ale nebyl jemnější, než je nezbytně nutné, protože by zbytečně rostl strojní čas výroby a s ním i cena obrobku.

Drsnost může být udána i stupněm přesnosti IT. U obou hodnot IT i R_a platí, že čím je číslo menší, tím je obrobený povrch přesnější, kvalitnější. Pro názornost přikládám tabulku 3.1. [1], [12]

Tab. 3.1 Přehled IT a Ra při obrábění [13]

Technologie		IT	Ra [μm]
soustružení	hrubování	11 - 14	12,5 - 100
	obrábění načisto	9 - 11	1,6 - 12,5
	jemné obrábění SK	7 - 9	0,4 - 1,6
	obrábění diamantem	5 - 6	0,2 - 0,8
	obrábění na přesných revolverových soustruzích a automatech	7 - 9	1,6 - 6,3
frézování	hrubování	10 - 13	6,3 - 25
	načisto	9 - 11	1,6 - 6,3
	načisto čelní	7 - 11	1,6 - 6,3
	jemné	7 - 8	0,8 - 1,6
vrtání šroubovým vrátkem	-	11 - 13	3,2 - 12,5
vyhrubování	-	9 - 10	1,6 - 6,3
vystružování	-	6 - 8	0,4 - 1,6
zahlubování	-	7 - 10	1,6 - 6,3
vyvrtávání	nahrubo	11 - 14	12,5 a více
	načisto	8 - 10	1,6 - 6,3
	jemné	5 - 8	0,2 - 1,6
hoblování	hrubování	11 - 12	6,3 - 12,5
	načisto	8 - 11	3,2 - 6,3
	načisto širokým nožem	7 - 9	0,8 - 3,2
obrážení	hrubování	12 - 13	6,3 - 12,5
	obrábění načisto	8 - 11	3,2 - 6,3
broušení	hrubování	9 - 11	0,8 - 6,3
	načisto	5 - 7	0,2 - 1,6
	jemné obrábění	3 - 4	0,025 - 0,4

4.1.1 Měření drsnosti

Měřit drsnost povrchu lze několika způsoby. Jednou z možných metod je kvalitativní hodnocení. Spočívá v porovnávání člověka hmatem a zrakem vzorových ploch s obráběnou plochou. Rozlišovací schopnost zrakem je asi 1 μm a hmatem až 0,1 μm . Ale je zde velké riziko nepřesnosti v důsledku lidského faktoru.

Druhým způsobem je nepřímé kvantitativní měření. Zde se porovnává obrobená plocha s etalonovou komparačními měřidly. Výsledkem měření je rozdíl mezi oběma plochami.

Jiné měření může být dotykovými profiloměry s postupnou transformací profilu. Během měření se posouvá měřící dotek po povrchu obrobku. Výškové změny jsou zaznamenávány se zvětšením a následně dochází k vyhodnocení.

Dalším způsobem je např. bezdotkový profiloměr, který pracuje na fotoelektrickém principu a laseru. [14]

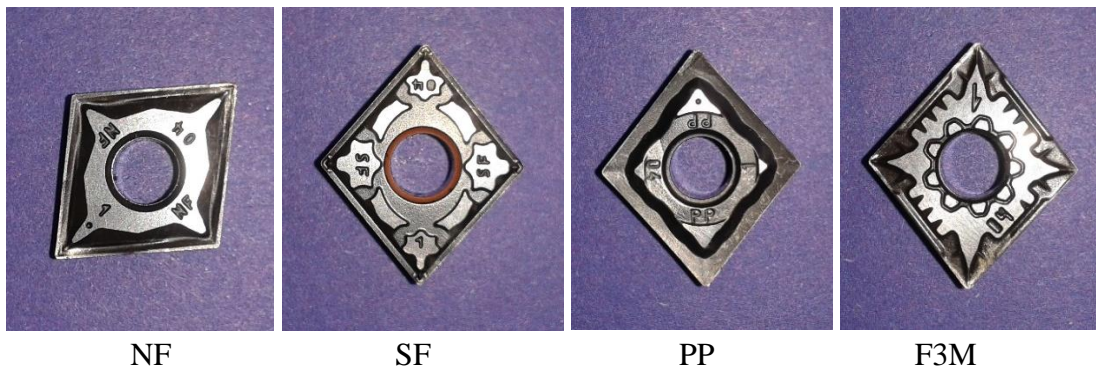
4.2 Další možnosti hodnocení

Mezi další možnosti hodnocení kvality povrchové vrstvy může patřit i hodnocení z hlediska zbytkového napětí nebo z hlediska mikrotvrdosti. Zbytkovému napětí se v této práci nevěnuji, proto se zde o něm podrobněji nezmiňuji. Mikrotvrdostí se zabývám v části, kde je popsán experiment.

5 Experimentální zkoušky při obrábění

5.1 Popis experimentu

Cílem experimentu je porovnání čtyř vyměnitelných břitových destiček s různými utvařeči třísek - obr. 5.1 zleva utvařeč NF, SF, PP a F3M. A to při stejných řezných podmínkách, z hlediska tvaru třísky, vznikajících sil při obrábění drsnosti obrobeného povrchu a mikrotvrdosti. Pro soustružení jsem si zvolila austenitickou AISI 304 žíhanou (obr. 5.2 vlevo) a austeniticko-feritickou korozivzdornou ocel - dále jen duplexní ocel (obr. 5.2 vpravo).



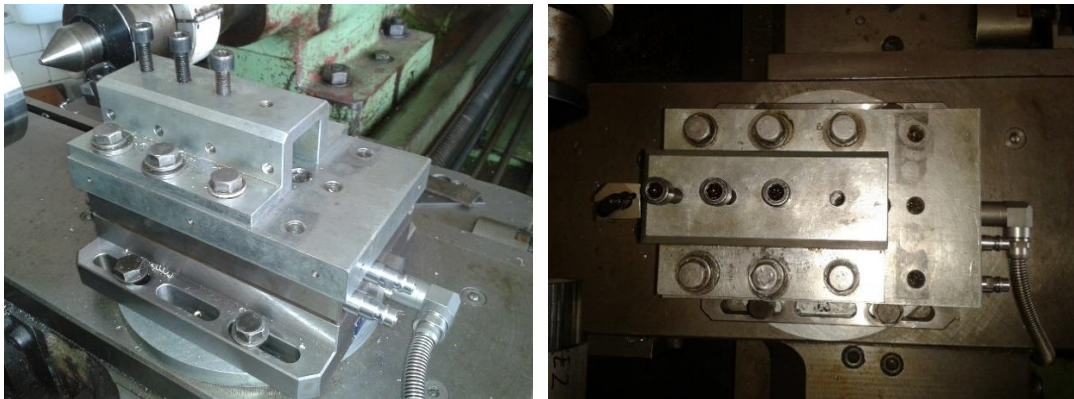
obr. 5.1 Zkoumané utvařeče třísek



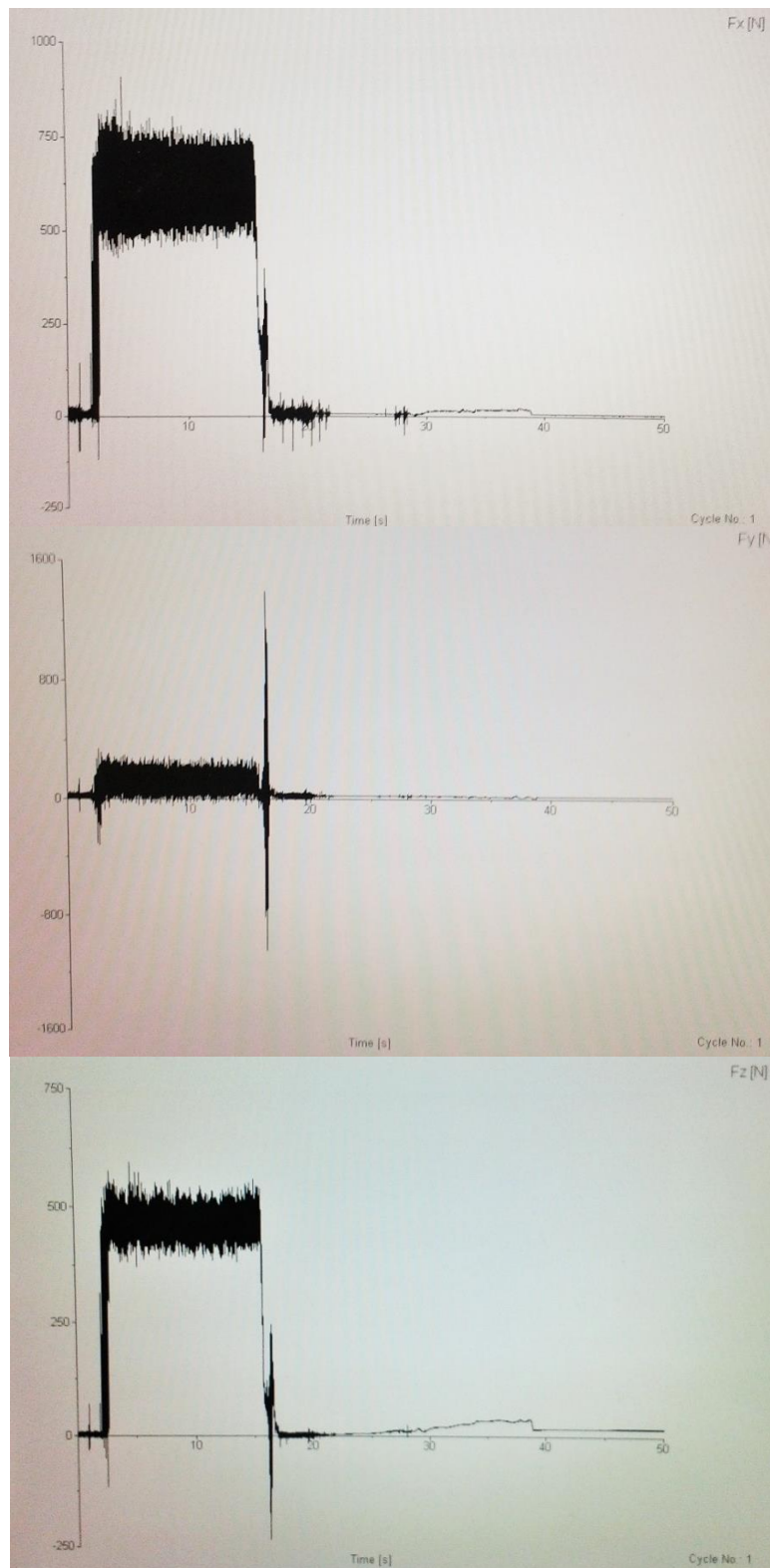
Obr. 5.2 Austenitická a duplexní ocel

Austenitická korozivzdorná ocel se používá pro potrubí nebo dřezy, tedy do prostředí namáhaného korozní kapalinou. Duplexní ocel je využívána v chemickém, potravinářském průmyslu. Je odolná i v prostředí kyselin a chlóru.

Na obou vzorcích jsem soustružila při řezné rychlosti $v_c = 140$ m/s, hloubce třísky $a_p = 2$ mm a posuvem $f = 0,14$ mm/ot úseky dlouhé 12 mm pro každou destičku. Během soustružení byl připojen soustružnický dynamometr (obr. 5.3), přes který byly zaznamenávány tři složky sil pomocí počítače a programu DynoWare. Složka síly posuvu F_f (F_x), pasivní síly F_p (F_y) a složka řezné síly F_c (F_z). Výstupem programu jsou grafy pro každou složku. Příklad grafů z jednoho měření jednou destičkou je uveden na obrázku 5.4 (shora: F_f , F_p , F_c).



Obr. 5.3 Dynamometr a vyhodnocovací zařízení



Obr. 5.4 Příklad grafů po soustružení jednou destičkou

Z prvního měření prvního vzorku jsem získala tři grafy pro každou ze čtyř destiček. Z každého grafu lze v programu nechat spočítat průměrnou hodnotu každé síly, její maximum a minimum. Následně jsem na pěti různých místech (rozmístěných rovnoměrně od sebe) měřila drsnoměrem drsnost obrobeneho povrchu opět pro každou destičku zvlášť (obr 5.5).



obr. 5.5 Měření drsnoměrem

Z každého měření jsem získala hodnoty R_a , R_y , R_z a R_q . Pro mé další zpracování byly nejdůležitější hodnoty R_a , což je střední aritmetická úchylka a $R_z = R_{max}$, které vyjadřuje rozdíl mezi hodnotou nejvyššího výstupku a nejnižší prohlubně na měřeném úseku. Celé měření včetně soustružení jsem provedla ještě jednou, tentokrát v hlubší vrstvě. Po každém soustruženém úseku každé destičky jsem odebrala třísky k jejich následnému porovnání (obr. 5.6).

Celý experiment jsem uskutečnila stejným způsobem znovu, ale na vzorku austeniticko-feritické korozivzdorné oceli (dále jen duplexní ocel).



Obr. 5.6 Odebírané třísky

5.2 Měření mikrotvrdomosti

V rámci projektu Tricanter – Okuma jsem se zúčastnila měření mikrotvrdomosti a mohla použít naměřené hodnoty ke srovnání.

Při přípravě metalografických vzorků byly jednotlivé vzorky ocele zalévány za tepla i za studena o velikosti 30 a 40 mm. K lisování byla použita pryskyřice DuroFast, která je určená k zachování ostrých hran při následném broušení a leštění metalografických výbrusů. Lisování proběhlo na stroji CitoPress-10 (obr. 5.7), při době ohřevu 4 min, teplotě 180 °C, tlaku 300 Pa a době chlazení 2 min.



Obr. 5.7 Lisovací stroj CitoPress-10

Po ochlazení vzorků následovalo broušení na automatické metalografické brusce Tegamin 25 (obr. 5.8). Aby se předešlo tepelnému a mechanickému ovlivnění povrchu vzorku po řezání, byla velikost odbrušované vrstvy v rozmezí 0,5 až 1,5 mm. Brousilo se nejprve pod vodou brousicím plátnem grit 80, grit 120 a naposledy grit 320. Na vzorky byl nastaven přítlak 30 N a broušení probíhalo pro každé plátno 3 minuty. Po broušení následovalo leštění a to leštícím kotoučem MD Largo, na kterém byla nanesena emulze MD Lupo (diamant ve spreji 9 μm), která je na bázi alkoholu a zabraňuje korozi. Nakonec byl použit látkový leštící kotouč MD Dac (diamant ve spreji 3 μm), který je opět založen na bázi alkoholu. Zatížení vzorků při leštění bylo 20 N. Pokud by bylo zatížení větší, mohlo by dojít ke zpevnění materiálu v důsledku plastické deformace a následnému chybnému měření mikrotvrdomosti. Všechny vzorky prošly nakonec oplachem v odmašťovadle a v kapalině s lihem.



Obr. 5.8 Automatická metalografická bruska Tegramin 25

Následovalo měření tětív - u některých vzorků 7 mm a u některých 14 mm a záznam do tabulky. Naměřené hodnoty z obou délek tětív se posuzovaly dohromady. Abychom věděli, kolik vpichů a jak daleko od sebe mohou být, musel se udělat přepočít hloubek, který vychází z kroku na tětívě. Vzorky se testovaly v mikrotvrdoměru, který byl propojený s počítačem s programem HDPS ARS. Aby mělo měření smysl, zjišťuje se nejprve, jaké zatížení se použije. Zvolíme zatížení do 1 kg a zjišťujeme, jestli budou úhlopříčky po vpichu dostatečně velké ($>20 \mu\text{m}$), aby se výsledky daly použít ke zpracování. V mém případě bylo zatížení HV 0,05, což odpovídá hodnotě 50 g pro austenitickou ocel a pro duplexní bylo zatížení HV 0,1. Během měření byla teplota v laboratoři 22 °C, takže jak uvádí norma, není nutné dělat dodatečný přepočít hodnot (pokud se teplota pohybuje od 20 do 25 °C). Čas zatěžování byl 12 s.



Obr. 5.9 Vzorek

Jednotlivé vzorky (obr. 5.9) se postupně založí do mikrotvrdoměru (obr. 5.10) tak, aby byl vzorek vodorovně. Pomocí již zmíněného programu HDPS-ARS se ručně zaostří na vzorek. Dále je třeba vzorek vyrovnat tak, aby byl kolmo na vnikací tělísko a nastavit zatížení a čas zatížení. Následuje volba počtu a rozmístění vpichů a dále je měření prováděno automaticky přístrojem.



Obr. 5.10 Mikrotvrdoměr

6 Vyhodnocování výsledků

6.1 Austenitická korozivzdorná ocel

6.1.1 Síly při soustružení

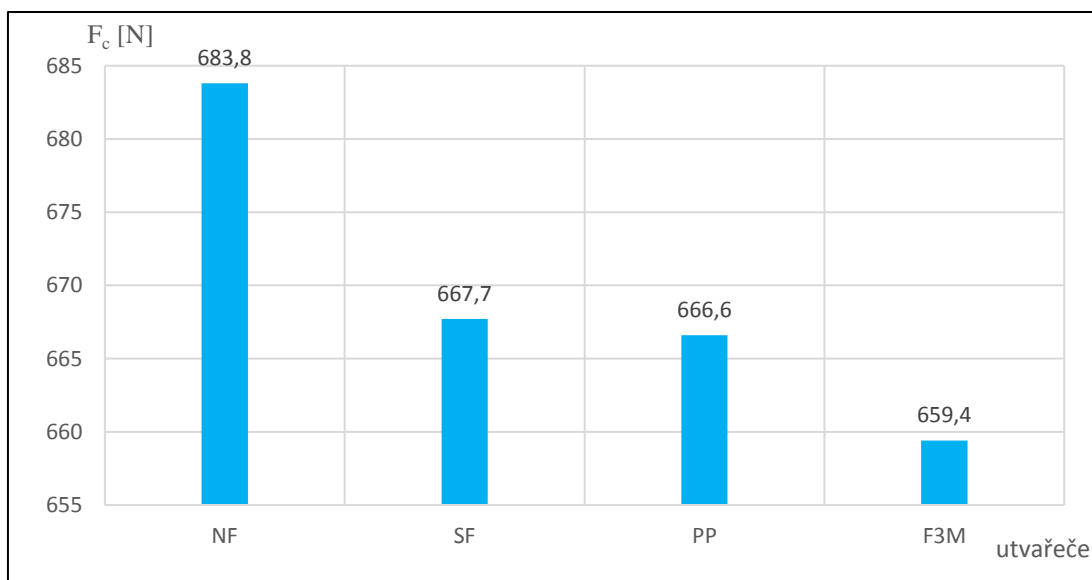
Síly vyhodnocuji pomocí tabulek 6.1 a 6.2. Všechny hodnoty jsou uvedeny v [N]. Složky F_f , F_p a F_c jsou síla posuvu, pasivní síla a řezná síla. Z naměřených hodnot se ukázalo, že všechna minima u složky F_p , tedy u pasivní síly jsou záporná čísla. Z toho plyne, že během soustružení byla destička vtahována do obrobku.

Tab. 6.1 Průměrné hodnoty sil při soustružení první vrstvy [N]

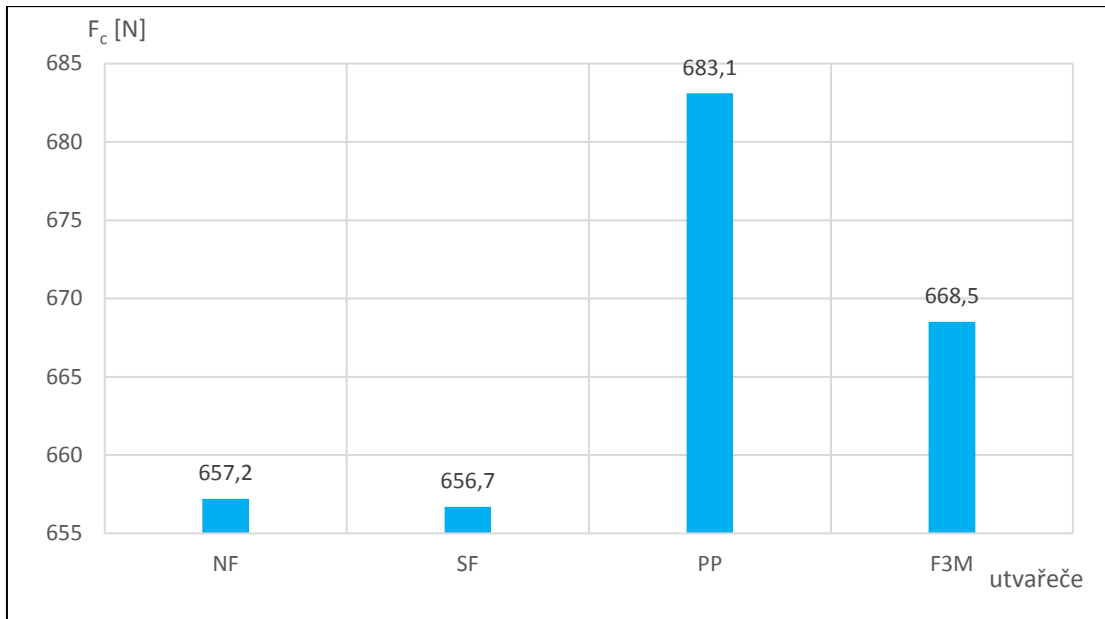
	F_f	F_p	F_c
NF	472,9	77,25	683,8
SF	413,8	111,2	667,7
PP	413,9	58,42	666,6
F3M	411,6	90,75	659,4

Tab. 6.2 Průměrné hodnoty sil při soustružení druhé vrstvy [N]

	F_f	F_p	F_c
NF	398,4	63,87	657,2
SF	392,8	121	656,7
PP	431,4	76,65	683,1
F3M	425,6	106,9	668,5



Obr. 6.1 Závislost řezné síly na utvařečích při soustružení první vrstvy



Obr. 6.2 Závislost řezné síly na utvařečích při soustružení druhé vrstvy

Z obrázku 6.1 je zřejmé, že průměrná hodnota složky řezné síly F_c byla největší při použití utvařeče NF, menší při použití SF, PP a utvařeč F3M vytvářel řeznou sílu nejmenší. Ale z obrázku 6.2, který ukazuje průměrné hodnoty řezné síly při obrábění druhé vrstvy je vidět, že největší sílu vytvářela břitová destička s utvařečem PP a naopak nejmenší SF, na kterou těsně navazuje utvařeč NF.

1) porovnání čtyř břitových destiček vzájemně po prvním obrobení:

→ nejnižší hodnoty z naměřených maxim složek F_f , F_p a F_c vykazovaly vzestupně destičky:

PP
NF
F3M
SF

→ nejnižší hodnoty z naměřených minim složek F_f , F_p a F_c vykazovaly vzestupně destičky:

F3M
SF
PP
NF

→ nejnižší hodnoty z naměřených průměrů složek F_f , F_p a F_c vykazovaly vzestupně destičky:

F3M
PP
SF
NF

2) porovnání čtyř břitových destiček vzájemně po druhém obrobení:

→ nejnižší hodnoty z naměřených maxim složek F_f , F_p a F_c vykazovaly vzestupně

destičky: NF

PP

F3M

SF

→ nejnižší hodnoty z naměřených minim složek F_f , F_p a F_c vykazovaly vzestupně

destičky: F3M

NF

SF

PP

→ nejvyšší hodnoty z naměřených průměrů složek F_f , F_p a F_c vykazovaly vzestupně destičky: NF

SF

F3M

PP

3) porovnání jednotlivých destiček v rámci obrábění první a druhé vrstvy: při obrábění první vrstvy převažují vyšší hodnoty sil u destiček NF a SF. Naopak u destičky PP převládají vyšší hodnoty sil při obrábění druhé vrstvy a u destičky F3M je počet vyšších hodnot při obrábění první a druhé vrstvy shodný.

4) rozptyl sil: při obrábění první vrstvy byl rozptyl sil u destičky NF i PP menší, než při obrábění druhé. V případě destičky SF byl poprvé větší rozptyl sil F_f a F_p , ale menší F_c , než podruhé. Destička F3M vykazovala při prvním měření menší rozptyl sil F_p a F_c , ale větší F_f , než při druhém.

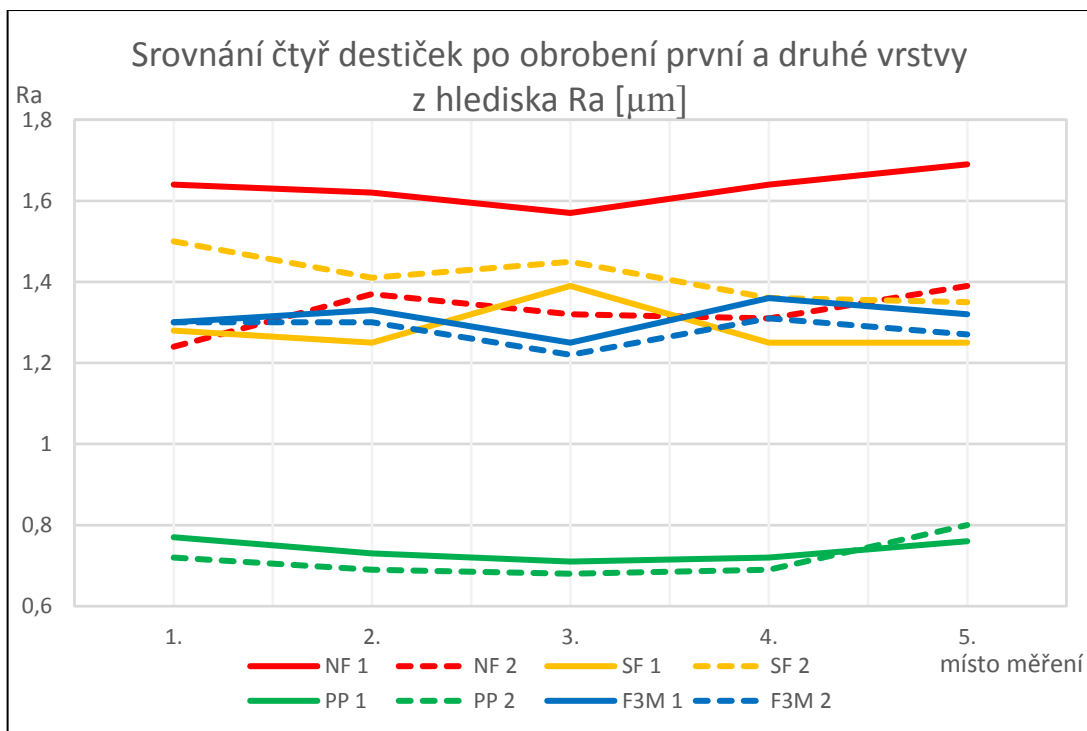
6.1.2 Drsnost obrobeného povrchu

Drsnost soustruženého povrchu vyhodnocuji podle tabulek 6.3 a 6.4. V obou tabulkách označení 1. – 5. místo značí pět různých míst na obrobku, kde byl povrch zkoumán. Průměr znamená aritmetický průměr všech pěti měření. R_a je zde střední aritmetická úchylka a R_{max} vyjadřuje rozdíl mezi nejvyšším výstupkem a nejhlubší prohlubní na pěti měřených místech. Všechny hodnoty v tabulkách 5.3 a 5.4 jsou v mikrometrech.

Tab. 6.3 Ra a Rmax po soustružení první vrstvy [μm]

NF	Ra	Rmax	SF	Ra	Rmax
1. místo	1,64	8,27	1. místo	1,28	6,63
2. místo	1,62	8,48	2. místo	1,25	7,02
3. místo	1,57	8,17	3. místo	1,39	7,47
4. místo	1,64	8,31	4. místo	1,25	6,61
5. místo	1,69	8,81	5. místo	1,25	6,58
průměr	1,632	8,408	průměr	1,284	6,862
PP	Ra	Rmax	F3M	Ra	Rmax
1. místo	0,77	4,13	1. místo	1,3	7,12
2. místo	0,73	4,04	2. místo	1,33	7,15
3. místo	0,71	4,22	3. místo	1,25	7,21
4. místo	0,72	4,25	4. místo	1,36	7,26
5. místo	0,76	4,12	5. místo	1,32	7,51
průměr	0,738	4,152	průměr	1,312	7,25

Z tabulky a grafu (tab. 6.3 a obr. 6.3) je zřejmé, že břitová destička s utvařečem PP vykazovala jak nejmenší střední aritmetickou úchylku, tak i hodnotu Rmax a to na všech pěti měřených místech a zároveň i po soustružení první i druhé vrstvy. Naopak břitová destička s utvařečem NF vykazovala po obrobení první vrstvy nejvyšší hodnoty Ra i Rmax.



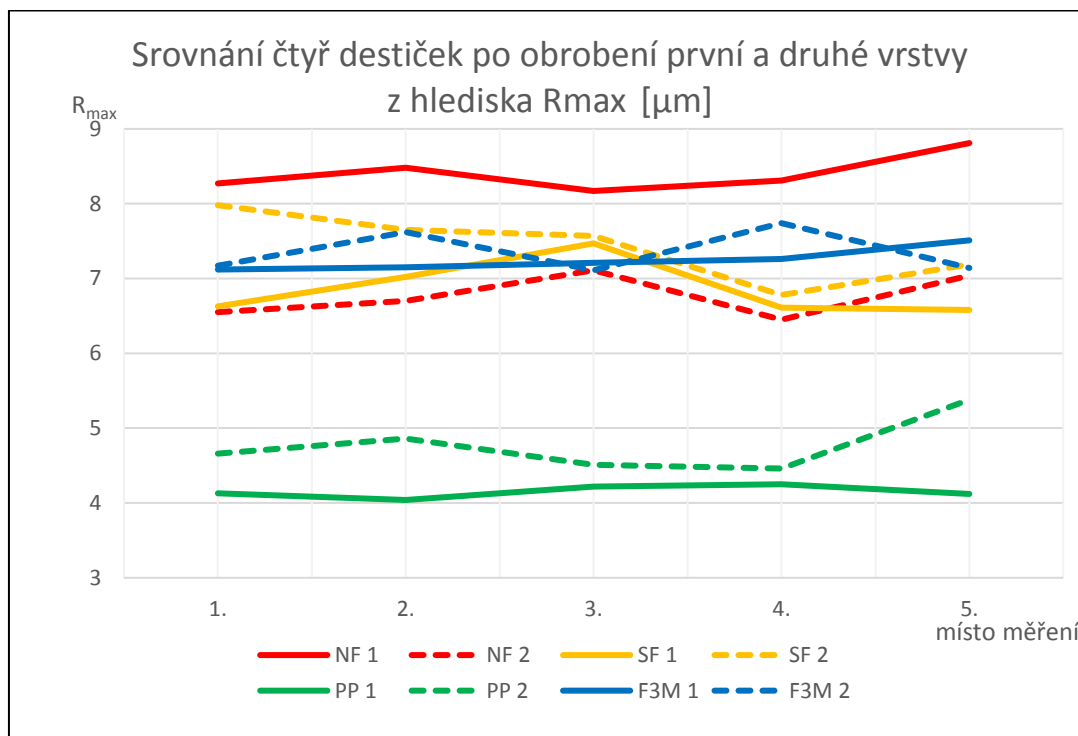
Obr. 6.3 Závislost Ra na místě měření

Tab. 6.4 Ra a Rmax po soustružení druhé vrstvy [μm]

NF	Ra	Rmax	SF	Ra	Rmax
1. místo	1,24	6,55	1. místo	1,5	7,98
2. místo	1,37	6,7	2. místo	1,41	7,65
3. místo	1,32	7,11	3. místo	1,45	7,57
4. místo	1,31	6,45	4. místo	1,36	6,78
5. místo	1,39	7,04	5. místo	1,35	7,19
průměr	1,326	6,77	průměr	1,414	7,434

PP	Ra	Rmax	F3M	Ra	Rmax
1. místo	0,72	4,66	1. místo	1,3	7,17
2. místo	0,69	4,86	2. místo	1,3	7,62
3. místo	0,68	4,51	3. místo	1,22	7,11
4. místo	0,69	4,46	4. místo	1,31	7,74
5. místo	0,8	5,38	5. místo	1,27	7,14
průměr	0,716	4,774	průměr	1,28	7,356

Z tabulky a grafu (tab. 6.4 a obr. 6.4) plyne, že utvařeč NF po obrobení druhé vrstvy a zbylé utvařeče SF a F3M obrobily povrch do kvality, která je pro zmíněné utvařeče podobná a prolíná se.

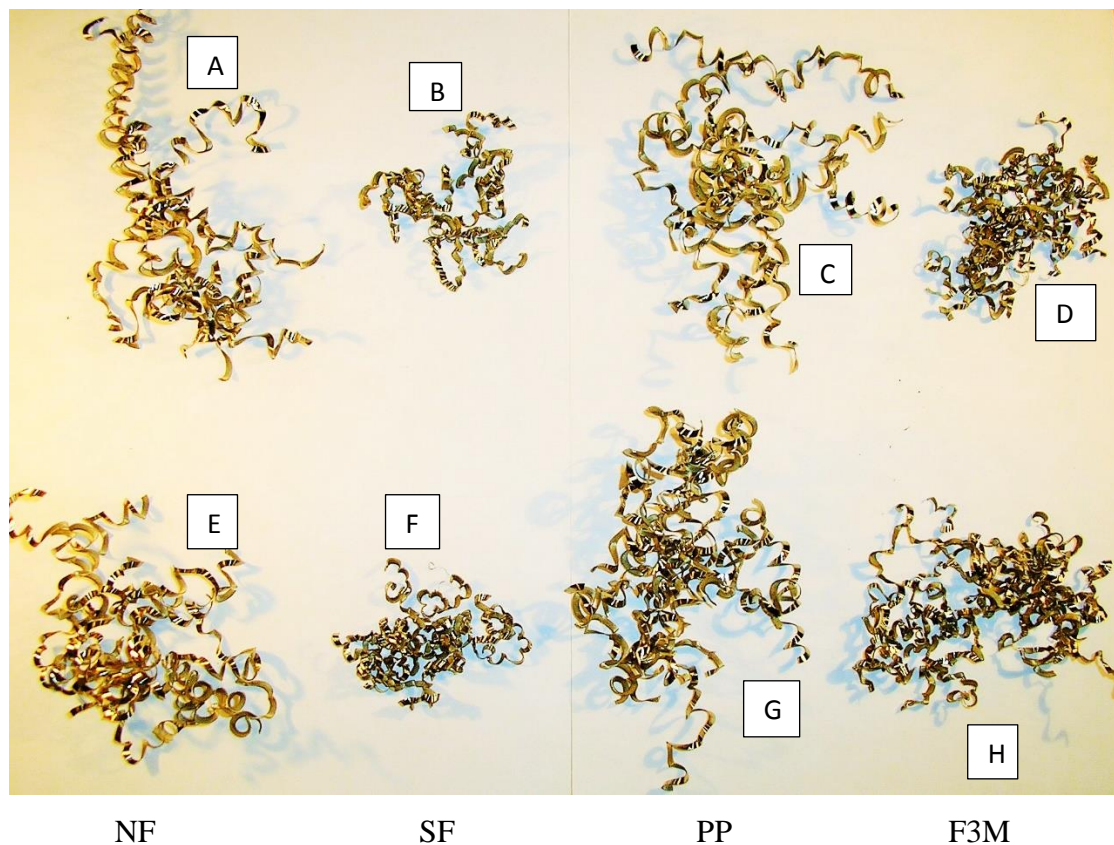


Obr. 6.4 Závislost Rmax na místě měření

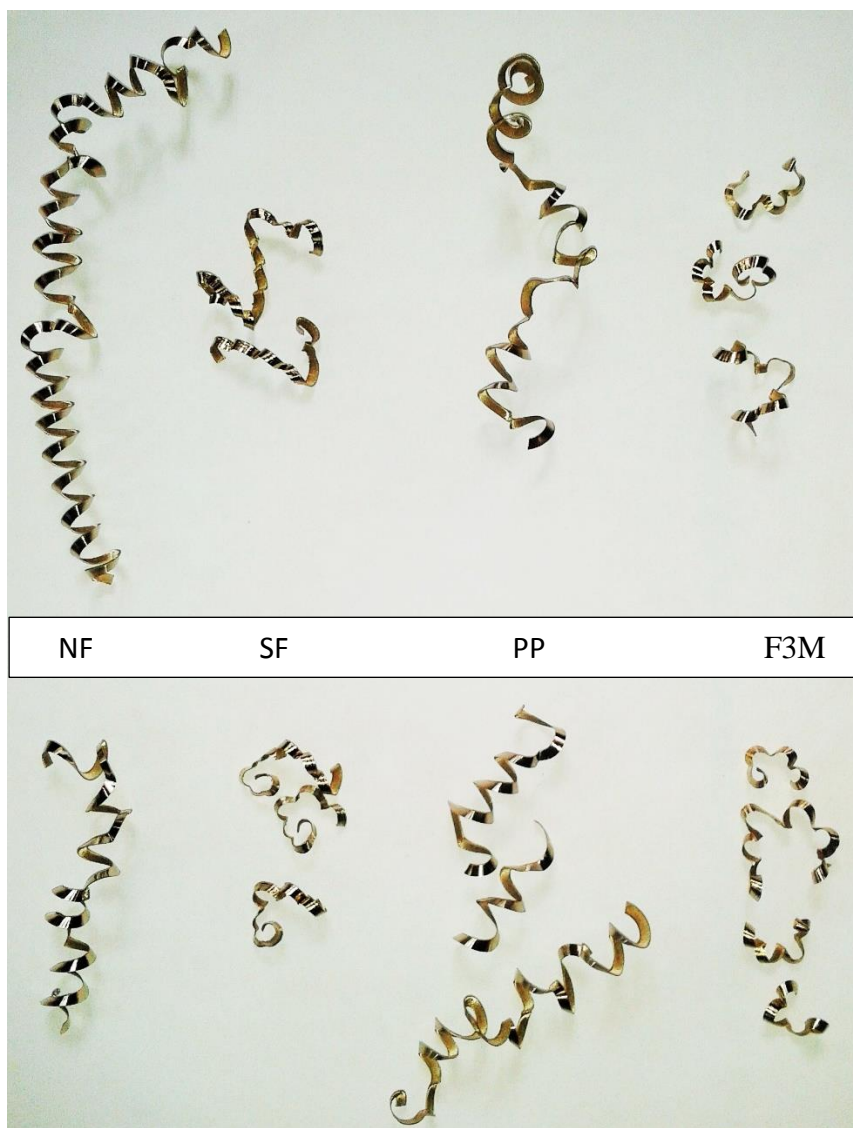
Pokud se podíváme na jednotlivé utvařeče z hlediska R_a soustružení první a druhé vrstvy, je vidět, že utvařeč NF, PP a F3M tvoří vyšší hodnoty po prvním obrobení. Z grafu (obr. 6.4) plyne, že vyšších hodnot R_{max} po prvním obrobení nabývá utvařeč NF oproti utvařeči PP a SF, jejichž hodnoty jsou po prvním obrobení nižší. Utvařeč F3M má hodnoty R_{max} střídavé.

6.1.3 Třísky

Hodnocení vychází z tvaru třísky podle obrázku 6.5 a detailů z obrázku 6.6, kde první řada tvoří třísky z prvního soustružení a druhá řada z druhého. Tedy první ukázka třísek v první a druhé řadě zleva odpovídá utvařeči NF, dále SF, PP a F3M.



Obr. 6.5 Třísky po soustružení první a druhé vrstvy

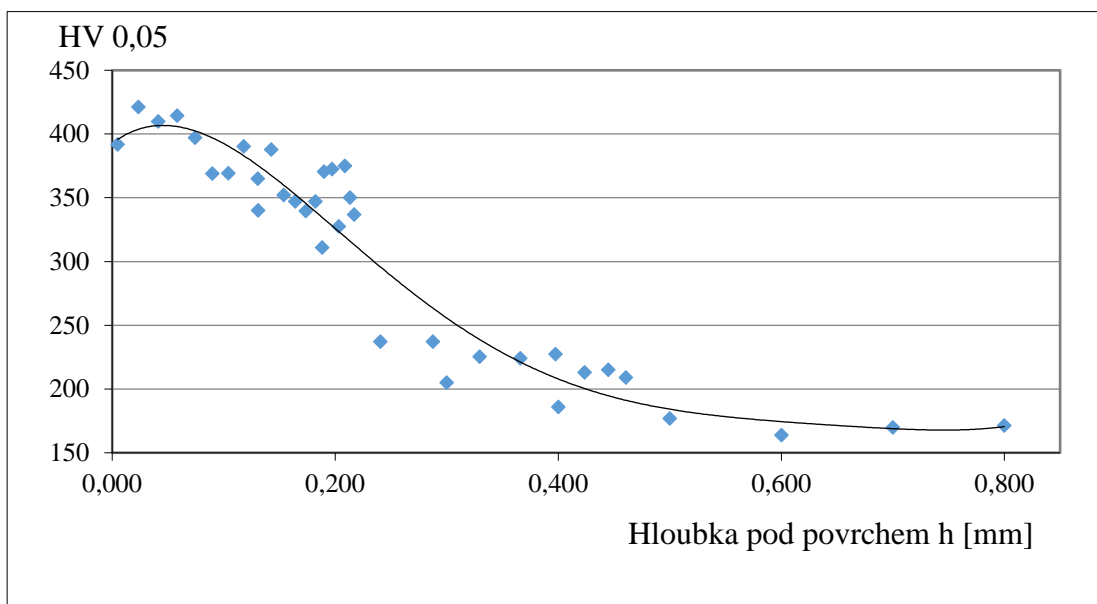


Obr. 6.6 Detail třísek ze soustružení první a druhé vrstvy

Krátké vinuté třísky odpovídá vzorek A a E. Kombinaci krátké vinuté a malému zastoupení obloukovité spojené odpovídá vzorek třísek C a G. Zbývající vzorky B, D, F a H jsou velice podobné a reprezentují tvar třísek obloukovitých spojených. Mezi soustružením první a druhé vrstvy není znatelný rozdíl ani v typu, tvaru, ani velikosti třísek.

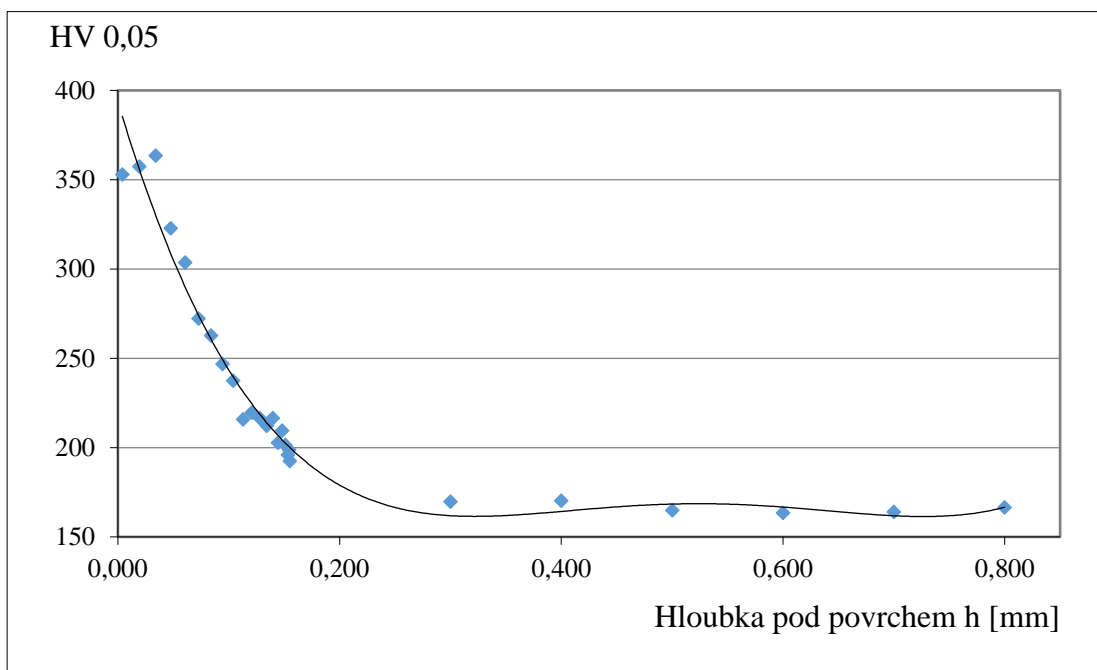
6.1.4 Profily mikrotvrdosti

Při porovnávání profilů mikrotvrdosti vycházím z grafů na obrázcích 6.7 – 6.10.



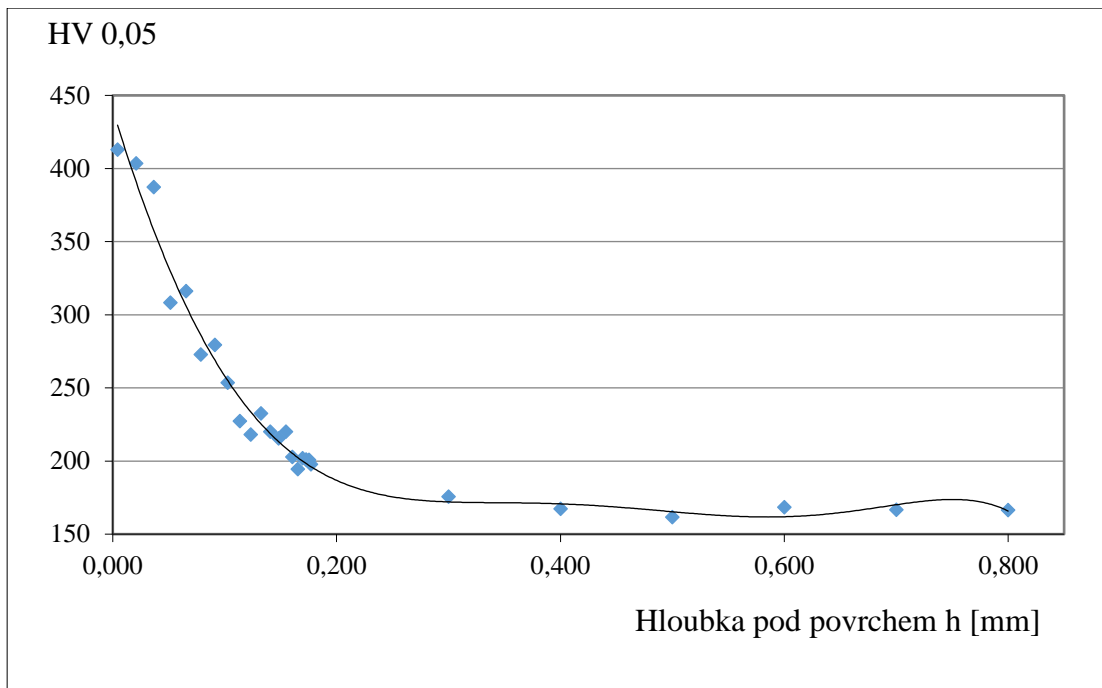
Obr. 6.7 Profil mikrotvrdosti – utvařec NF

Z grafu na obrázku 6.7 je vidět, že mikrotvrdost se na povrchu pohybovala okolo hodnoty 400 HV a se zvětšující se hloubkou pod povrchem postupně klesala. Největší pokles hodnot nastal v hloubce 0,2 mm pod povrchem.



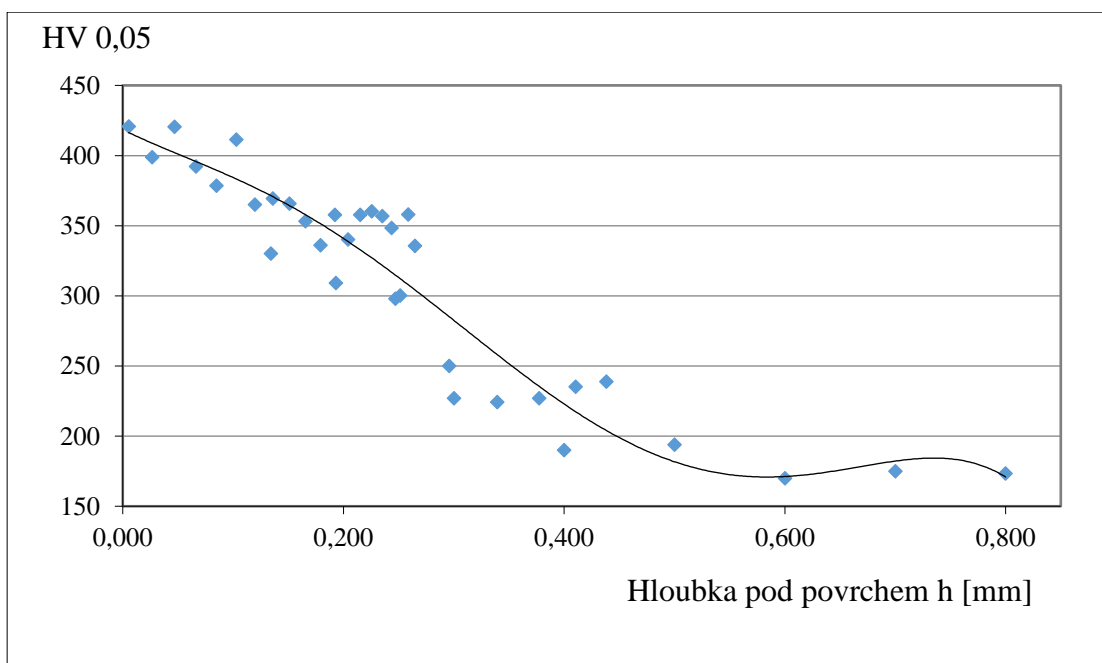
Obr. 6.8 Profil mikrotvrdosti – utvařec SF

Na obrázku 6.8 profil mikrotvrdosti po obrábění břitovou destičkou s utvařecem SF z hodnoty okolo 360 HV prudce klesal až do hloubky 0,2 mm pod povrchem. Potom už mikrotvrdost klesala jen minimálně.



Obr. 6.9 Profil mikrotvrlosti – utvařeč PP

Na obrázku 6.9 po soustružení utvařečem PP je tvrdost na povrchu větší než v případě utvařeče SF. Mikrotvrdość klesala z hodnoty okolo 410 HV opět prudce až do hloubky 0,2 mm pod povrchem a následně až do hloubky 0,8 mm klesala minimálně.



Obr. 6.10 Profil mikrotvrlosti – utvařeč F3M

Z obrázku 6.10 je zřejmé, že profil mikrotvrlosti klesal z hodnot okolo 400 HV oproti předchozím případům pozvolně až do hloubky 0,4 mm pod povrchem a dále už téměř neklesal.

Z grafů na obrázcích 6.7 – 6.10 plyne, že mikrotvrdot se zvětšující se hloubkou pod povrchem klesá a to – u utvařeče NF a F3M pozvolněji a u utvařečů SF a PP prudce klesá do hloubky 0,2 mm pod povrchem a následně klesá velice pomalu.

6.1.5 Shrnutí výsledků

Z hlediska měření sil při soustružení pro austenitickou korozivzdornou ocel za stávajících řezných podmínek vykazovala nejmenší síly při obrábění první vrstvy břitová destička s utvařečem PP a při obrábění druhé, břitová destička s utvařečem NF. Naopak nejvyšší síly při obrobení první a druhé vrstvy vykazovaly břitové destičky SF a PP.

Z hlediska srovnání obrobeného povrchu břitovými destičkami tvořila nejkvalitnější povrch jak po první, tak i po druhé odebrané vrstvě břitová destička s utvařečem PP.

Z hlediska tvoření třísek u austenitické oceli vyhovuje nejlépe břitová destička s utvařečem SF. Tvoří obloukovité spojené třísky s nejmenším poloměrem.

Z pohledu profilu mikrotvrdoti utvařeč NF a F3M vykazuje podobné hodnoty a to klesající, pozvolný pokles a utvařeč SF a PP do hloubky 0,2 mm prudký pokles a od hloubky 0,2 mm mírný pokles.

6.2 Duplexní ocel

6.2.1 Síly při soustružení

K porovnání sil při obrábění duplexní oceli používám tabulky 6.5, 6.6 a další naměřené hodnoty. Všechny síly jsou uváděny v newtonech. U pasivní složky síly F_p se opět objevují záporné hodnoty jako výsledek toho, že během soustružení docházelo ke vtahování destičky do obrobku. Průměr zde má význam průměrné síly na měřeném úseku.

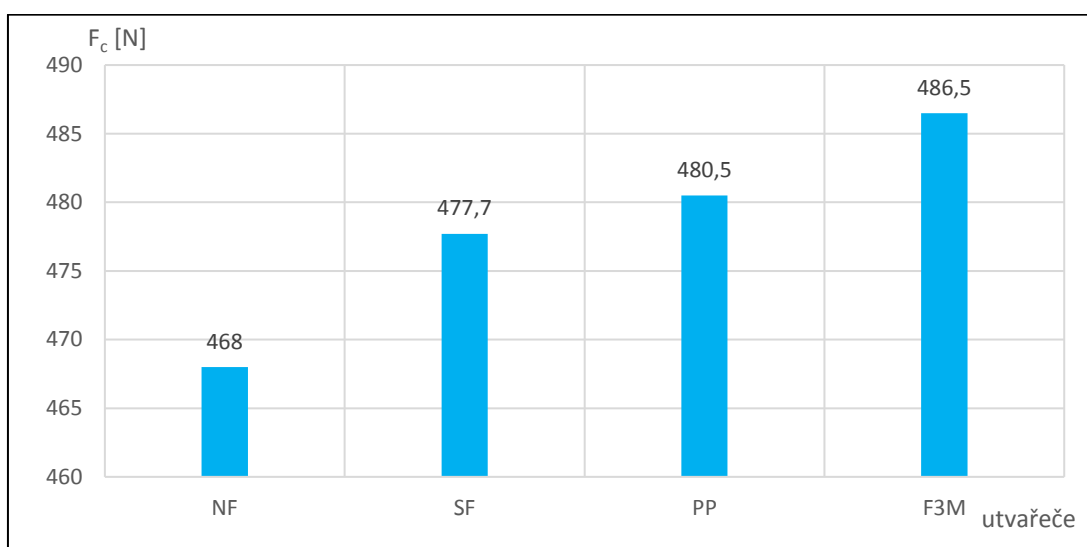
Tab. 6.5 Průměrné hodnoty sil při soustružení první vrstvy [N]

	F_f	F_p	F_c
NF	689,9	308,6	468
SF	671,8	189,5	477,7
PP	709,1	95,66	480,5
F3M	668,7	139,3	486,5

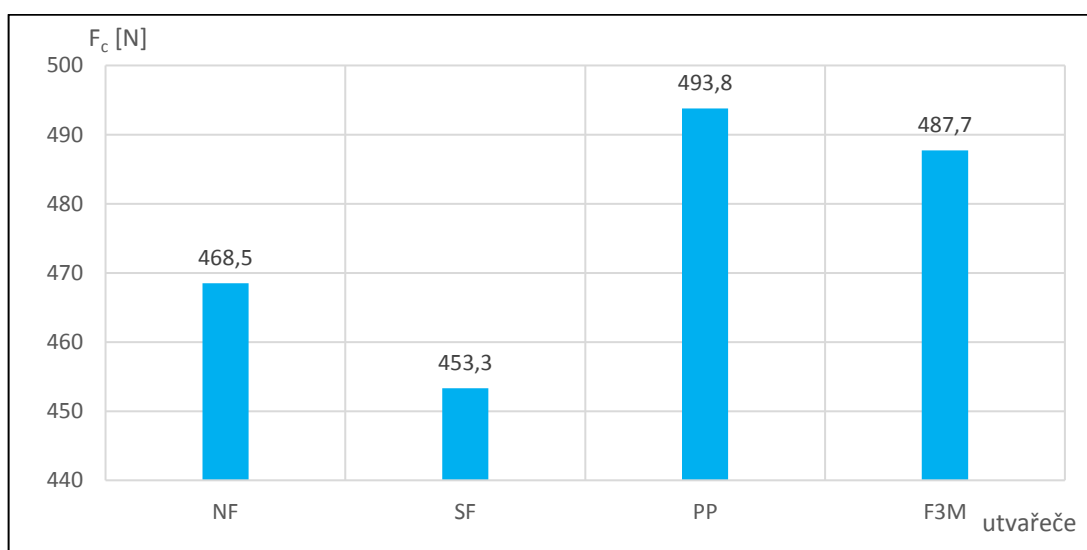
Tab. 6.6 Průměrné hodnoty sil při soustružení první vrstvy [N]

	F_f	F_p	F_c
NF	621,1	121,4	468,5
SF	606,6	174,3	453,3
PP	781,3	136,6	493,8
F3M	659,6	166,2	487,7

Z grafů na obrázcích 6.11 a 6.12 je zřejmé, že při soustružení první vrstvy vykazovala nejnižší průměrnou složku řezné síly břitová destička s utvařečem NF a po ní vzestupně SF, PP a nejvyšší síly byly naměřeny u utvařeče F3M. Při soustružení druhé vrstvy vykazovala nejmenší síly břitová destička s utvařečem SF, potom NF, F3M a největší PP.



Obr. 6.11 Závislost řezné síly na utvařečích při soustružení první vrstvy



Obr. 6.12 Závislost řezné síly na utvařečích při soustružení druhé vrstvy

1) porovnání čtyř břitových destiček vzájemně po prvním obrobení:

→ nejnižší hodnoty z naměřených maxim složek F_f , F_p a F_c vykazovaly vzestupně

destičky: SF
NF
PP
F3M

→ nejnižší hodnoty z naměřených minim složek F_f , F_p a F_c vykazovaly vzestupně

destičky: F3M
PP
SF
NF

→ nejnížší hodnoty z naměřených průměrů složek F_f , F_p a F_c vykazovaly

vzestupně destičky: NF a současně PP

SF a současně F3M

2) porovnání čtyř břitových destiček vzájemně po druhém obrobení:

→ nejnižší hodnoty z naměřených maxim složek F_f , F_p a F_c vykazovaly vzestupně

destičky: SF
NF
F3M
PP

→ nejnižší hodnoty z naměřených minim složek F_f , F_p a F_c vykazovaly vzestupně

destičky: NF a současně F3M

SF a současně PP

→ nejnížší hodnoty z naměřených průměrů složek F_f , F_p a F_c vykazovaly

vzestupně destičky: NF

SF
F3M
PP

3) porovnání jednotlivých destiček v rámci obrábění první a druhé vrstvy: při prvním obrobení převažují vyšší hodnoty sil u destiček NF a SF. Naopak u destičky PP převládají vyšší hodnoty sil při druhém obrobení a u destičky F3M je počet vyšších hodnot při prvním a druhém obrobení shodný.

4) rozptyl sil: při obrábění první vrstvy byl rozptyl sil u destičky NF, SF i PP menší, než při druhém obrábění. Destička F3M vykazovala při prvním měření větší rozptyl sil F_p a F_c , ale menší F_f , než při druhém.

6.2.2 Drsnost obrobeného povrchu

Drsnost soustruženého povrchu porovnávám podle tabulek 6.7 a 6.8. Opět označení v tabulkách 1. – 5. místo vyjadřuje pět různých míst rozmístěných rovnoměrně po obvodu obrobku. Průměr je aritmetický průměr pěti hodnot, R_a je střední aritmetická úchylnka a R_{max} je rozdíl mezi nejvyšším výstupkem a nejnižší prohlubní na pěti měřených místech. Všechny hodnoty v tabulkách 6.7 a 6.8 jsou v mikrometrech.

Tab. 6.7 R_a a R_{max} po soustružení první vrstvy [μm]

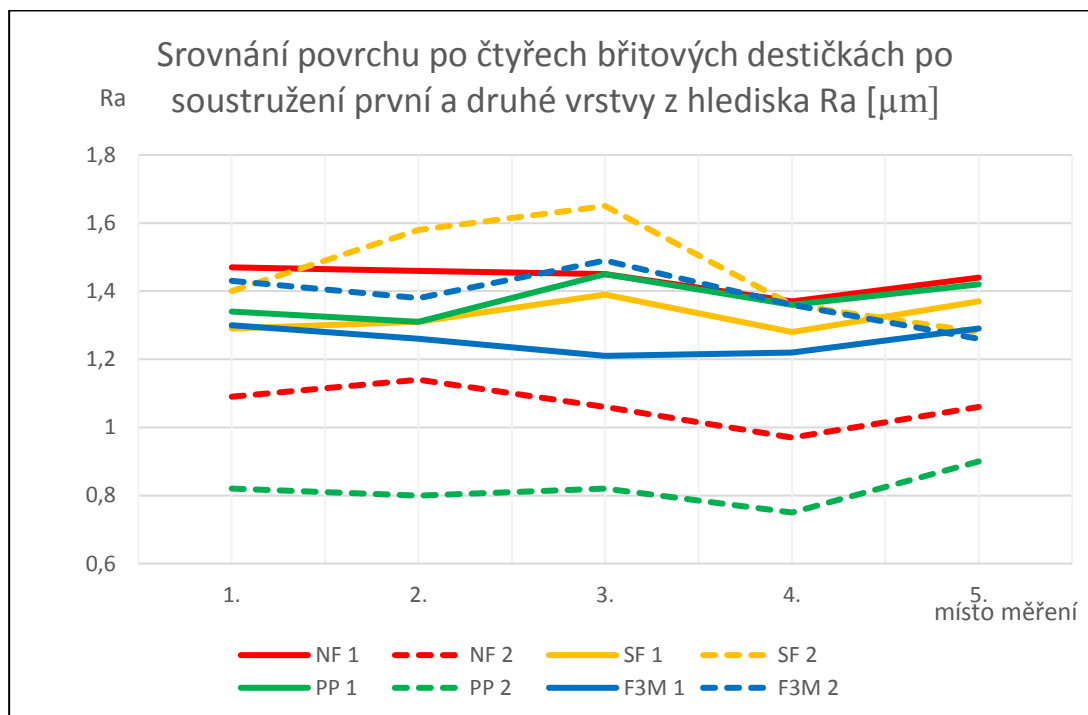
NF	Ra	Rmax		SF	Ra	Rmax
1. místo	1,47	7,84		1. místo	1,29	6,84
2. místo	1,46	8,07		2. místo	1,31	6,15
3. místo	1,45	7,83		3. místo	1,39	6,97
4. místo	1,37	7,33		4. místo	1,28	6,24
5. místo	1,44	8,21		5. místo	1,37	6,93
průměr	1,438	7,856		průměr	1,328	6,626
PP	Ra	Rmax		F3M	Ra	Rmax
1. místo	1,34	7,43		1. místo	1,3	6,66
2. místo	1,31	7,01		2. místo	1,26	6,53
3. místo	1,45	7,28		3. místo	1,21	5,95
4. místo	1,36	7,42		4. místo	1,22	6,52
5. místo	1,42	7,4		5. místo	1,29	6,69
průměr	1,376	7,308		průměr	1,256	6,47

Tab. 6.8 Ra a Rmax po soustružení druhé vrstvy [μm]

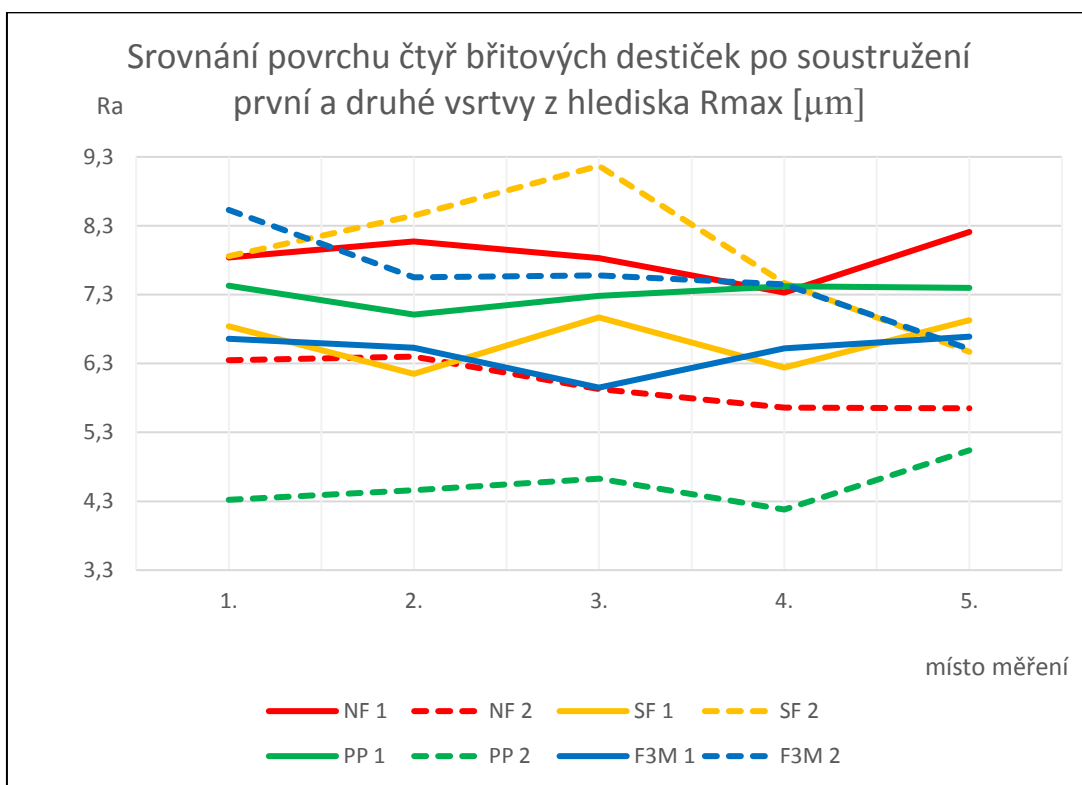
NF	Ra	Rmax	SF	Ra	Rmax
1. místo	1,09	6,35	1. místo	1,4	7,86
2. místo	1,14	6,4	2. místo	1,58	8,45
3. místo	1,06	5,93	3. místo	1,65	9,17
4. místo	0,97	5,66	4. místo	1,36	7,47
5. místo	1,06	5,65	5. místo	1,28	6,47
průměr	1,064	5,998	průměr	1,454	7,884

PP	Ra	Rmax	F3M	Ra	Rmax
1. místo	0,82	4,32	1. místo	1,43	8,53
2. místo	0,8	4,46	2. místo	1,38	7,55
3. místo	0,82	4,63	3. místo	1,49	7,58
4. místo	0,75	4,18	4. místo	1,36	7,45
5. místo	0,9	5,04	5. místo	1,26	6,51
průměr	0,818	4,526	průměr	1,384	7,524

Z tabulek a grafů (tab. 6.13, 6.14 a obr. 6.13, 6.14), kde NF 1 značí soustružení první vrstvy břitovou destičkou s utvařečem NF, NF 2 značí soustružení druhé vrstvy břitovou destičkou s utvařečem NF, atd. je patrné, že břitové destičky s utvařeči NF a PP vytváří po soustružení prvním vrstvy vyšší hodnoty Ra i Rmax. Oproti tomu břitové destičky s utvařeči SF a F3M vytváří po soustružení prvním vrstvy hodnoty Ra i Rmax nižší, než po druhé.



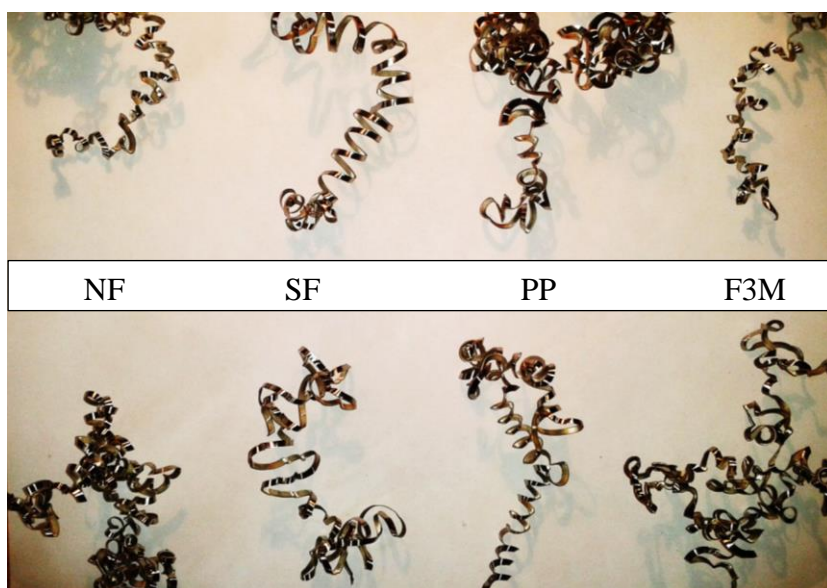
Obr. 6.13 Závislost Ra na místě měření



Obr. 6.14 Závislost R_{max} na místě měření

6.2.3 Třísky

Hodnocení vychází z tvaru třísky podle obrázku 6.15. V první řadě jsou třísky z prvního a v druhé řadě z druhého soustružení.

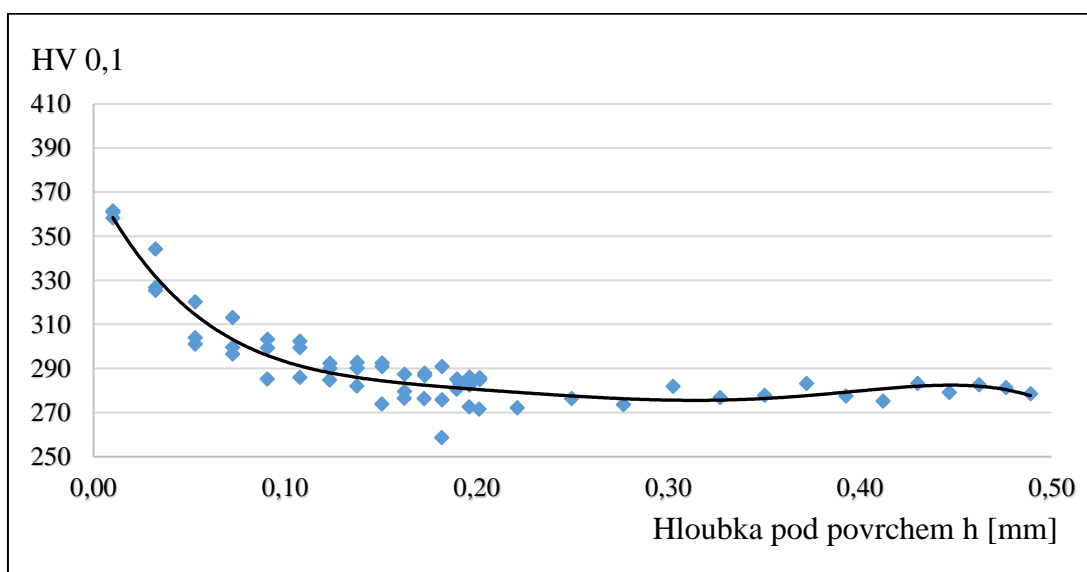


Obr. 6.15 Třísky po soustružení první a druhé vrstvy

Břítová destička s utvařečem NF tvořila jak při prvním, tak i při druhém soustružení třísky obloukovité spojené s nejmenšími oblouky ze všech vzorků. Utvařeč SF a PP vytvářel podobné tvary třísek a to převážně dlouhé vinuté s občasnou přítomností obloukovité spojené při prvním i druhém soustružení. Utvařeč F3M tvořil třísky obloukovité spojené opět při obou soustružení, ale na rozdíl od NF, zde byl poloměr oblouků větší.

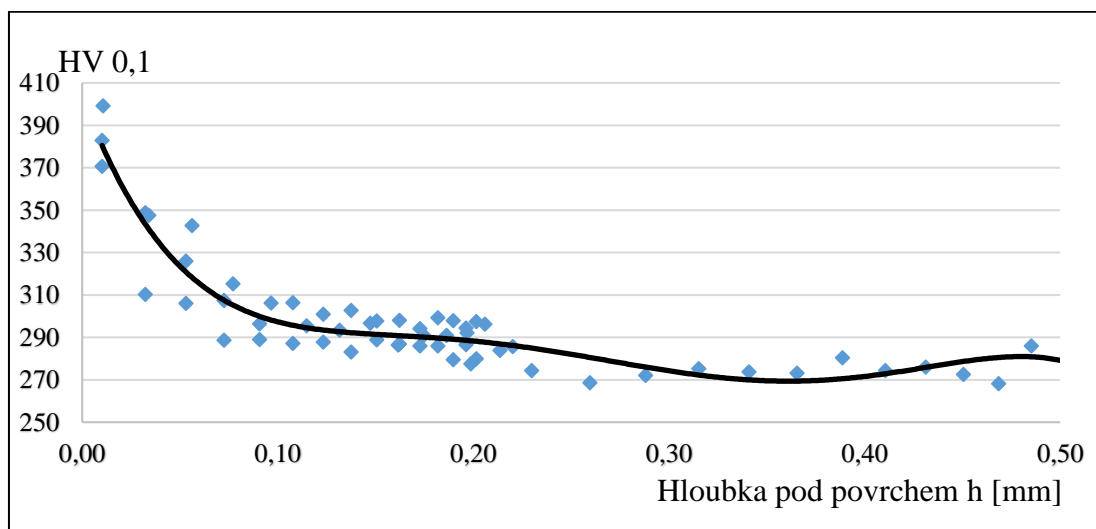
6.2.4 Profily mikrotvrlosti

Profily mikrotvrlosti porovnávám z grafů na obrázcích 6. 16 – 6.19.



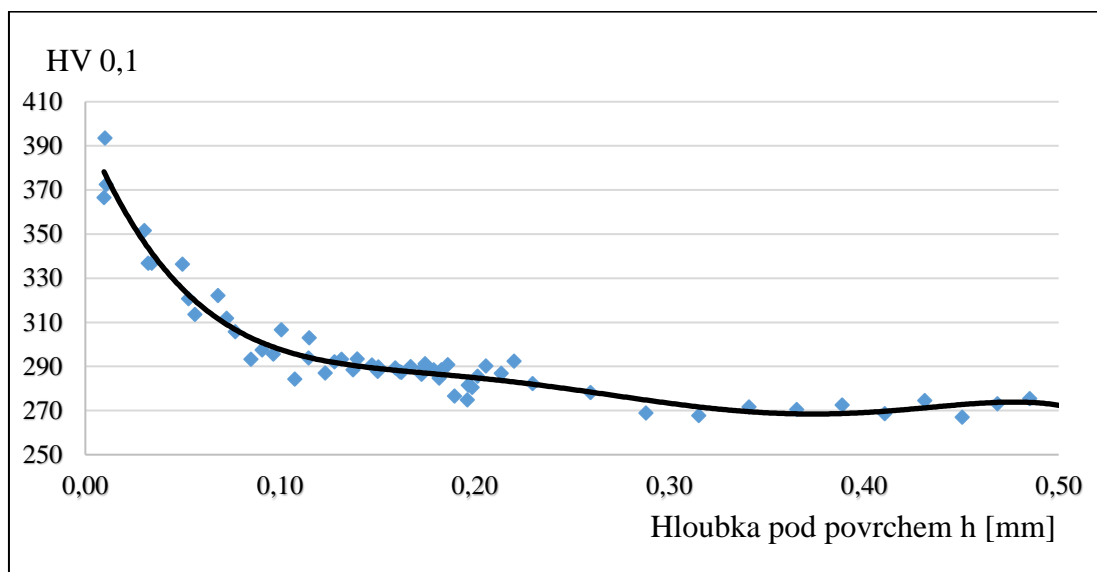
Obr. 6.16 Profil mikrotvrlosti – utvařeč NF

Na obrázku 6.16 je profil mikrotvrlosti po soustružení utvařečem NF. Profil začíná na hodnotách kolem 360 HV a se zvětšující se hloubkou pod povrchem mikrotvrdotstí pozvolna klesá.



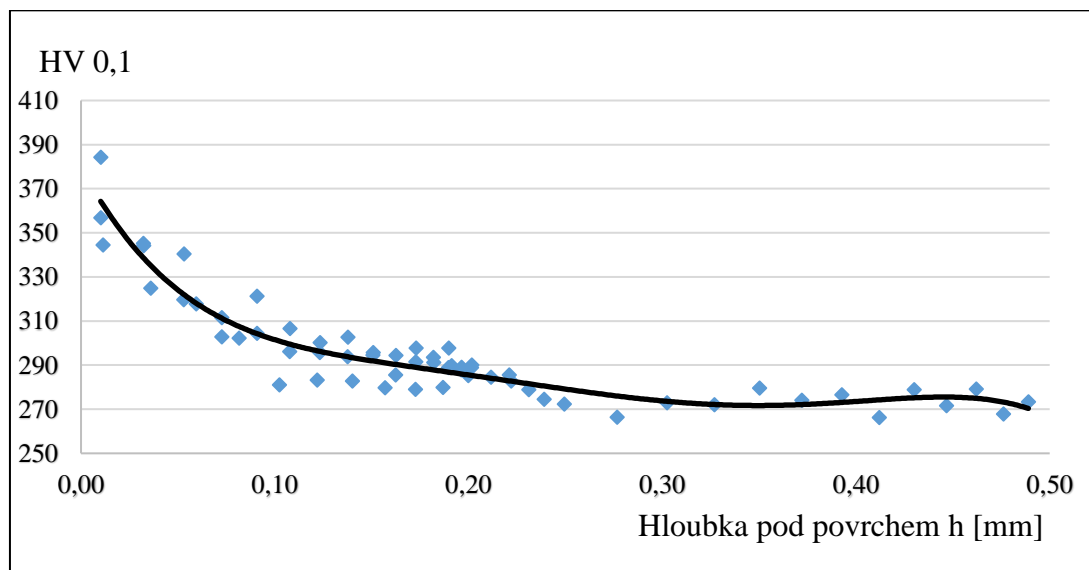
Obr. 6.17 Profil mikrotvrlosti – utvařeč SF

Na obrázku 6.17 klesá mikrotvrдость pomaleji než v případě utvařeče NF, ale mikrotvrдость na povrchu je větší.



Obr. 6.18 Profil mikrotvrđosti – utvařeč PP

Obrázek 6.18 ukazuje profil mikrotvrđosti po soustružení břitovou destičkou s utvařečem PP. Hodnoty naměřené mikrotvrđosti, i průběh tvoří stejný profil jako u utvařeče SF.



Obr. 6.19 Profil mikrotvrđosti – utvařeč F3M

Na obrázku 6.19 je vidět profil ze všech čtyřech utvařečů nejpozdvolnější. Největší hodnota mikrotvrđosti je druhá nejnižší. Nejnižší hodnota v nejmenší hloubce pod povrchem byla naměřena po utvařeči NF. Z grafů na obrázcích 6.16 – 6.19 vyplývá, že povrch po všech čtyřech utvařečích vykazuje podobnou tvrdost. Průběh naměřených hodnot je ve všech případech pozvolný.

6.2.5 Shrnutí výsledků

Z hlediska měření sil při soustružení duplexní oceli za daných řezných podmínek vykazovala při prvním soustružení nejmenší síly břitová destička s utvařečem SF a při druhém soustružení břitová destička s utvařečem NF. Nejvyšší hodnoty měřených sil vykazovala břitová destička s utvařečem PP a to jak při prvním, tak i při druhém soustružení.

Nejkvalitnější povrch z hlediska drsnosti vytvořila břitová destička s utvařečem PP při druhém soustružení.

Nejvhodnější třísky vykazoval utvařeč NF přesto, že všechny čtyři utvařeče použité na duplexní oceli tvořily většinou jedinou dlouhou třísku, což není z hlediska skladování třísek nejlepší řešení.

Z hlediska mikrotvrdosti jsem zjistila, že toho hodnocení nemá vypovídací schopnost.

6.3 Porovnání obou materiálů

Zde se zaměřím na shodné výsledky obou materiálů. Z hlediska srovnání vznikajících sil při obrábění se výsledky shodují při porovnání čtyř utvařečů při prvním soustružení v dosahování minim. Destička s utvařečem F3M dosahovala nejmenších hodnot minim a destička s utvařečem NF naopak nejvyšších minim u obou materiálů. Dále jsem zjistila, že průměrné hodnoty všech sil při druhém obrábění jsou od nejmenšího u utvařečů NF, SF, F3M a PP, což je shodné opět u obou materiálů. Pokud porovnam jednotlivé destičky odděleně po prvním a druhém obrobení vychází následující. Utvařeč NF a SF u obou materiálů vytvářel větší síly při prvním, než při druhém obrábění. Naopak utvařeč PP u obou tvořil při prvním obrábění menší síly a u utvařeče F3M vznikaly síly stejné jak u obou materiálů, tak i při prvním a druhém soustružení. Při porovnání průměrných hodnot složek řezné síly je zřejmé, že při soustružení austenitické korozivzdorné oceli docházelo k vyšším hodnotám, zaokrouhleně o 200 N.

Z hlediska dosažené drsnosti povrchu vznikly stejné výsledky u utvařeče NF, jež po prvním obrobení dosahoval vyšších průměrných hodnot Ra i Rmax, než po druhém a utvařeč SF, který po prvním obrobení dosahoval nižších průměrných hodnot Ra i Rmax, než po druhém. Další shoda vznikla i při porovnání kvality povrchů po prvním a druhém obrábění. Po prvním byl nejhorší povrch z hlediska Ra i Rmax po utvařeči NF. Po druhém soustružení byl nejlepší povrch u obou materiálů po destičce PP a nejhorší po SF.

Při porovnání třísek jsem nenašla žádné shodné výsledky.

7 Závěr

Cílem mé bakalářské práce bylo vypracovat možnosti monitorování průběhu řezání z hlediska sil, teploty, opotřebení nástroje a tvorby třísek. V další části jsem zpracovala hodnocení kvality povrchové vrstvy z pohledu drsnosti a v poslední části jsem se věnovala experimentu. Měla jsem k dispozici austenitickou korozivzdornou ocel a duplexní ocel. Oba tyto vzorky jsem soustružila za stejných podmínek čtyřmi vyměnitelnými břitovými destičkami s utvařeči třísek NF, SF, PP a F3M. Každý vzorek jsem soustružila nejprve v povrchové a poté v hlubší vrstvě. K hodnocení a porovnávání jednotlivých utvařečů jsem měla k dispozici síly naměřené během soustružení, hodnoty R_a a R_{max} pro drsnost obráběného povrchu, odebrané třísky a výsledky z měření mikrotvrdomosti.

Výsledky z porovnávání hodnot austenitické korozivzdorné oceli jsou následující. Z hlediska porovnávání sil při obrábění první vrstvy vykazovala nejmenší síly destička s utvařečem PP, ale při druhém obrábění byly naměřeny naopak síly největší. Při obrábění druhé vrstvy vykazovala nejmenší síly destička s utvařečem NF. Z hlediska drsnosti vyhovoval po obrobení první i druhé vrstvy nejlépe utvařeč PP a pro nejvhodnější tvorbu třísek v tomto případě nejlépe vyhověl utvařeč SF. Pro austenitickou korozivzdornou ocel bylo celkově nejvhodnější použití břitové destičky s utvařečem PP.

Naměřené hodnoty u duplexní oceli ukazují, že během soustružení první vrstvy vykazovala nejnižší hodnoty sil destička s utvařečem SF a při druhém NF. Naopak nejvyšší síly vykazoval utvařeč PP při soustružení první i druhé vrstvy. Z pohledu drsnosti se při prvním soustružení nejvíce osvědčil utvařeč F3M a při druhém tvořil výrazně kvalitnější povrch utvařeč PP. Z hlediska třísek byl nejvhodnější utvařeč NF. Pro duplexní ocel bylo nejlepší použití utvařeče NF, ale pokud by byla nejdůležitější preferencí drsnost obrobeného povrchu, bylo by nejlepší využít utvařeče PP nebo F3M.

Nakonec jsem porovnávala oba materiály navzájem a zjistila jsem, že pokud porovnáme jednotlivé utvařeče odděleně po prvním a druhém obrobení, zjistíme, že utvařeč NF a SF u obou materiálů vytvářel větší síly při obrábění první, než při druhé vrstvě. Naopak utvařeč PP u obou tvořil při obrábění první vrstvy menší síly a u utvařeče vznikaly síly téměř stejné u obou materiálů i u obou obrobení. Z hlediska dosažené drsnosti povrchu vznikaly stejné výsledky u utvařeče NF, který dosahoval vyšších průměrných hodnot R_a i R_{max} , než po druhém a utvařeč SF, ten vykazoval nižší hodnoty

R_a i R_{max} než po obrobení druhé vrstvy. Při porovnání třisek jsem nenašla žádnou výraznou shodu. Během porovnávání výsledků z naměřené mikrotvrlosti vyplývá, že toto měření nemá pro mé zkoumání žádnou vypovídací schopnost.

8 Literatura

- [1] MÁDL, Jan, Martin VRABEC, Jindřich KAFKA a Rudolf DVOŘÁK. *Technologie obrábění 1., 2. a 3. díl*. Druhé přepracované. Thákurova 1, 160 41 Praha 6: ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03752-2.
- [2] 2. tvorba a tvarování třísky. *VŠB* [online]. [cit. 2016-04-03]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_kapitola_02.pdf
- [3] 8. Měření složek síly řezání. *VŠB* [online]. [cit. 2016-04-06]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_kapitola_08.pdf
- [4] MÁDL, Jan a Vilém SCHUBERT. *Experimentální metody a optimalizace v teorii obrábění*. 2. přepracované. Šumperk: ČVUT v Praze, 1985.
- [5] 9. Přímé měření sil a momentů [online]. [cit. 2016-04-06]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_kapitola_09.pdf
- [6] TROPP, Pavel. *Vysokorychlostní soustružení ložisek z materiálu 100CR6* [online]. Brno, 2015 [cit. 2016-04-10]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=103420.
Diplomová práce. VUT v Brně. Vedoucí práce Doc. Ing. Josef Sedlák, PhD.
- [7] Učíme v prostoru: Vzdělávací 3D encyklopedie. *Teorie obrábění* [online]. [cit. 2016-04-10]. Dostupné z: <http://uvp3d.cz/>
- [8] MERENDA, Jiří. *Bezdotykové měření povrchových teplot v průběhu soustružení* [online]. Brno, 2011 [cit. 2016-04-10]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=42113.
Diplomová práce. VUT v Brně.

[9] JERSÁK, Jan. *Technologie III - obrábění: Teplota a teplota při obrábění, opotřebení řezných nástrojů* [online]. Liberec, 2013 [cit. 2016-04-10]. Dostupné z: http://educom.tul.cz/educom/inovace/TOB/VY_03_36-Teplo%20a%20teploty%20p%C5%99i%20obr%C3%A1b%C4%9Bn%C3%AD,%20opot%C5%99eben%C3%AD%20%C5%99ezn%C3%BDch%20n%C3%A1stroj%C5%AF_MZ_6%20%20.pdf. TU v Liberci.

[10] ABRAHAM, Martin. *Technologické aspekty opotřebení řezného nástroje* [online]. Brno, 2008 [cit. 2016-04-17]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=5250. Bakalářská práce. VUT v Brně. Vedoucí práce Doc. Ing. Jaroslav Prokop, CSc.

[11] 5. Měření opotřebení nástrojů. *VŠB* [online]. [cit. 2016-04-17]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_kapitola_05.pdf

[12] Drsnost obrobeného povrchu: Teorie obrábění. *Tumlikovo: Metal Cutting Technologies* [online]. 2011 [cit. 2016-04-18]. Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/drsnost-obrobeneho-povrchu/>

[13] MÁDL, Jan a Jaroslav BARCAL. *Základy technologie II*. Vyd. 2. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03733-1.

[14] NEZDAŘÍLKOVÁ, Martina. *Metrologická konfirmace měřidla* [online]. Brno, 2011 [cit. 2016-04-18]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=41432. Bakalářská práce. VUT v Brně. Vedoucí práce Ing. Petr Koška, PhD.