

Vývoj zařízení a technologie obrábění materiálů plazmovým obloukem

Bc. Jiří Hladký

Diplomová práce
2013



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jiří Hladký**
Osobní číslo: **T11025**
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní inženýrství**
Forma studia: **kombinovaná**

Téma práce: **Vývoj zařízení a technologie obrábění materiálů
plazmovým obloukem**

Zásady pro vypracování:

- 1) Proveďte studium metod dělení materiálů
- 2) Hodnoťte materiály a strukturální změny
- 3) Určete vliv technologických podmínek na vlastnosti řezných ploch
- 4) Hodnoťte ekonomický přínos řešení

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

1) Lukovics, I.: **Konstrukční materiály a technologie**. VUT Brno. 1990. ISBN 80-214-0399-3

2) Maňková, I.: **Progresivne technologie**. Vienaľa Košice. 2000. ISBN 80-7099-430-4

3) Neslušan, M. aj.: **Experimentálne metódy v trieskovom obrábání**. EDIS Žilina. 2007. ISBN 978-8070-711-8

4) Ptáček, L. aj.: **Nauka o materiálu**. CERM Brno. 2009. ISBN 80-7204-193-2

Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Imrich Lukovics, CSc.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **8. února 2013**

Termín odevzdání diplomové práce: **10. května 2013**

Vě Zlíně dne 11. února 2013


doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan




prof. Ing. Berenika Hadsnerová, Ph.D.
ředitel ústavu

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považuji se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 7. 5. 2013


.....

¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací.

(1) Vysoká škola nevydávlečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) *Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlázení veřejnosti v místě určeném uvnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.*

(3) *Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.*

⁴¹ *zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3;*

(3) *Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).*

⁴² *zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní díla:*

(1) *Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odjírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.*

(2) *Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užit či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.*

(3) *Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělků jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlíží k výši výdělků dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.*

ABSTRAKT

Úkolem téhle diplomové práce bylo vypracovat studii na téma dělení materiálu plasmou a zhodnotit parametry řezání. Základní informace z oblasti nekonvenčních technologií jsou uvedeny v teoretické části. V praktické části bylo za úkol naměřit a vyhodnotit obráběné vzorky z hlediska drsnosti a tvrdosti povrchu.

Klíčová slova:

Obrábění plasmou, Tvrdost, Drsnost povrchu.

ABSTRACT

The task of this diploma thesis was a study on the subject of material plasma cutting and cutting parameters to evaluate. Basic information on unconventional technologies are presented in the theoretical part. In the practical part was tasked to measure and evaluate the machined samples in terms of roughness and hardness.

Keywords:

Plasma Arc Machining, Hardness, Surface roughness.

Touto cestou bych rád poděkoval svému vedoucímu prof. Ing. Imrichu Lukovicsovi, CSc. za odborné vedení, poskytnuté rady a čas, který mi věnoval při vypracování diplomové práce. Dále chci poděkovat panu Ing. Jiřímu Šálkovi za pomoc při přípravě vzorků k praktické části.

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

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 DĚLENÍ MATERIÁLU:	12
1.1 NEKONVENČNÍ TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ:	13
1.1.1 Vodní paprsek	15
1.1.2 Řezání kyslíko-acetylenovým plamenem	18
1.1.3 Laser	20
1.1.4 Plasma	23
1.2 POROVNÁNÍ METOD TEPELNÉHO DĚLENÍ MATERIÁLU	30
1.3 TEPELNÉ OVLIVNĚNÍ MATERIÁLU	31
2 ZKOUŠKY TVRDOSTI	32
2.1 VRYPOVÉ :	33
2.1.1.1 Vrypová tvrdost podle Martense (HMa).....	33
2.2 ODRAZOVÉ:	33
2.3 VTISKOVÉ (VNIKACÍ):.....	34
2.3.1 Zkouška tvrdosti podle Vickerse (ČSN EN ISO 6507-1, 2 (42 0374):1999)	34
2.3.2 Zkouška tvrdosti podle Rockwella (ČSN EN ISO 6508-1, 2 (42 0360):2000)	37
2.3.3 Zkouška podle Brinella (ČSN EN ISO 6506-1, 2, 3 (42 0371):2000).....	38
2.3.4 Martensova univerzální tvrdost (DIN EN ISO 14577) (modifikovaná metoda Vickers)	39
3 JAKOST POVRCHU	42
3.1 HODNOCENÍ TEXTURY POVRCHU:	42
3.2 DRSNOST POVRCHU:	43
3.2.1 Posuzování drsnosti povrchu:	44
3.2.2 Metody měření drsnosti povrchu:	47
3.3 CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI:	49
II PRAKTICKÁ ČÁST	50
4 CHARAKTERISTIKA MĚŘENÝCH MATERIÁLŮ	51
4.1 CHEMICKÉ SLOŽENÍ:	51
4.2 SCHÉMA MĚŘENÍ:	52
4.3 ZAŘÍZENÍ PRO PLAZMOVÉ OBRÁBĚNÍ:	52
4.4 ZAŘÍZENÍ PRO VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ:	55
4.4.1 Měření drsnosti:	55
4.4.2 Měření tvrdosti:	56
5 MĚŘENÍ:	57
5.1 NAMĚŘENÉ HODNOTY TL. PLECHU 5MM:	57
5.2 NAMĚŘENÉ HODNOTY TL. PLECHU 10MM:	73
5.3 NAMĚŘENÉ HODNOTY TL. PLECHU 15MM:	89
5.4 VYHODNOCENÍ DRSNOSTI:	105
VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ TVRDOSTI	106

5.5	NAMĚŘENÉ HODNOTY:	106
5.6	KONSTRUKCE CNC PLAZMOVÉ ŘEZAČKY:	110
5.7	EkONOMICKÉ ZHODNOCENÍ:	114
ZÁVĚR		115
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....		117
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....		119
SEZNAM OBRÁZKŮ		120
SEZNAM GRAFŮ		122
SEZNAM TABULEK.....		124

ÚVOD

Nekonvenční metody nám umožňují využití tam, kde při výrobě některých druhů součástí, především tvarově složitých z těžko obrobitelných materiálů. Proto je tento postup výroby nejvhodnější, protože klasickými technologiemi bychom tyto materiály těžko obráběli a některé tvary ani nevyrobili. Nekonvenční metody umožňují provádět složité technologické operace s využitím mechanizace a automatizace výrobních pochodů. Umožňují zvýšení technologičnosti konstrukce, sériovosti výroby, omezení počtu zmetků a snížení pracnosti daných operací.

Mezi tyto progresivní technologie se také řadí obrábění paprskem plazmy. Plazmové způsoby řezání se začaly používat začátkem 50. let jako alternativní způsoby řezání hliníkových a jiných neželezných materiálů místo řezání kyslíkovým plamenem. V dnešní době patří mezi nepostradatelné technologie v nejrůznějších oblastech zpracování materiálů, jako je např. nanášení povlaků, svařování, řezání kovových i nekovových materiálů a v neposlední řadě obrábění pomocí plazmového paprsku.

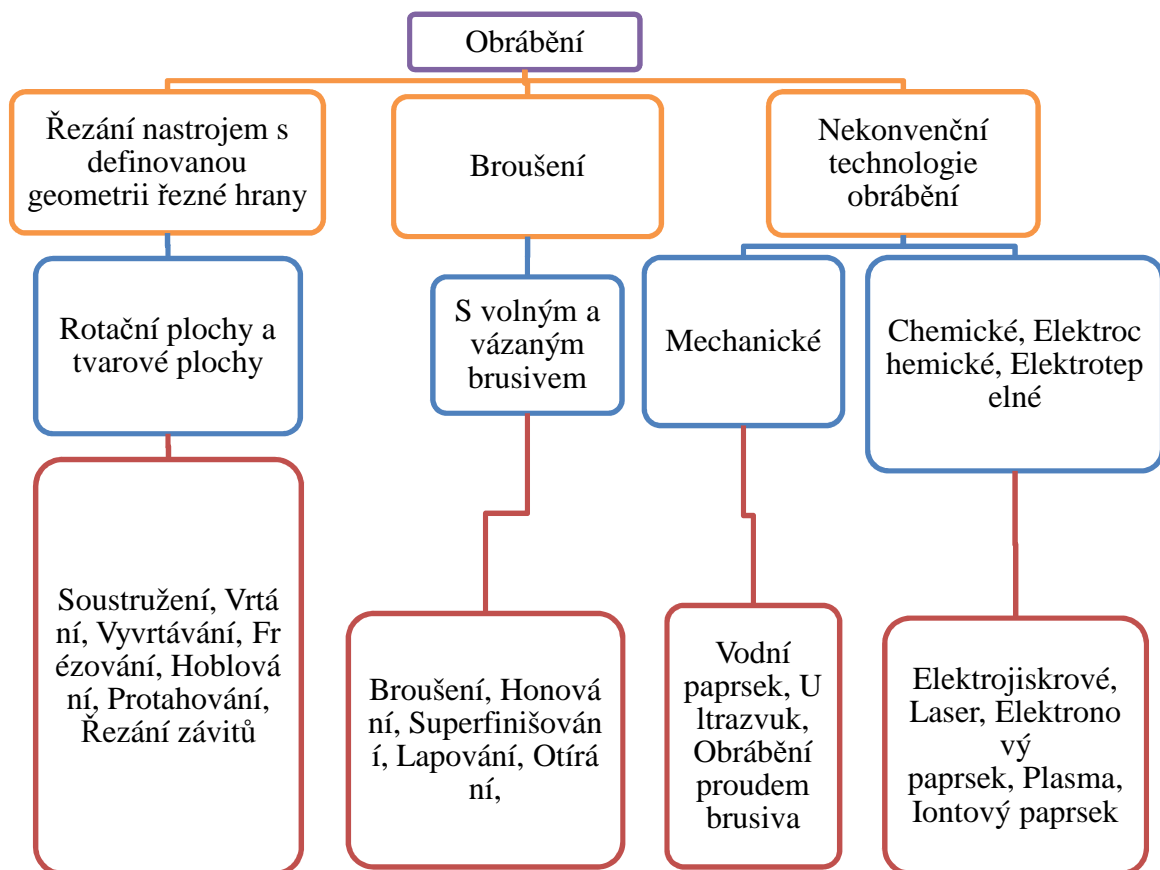
I. TEORETICKÁ ČÁST

1 DĚLENÍ MATERIÁLU:

Obrábění:

Je široký pojem, který zahrnuje všechny metody tvarování produktů postupným odebráním určitého množství materiálu, který se nazývá přídavek.

Dělení obrábění:



Obr. 1. Dělení obrábění dle geometrie nástroje. [10]

1.1 Nekonvenční technologie obrábění:

Vysoko technicky náročné vynálezy posledního staletí jako letadla, auta, kosmické průmysl a počítače vytvořili širokou bázi nových těžkoobrobitelných materiálů, pro které obrobění představuje určitý těžko řešitelný problém. Jako příklad můžeme uvést kompozitní materiály s kovovou maticí, monolitické a kompozitní materiály, vysoko-trvanlivé polymery a jiné. Těžkosti při obrábění těchto materiálů vyplívá z jejich vysoké tvrdosti a křehkosti, žárupevnosti, nevhodností tepelných vlastností, chemicky reaktivitu s řezným nástrojem. Zde se ukazují výhody nekonvenčních technologií.

Je třeba zdůraznit, že ani vývoj konvenčních technologií obrábění neustal a byly vyvinuty a jsou používané nové řezné materiály a brusiva (řezná keramika, kubický nitrid boru, polykrystalický diamant), inovační technologie obrábění (Vysokorychlostní obrábění), které do určité míry řeší problémy těžkoobrobitelných materiálů, ale napříč těmito zlepšení neřeší základní problém obrábění a to opotřebení nástroje.

Právě vývoj nekonvenčních technologií, které využívají jiné zdroje energie, jako je čistá mechanická energie, pomáhá při řešení problémů spojených s opotřebením nástroje při obrábění.

Vývoj nekonvenčních technologií z hlediska opotřebení nástroje:

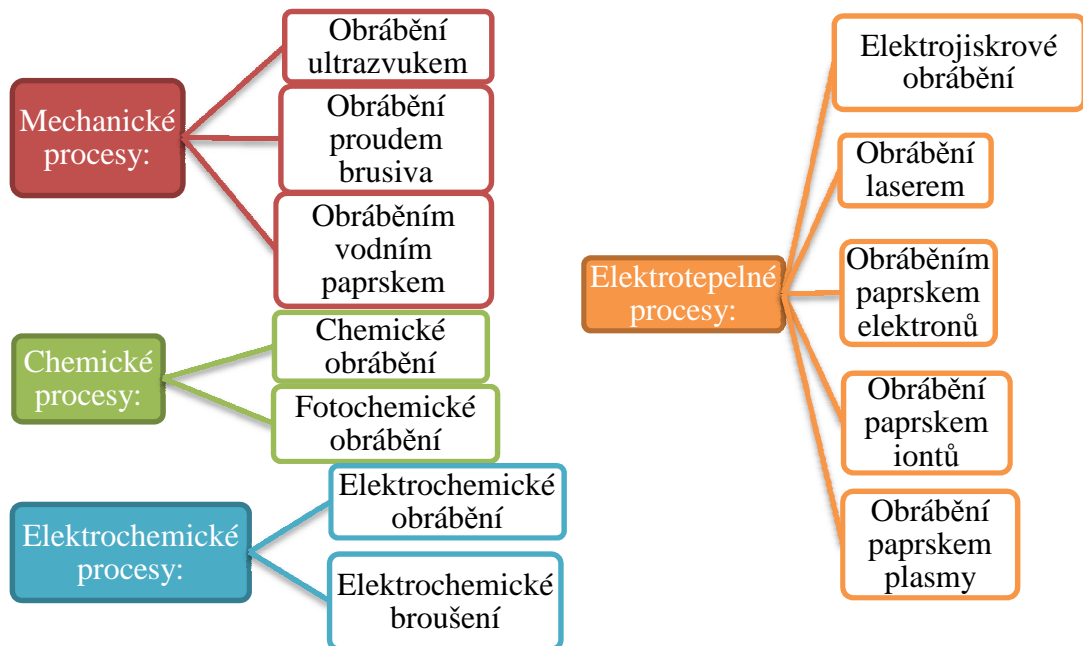
- využívání elektrické, tepelné, chemické a elektrochemické energie na podporu konvenčních metod obrábění, které snižují intenzitu opotřebení;
- využívání mechanické, elektrické, tepelné, chemické a elektrochemické energie v soustředěném energetickém svazku na opracování materiálů bez použití nástroje jako geometrického tělesa, bez jeho aktivní účasti (bez kontaktu s obrobkem).

Charakteristické vlastnosti nekonvenčních technologií:

- Úběr nezávisí na mechanických vlastnostech materiálu jako je tvrdost, pevnost, houževnatost, pojem obrobitelnost materiálu typický pro obrábění řezáním a broušením ztrácí svůj klasický význam (leptatelnost u chemických nekonvenčních operací);
- V místě oddělování materiálů nepůsobí žádná řezná síla, nevzniká řezný odpor, obrobky se vlivem mechanického zatížení nedeformují;
- v místě řezání materiálu přechází méně tepla do obrobku protože:
 - Oddělování částic je mikrozrnkové a dochází k němu na velkém počtu míst.

- Frekvence elementárních úběru je vysoká
- Opracovává se celý povrch najednou;
- Maximální velikost obrobku je omezena energetickou základnou zařízení;
- Možnost mikroobrábění a dosahování „nano“ 10^{-9} mm rozměrů;
- V porovnání s konvenčním procesem nekonvenční technologie vykazují vyšší spotřebu energie při úběru a nižší poměrný úběr. [10]

Dělení nekonvenčních technologií z hlediska hlavního energetického zdroje úběru:



Obr. 2. Dělení nekonvenčních technologií. [10]

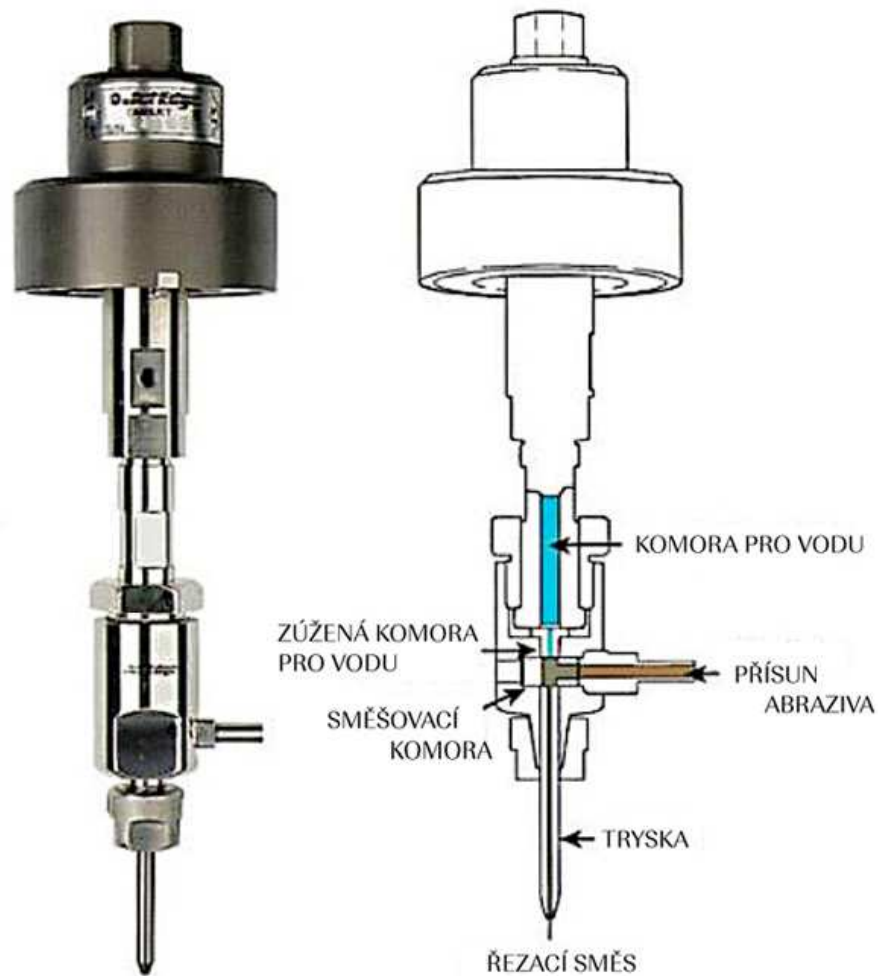
Technologické parametry vybraných nekonvenčních technologií:

Metoda	Drsnost Ra [μm]	Stupeň přesnosti IT	Hloubka ovlivněné vrstvy [μm]	Úběr [cm ⁻³ .min ⁻¹]	Měrná spotřeba energie [kWh.cm ⁻³]
Elektrojiskrové obrábění	50-0,2	6-12	10-300	0,001-0,6	0,1-1
Obrábění paprskem laseru	50-6,3		100	0,001	8-13
Obrábění paprskem elektronů	50-6,3		beze změn	0,1-0,4	
Obrábění paprskem plasmy			500-800	100	
Elektrochemické obrábění	2,5-1,6	9-12	beze změn	0,05-0,5	0,1-0,3
Elektrochemické broušení	0,8-0,2	6-9	beze změn	0,1	0,04-0,08
Ultrazvukové obrábění	6,3-0,4	7-9	beze změn	0,1-10	0,07-0,8

Tab. 1. Technologické parametry vybraných nekonvenčních technologií. [17]

1.1.1 Vodní paprsek

Řezání a dělení materiálů pomocí vodního paprsku pod názvem hydrodynamické obrábění je známé už několik desetiletí. Technologický proces využívá úzký vysokotlaký a vysokorychlostní proud vody (tlak vody okolo 400MPa) jako řezný nástroj. Přidáním jemného brusiva zvýšilo účinnost řezání. Vodní paprsek má široké uplatnění při obrábění a opracovávání kovových a nekovových materiálů (např. litiny, nerezová ocel, legovaná uhlíková ocel, nástrojová ocel, hliník, měď, titan, beton, keramika, kompozitní materiály s kovovou maticí a jiné.) [10]



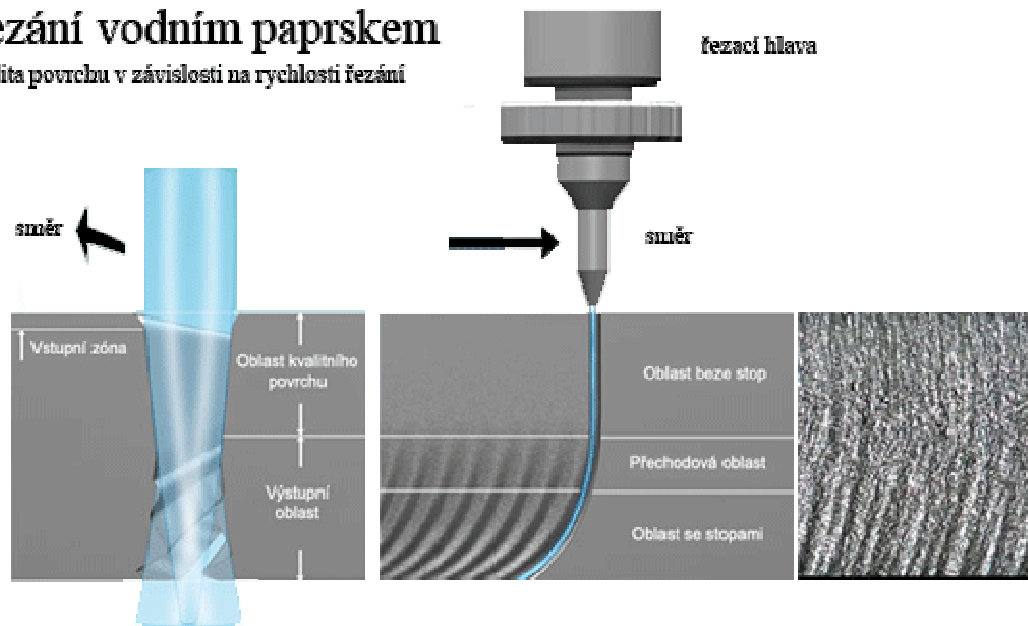
Obr. 3. Schéma řezání vodním paprskem [9]

Princip

Řezání vodním paprskem spočívá v odebrání materiálu mechanickým účinkem dopadu úzkého vodního proudu s vysokou rychlostí a kinetickou energií na jednotku plochy. Abraziva znásobují mechanický účinek dopadu. Paprsek nebo proud vody je generován vysokým tlakem vody, která přechází přes trysku s průměrem okolo 0,3mm. Proud vody proniká do obrobku a postupně ztrácí svou kinetickou energii a vychyluje se. [10]

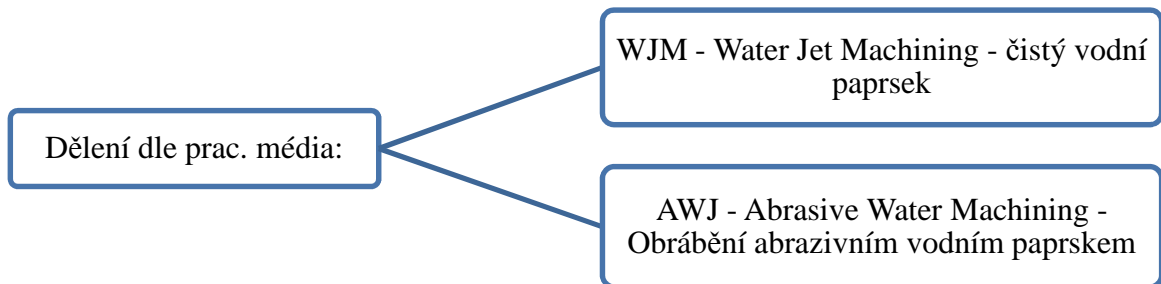
Řezání vodním paprskem

Kvalita povrchu v závislosti na rychlosti řezání



Obr. 4. Kvalita povrchu v závislosti na rychlosti řezání. [8]

Rozdělení metody z hlediska použitého pracovního média:

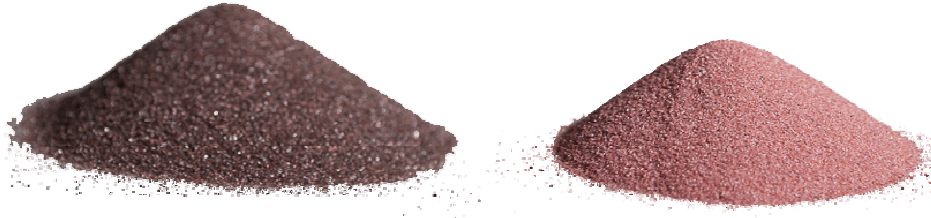


Obr. 5. Rozdělení vodního paprsku z hlediska použitého pracovního media. [10]

Charakteristika vodního a abrazivně vodního paprsku:

- Pracovní tlak vody 300÷400MPa (pro dělení kovů čistým vodním paprskem až 690MPa);
- brusivo – přírodní granát, minerální písek, křemičitý písek, ocelová drť, oxid hlinitý;

- Vzdálenost trysky od obrobku se pohybuje od 2,5÷25mm
- rychlost paprsku je 600÷900 m/s;
- šířka řezu pro tenké materiály je přibližně o 0,3mm větší, než průměr trysky. [10]



Obr. 6. Abrazivo - hnědý korund F36 a přírodní granát [7]

Výhody:

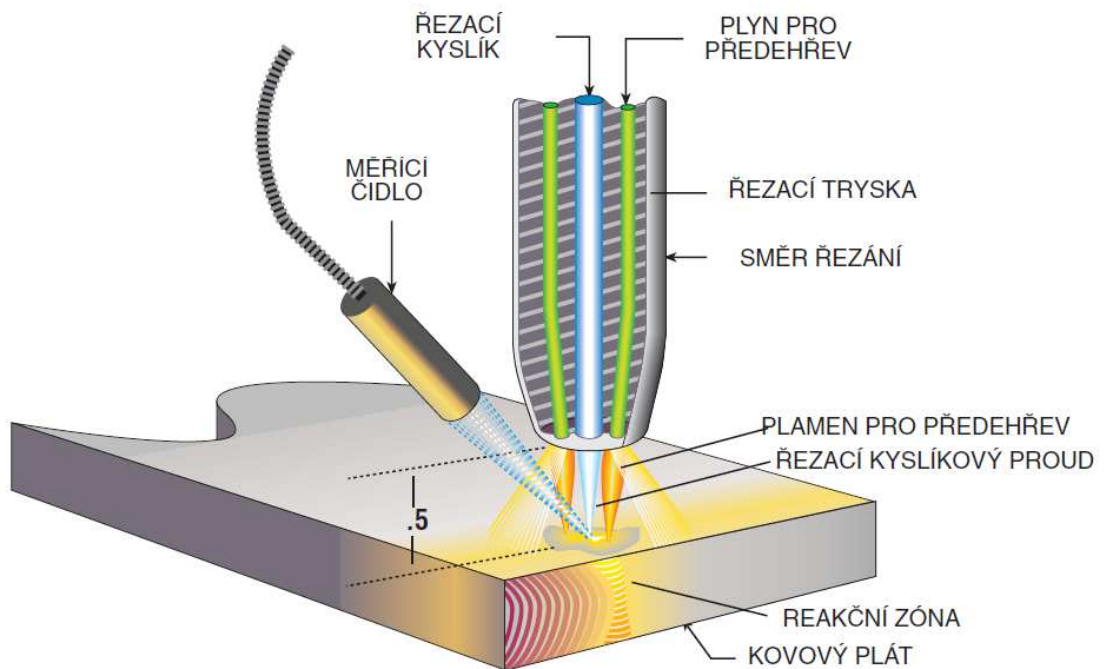
- Vysoká rychlost řezání;
- schopnost řezat rovinné ale i tvarově složité plochy v úzkých tolerancích;
- minimální tepelné ovlivnění povrchu;
- malé deformační napětí v opracovaném povrchu;
- možnost řezat v různých směrech bez ztráty účinnosti paprsku;
- možnost řídit dráhu paprskem číslicovým řízením. [10]

1.1.2 Řezání kyslíko-acetylenovým plamenem

Nelegované a nízkolegované oceli hoří v čistém kyslíku při překročení teploty vzplanut, která je kolem 1200°C, tedy pod teplotou tání železa 1535°C. Tato okolnost je podmínkou žárového řezání. Řezací hořák pracuje na principu tepelné a řezací trysky. Plamen tvořený spalováním hořlavého plynu, ohřeje materiál na teplotu hoření, pak je zvětšen přívod kyslíku a přebytečný kyslík spaluje řezaný materiál. Drsnost plochy řezu je srovnatelná s povrchem po mechanické pile. [2]

Drsnost závisí na:

- vzdálenosti řezacího hořáku od materiálu;
- průměr řezací trysky;
- tlak kyslíku;
- rychlost posuvu (pohybu) hořáku. [2]



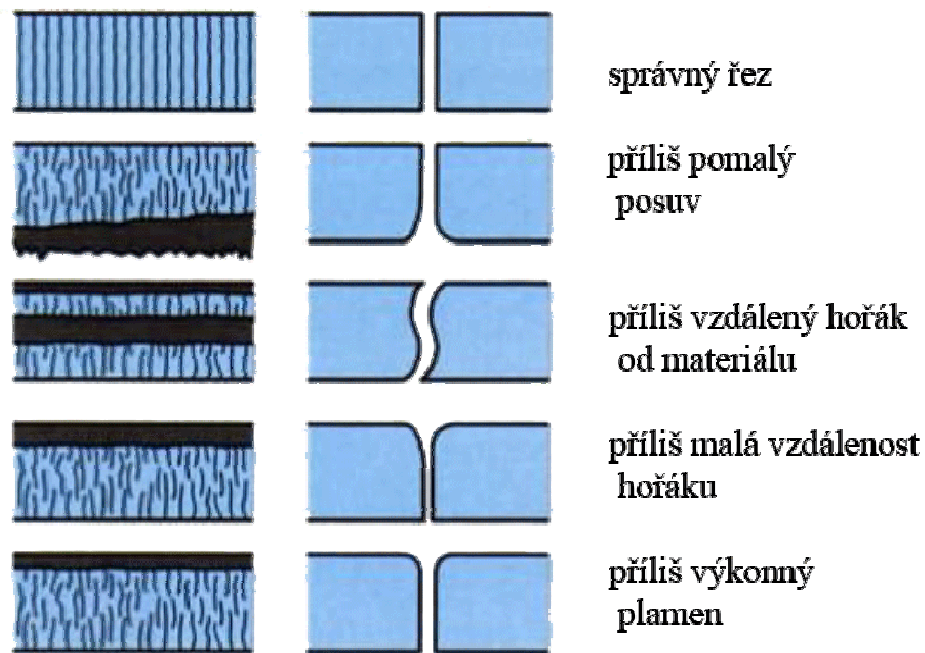
Obr. 7. Řezání kyslíko-acetylenovým plamenem [15]

Výhody:

- Tloušťka řezání 5 až 1000mm[2]

Nevyhody:

- Nelze řezat neželezné kovy jako hliník, měď, chrom, nikl, mangan aj., protože mají zápalnou teplotu vyšší než bod tání;
- velká tepelně ovlivněná oblast řezu. [2]



Obr. 8. Vliv parametrů na jakost povrchu. [2]

1.1.3 Laser

Podstatou tohoto způsobu je soustředění energie, elektromagnetického záření viditelného světla, na malou plošku obrobku. Přeměnou energie tohoto záření na energii tepelnou se místo dopadu zahřeje na teplotu, značně přesahující teplotu tavení obráběného materiálu. Materiál se v místě dopadu taví a vypařuje. Generátorem svazku paprsků světla o velmi vysoké intenzitě je takzvaný laser. [1]

Slovo laser je složené z počátečních písmen anglického názvu popisující jeho funkci: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, což by se dalo přeložit jako zesílení světla pomocí vynucené (stimulované) emise záření.

Laser pracuje na principu indukované emise, vynuceného záření. Indukovaná emise je vyvolána dopadem záření na atom prvku, při kterém záření donutí elektron obíhající kolem jádra přijmout energii a tím vystoupat na vyšší oběžnou dráhu. Další příjem energie a rovnováha sil v atomu přinutí elektron vrátit se na svoji původní oběžnou dráhu a vyzářit přijatou energii do prostoru. Vzniklé záření je monochromatické (tzn. má jednu, přesně definovanou vlnovou délku) a koherentní, což znamená, že příslušné částice (fotony) se ve svazku pohybují jedním směrem a jsou v jeho průřezu, buď stejnoměrně, nebo alespoň velmi pravidelně rozděleny.

Laserová hlavice obsahuje laserové médium, které určuje délku vlny záření. Jedná se o směs několika materiálů s vhodnými energetickými hladinami ve vhodném nosném materiálu, který je průhledný a má schopnost odvádět vzniklé teplo. Může být pevné, tekuté nebo plynné. Další částí laseru je rezonátor, optický systém, umožňující zformovat a zesílit záření, tj. elektromagnetickou vlnu z něj vycházející. Konstrukční uspořádání rezonátoru určuje vlastnosti paprsku (koherenci, intenzitu záření, jeho pravidelnost, spektrální a prostorové charakteristiky). Optický rezonátor tvoří nejméně dvě zrcadla. Nejčastěji se používají sférická zrcadla. Průměr a zakřivení zrcadel určují rozdělení intenzity záření a energetickou rozbíhavost laserového záření, tj. divergenci paprsku, která je dána rovinným nebo prostorovým úhlem, ve kterém se šíří.

Budicí zařízení, které ovlivňuje pracovní režim laseru. Způsob buzení je dán laserovým médiem. Plynné médium je buzeno téměř vždy elektrickým výbojem, stejnosměrným nebo střídavým proudem. Pevné laserové médium je nejčastěji buzeno lampami (výbojkami) nebo diodami. Zdrojem energie buzení je speciální druh síťového napáječe.

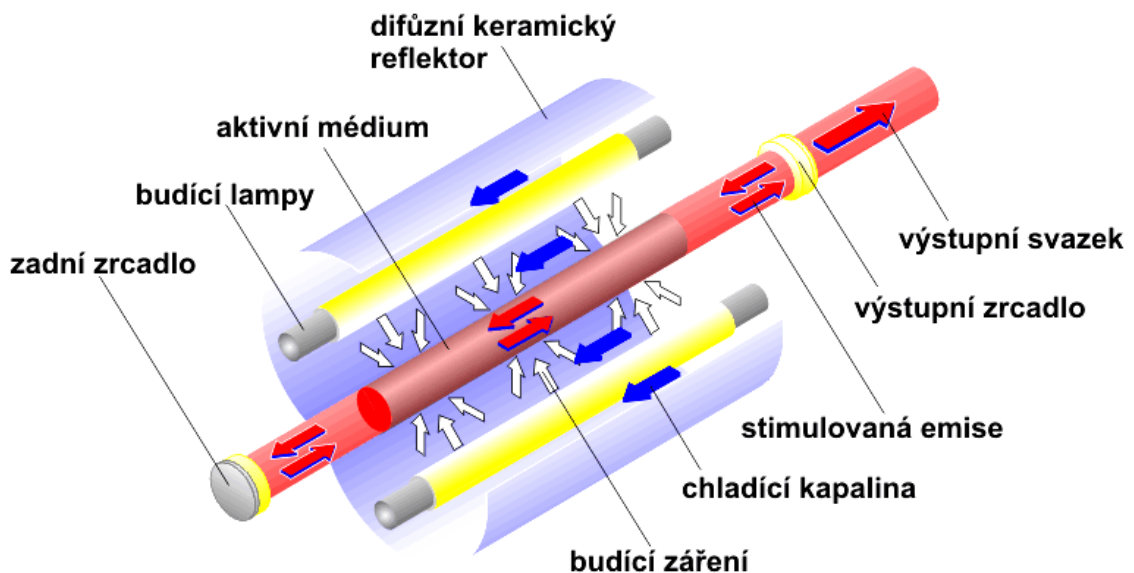
Chladicí systém, který odvádí nevyužitou energii, jež se nepřemění v záření, ale v tepelnou energii. U laserů používaných při zpracování materiálů se nejčastěji používá chlazení vodou. Chladicí okruh má dvě větve, vnitřní (používá se deionizovaná voda) a vnější (voda z vodovodní sítě nebo ze speciálního zásobníku s čerpadlem). Výrobci laserových zařízení dodávají také speciální chladicí zařízení, u kterých je vnitřní okruh chlazen vzduchem. [12]

Rozdělení laserů podle skupenství materiálu, které se používá pro generování záření:

- lasery v pevné fázi;
- plynové lasery;
- kapalinové lasery;
- polovodičové lasery;
- plazmatické. [12]

Lasery v pevné fázi:

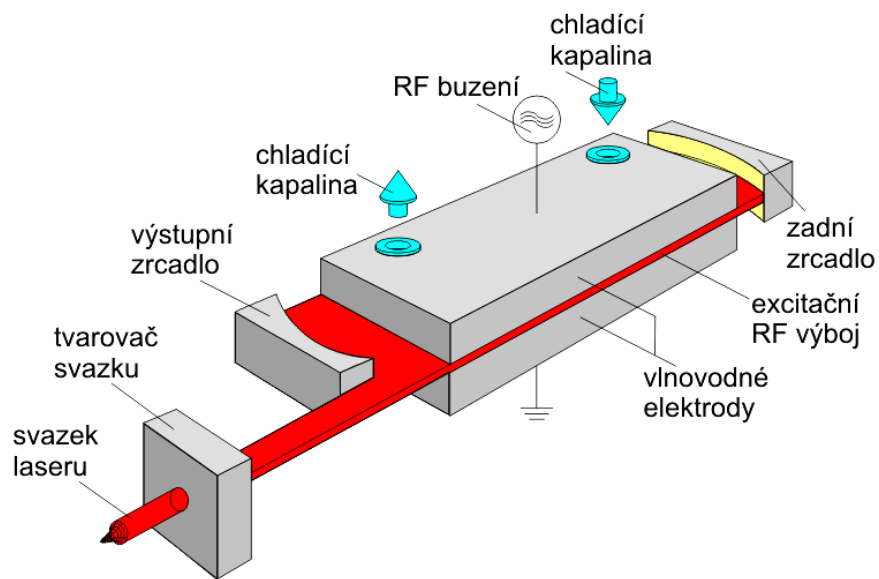
Nejrozšířenější a nejvyžívanější laser v pevné fázi je Nd-YAG laser, který se skládá z pevného $Y_3Al_5O_{12}$ (ytrium/hliník/kyslík) izometrického krystalu, který obsahuje asi 1% iontů neodymu (Nd^{3+}). Tohoto typu laseru je na trhu nepřeberné množství, z nichž mnohé jsou použitelné pro průmyslové aplikace. Používají se Nd-YAG lasery buzené buď výbojkami (LPSS – *lamp pumped solid state*) nebo laserovými diodami (DPSS – *diode pumped solid state*). LPSS Nd:YAG lasery mají nízkou účinnost přeměny elektrické energie na světelnou, neboť velká část energie výbojky se nevyužije a přemění se na teplo. Z toho důvodu je nutné chlazení. [13]



Obr. 9. Nd-YAG laser [13]

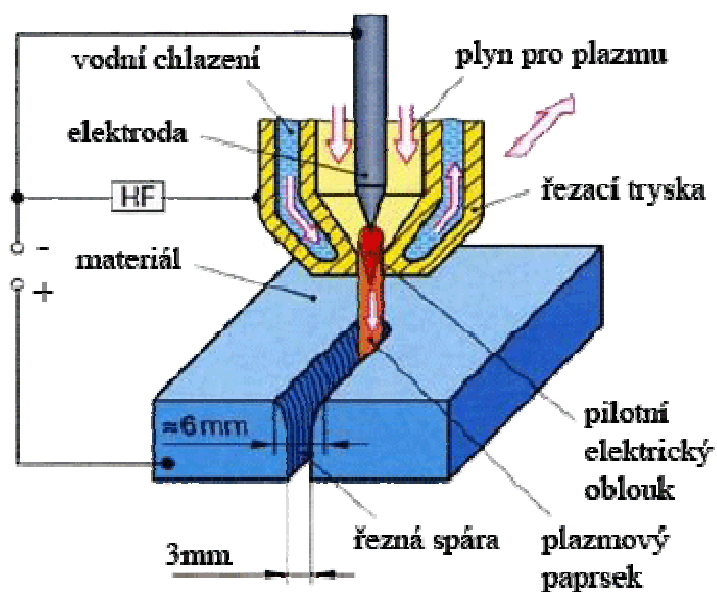
Plynové lasery

Z plynových laserů je nejpoužívanější laser na bázi molekuly CO_2 . Ostatní plynové lasery nemají dostatečný výkon kromě argonového laseru a excimetrových laserů. Argonový laser se používá ve fototechnice jako zdroj záření. Excimetrové lasery pracují v oblasti UV vlnových délek na bázi molekul. CO_2 lasery dosahují absolutně největších výkonů. [14]

Obr. 10. CO₂ laser. [13]

1.1.4 Plasma

Plazmové způsoby řezání (PBM - Plasma Beam Machining nebo taky PAM – Plasma Arc Machining) se začaly používat začátkem 50. tých let 20. století jako alternativní způsoby řezání hliníkových a jiných neželezných materiálů. Sloužily tak jako náhrada za řezání kyslíkovým plamenem. Samotný pojem „plazma“ zavedl americký chemik a fyzik Irving Langmuir v roce 1923. [10]



Obr. 11. Schéma řezání plasmou. [2]

Plazma, jako čtvrté skupenství látky, je elektricky vodivý stav plynu, který se na Zemi vyskytuje jen výjimečně. Vzniká ionizací plynu při vysokých teplotách, které se pohybují nad 20 000 °C, nebo jako elektrický výboj mezi anodou a katodou.

Termín plazma se používá pro označení velkého počtu částic (atomů, molekul, iontů, elektronů) bez pevné vzájemné vazby, ze kterých aspoň některé mají elektrický náboj a v dostatečně velkém objemu je součet kladných a záporných elektrických nábojů nulový. Plazma je elektricky vodivá a podléhá účinkům elektrického a magnetického pole.

Plasma je výjimečný stav plynů. Díky ionizaci atomů se stává vodivým. Je to směs elektronů a kladných iontů, která je většinou rozložena uvnitř plynu z neutrálních částic. Jako celek je plazma v ustáleném stavu elektricky neutrální. Může však být částečně nebo úplně ionizovaná. Teplota částečně ionizované plazmy se pohybuje kolem 5000÷15000 °C. Teplota zcela ionizované plazmy je asi 100 000 °C.

Plazma může vzniknout ohřevem látky na vysokou teplotu nebo elektricky obloukovým výbojem mezi dvěma uhlíkovými elektrodami, případně mechanicky kompenzovaným iontovým svazkem.

Jako zdroj tepla se pro ionizaci plynů nejčastěji používá elektrický oblouk. Samotný oblouk je plazmou s nízkým stupněm ionizace.

Důležité je, aby byl plazmový oblouk stabilizovaný. To znamená usměrnění paprsku do požadovaného tvaru (jeho zúžení). Tuto funkci je možné zabezpečit několika způsoby:

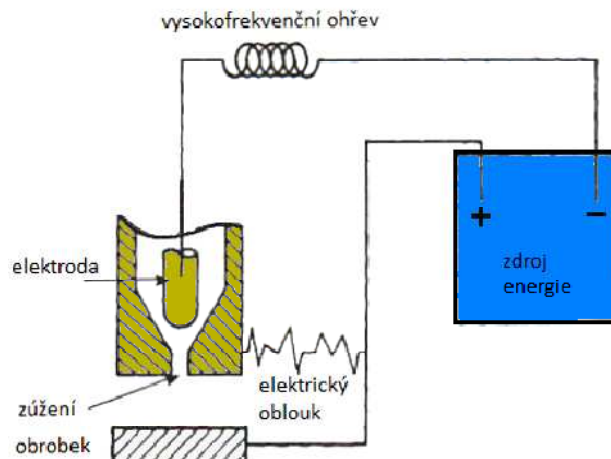
- Tvarem dýzy plazmového hořáku;
- proudícím plynem;
- vodou

Pro vytvoření technicky kvalitní plazmy, je nezbytné sledovat její technologické parametry. Mezi ně patří zejména teplota plazmy a její elektrická vodivost, průměr paprsku plazmy, hustota proudu plazmy či stupeň fokusace paprsku po výstupu z trysky. [10]

Plazmové zařízení a používané plyny

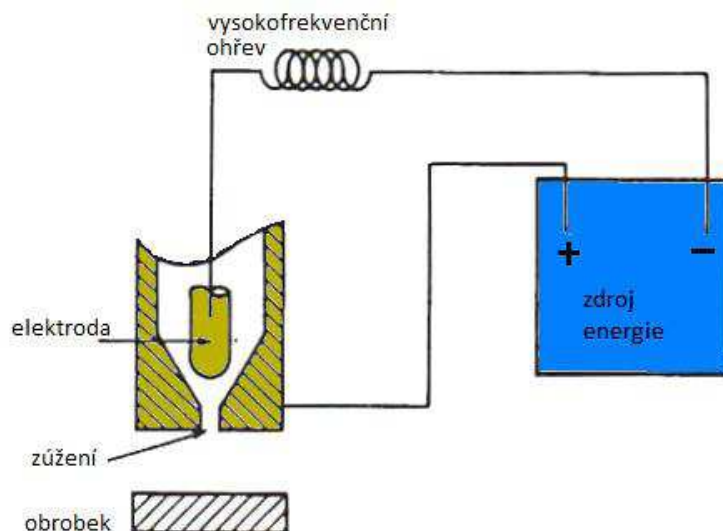
Plazmové zařízení se skládá ze zdroje energie, ionizátoru, plazmového hořáku a řídicí jednotky. V dnešní době se běžně využívá CNC řízení. Plazmové zařízení se dělí na dva typy:

- Zařízení využívající přenesený (transferovaný) oblouk – oblouk se tvoří mezi wolframovou elektrodou uvnitř plazmového hořáku a obráběným materiálem. Používá se pro vodivé materiály.



Obr. 12. Transferovaný oblouk. [10]

- Zařízení využívající nepřenesený (netransferovaný) oblouk – oblouk se tvoří mezi dvěma elektrodami uvnitř plazmového hořáku. Používá se pro nevodivé materiály.



Obr. 13. Netransferovaný oblouk. [10]

Mechanismus plazmového řezání materiálů

Princip plazmového dělení materiálu spočívá v tavení materiálu extrémně vysokými teplotami, které se tvoří vnikem plazmy. Přenos tepla do materiálu je zhruba $24,1 \div 68,7$ MW/m².

Působením vysokých teplot ($15\ 000 \div 33\ 000$ °C) nastává tavení materiálu, odtékání, odstříkávání, odpařování, sublimace nebo rozprašování. Tyto jevy lze využít u dalších technologiích jako například svařování či nanášení povlaků.

Teorie principu úběru materiálu je založena na předpokladu, že materiál obrobku absorbuje veškerou tepelnou energii, kterou plazma uvolňuje při styku s materiálem. Následně pak dojde k jeho tavení a odtékání nebo odpaření.

Proces úběru materiálu je ovlivněn následujícími parametry:

- Průměr trysky – žádoucí je, aby průměr trysky byl velmi malý. Ovšem čím menší je průměr trysky, tím je její životnost nižší – dochází k opálení výtokového otvoru trysky. Používané průměry trysek jsou v rozsahu $0,79 \text{ mm} \div 6,35 \text{ mm}$.
- Výkon pro tvorbu oblouku – pohybuje se kolem 250 kW pro proudy v rozsahu $50 \div 1000$ A a napětí $100 \div 250$ V. Výkon se mění s materiálem a jeho tloušťkou.
- Použité plazmové plyny – argon, helium, dusík a jiné. Tyto plyny ovlivňují kvalitu řezu, rychlost řezání a náklady na řezání.
- Vzdálenost mezi hořákem a materiálem – velmi důležitý parametr, který má vliv na rovinnost řezu. Tryska nesmí být ani moc blízko ani moc daleko od obráběného materiálu. Tato vzdálenost se rovněž mění s tloušťkou řezaného materiálu.
- Řezná rychlost – má velký vliv na jakost obrobenej plochy, velikost plochy ovlivněné tepelným účinkem, velikost řezné spáry.
- Tloušťka řezné spáry a kolmost hran – v porovnání s laserem je tloušťka řezné spáry mnohem tlustší. Pohybuje se v řádech milimetrů. Také řezné hrany nejsou kolmé. Jejich zešíkmení je až 10°. To může být výhodou při svařování plechů. [10]

Plazmový hořák zabezpečuje:

- přívod proudu na elektrodu
- přívod všech pracovních plynů
- tvarování plazmového paprsku a usměrňuje paprsek do místa obrábění.

Plazmové hořáky se dají členit podle výkonu, způsobu chlazení, složení plazmového plynu, druhu materiálu katody, pracovního systému hořáků či použití (ruční, strojní). Chlazení hořáků je velmi důležitá funkce v oblasti technologie plazmového obrábění. Chlazení bývá zabezpečeno právě konstrukcí hořáků. Může být chlazen vodou buď přímo anebo nepřímo. Chlazení může být také zabezpečeno proudícím plynem.

Pro stabilizaci plazmového oblouku se používá směs plynů nebo voda. Nejčastěji se používá směs argonu, dusíku, vodíku a stlačeného vzduchu. Nevýhodou tohoto způsobu stabilizace je vznik dýmu, prachu, hluku a ultrafialového záření. Při stabilizaci směsí plynů se také uvolňuje velké množství zdraví škodlivých oxidů dusíku, které se musejí odsávat. To znamená další náklady na zařízení.



Obr. 14. CNC plazmový řezací stroj Vanad KOMPACT. [16]

Při používání technologie plazmového obrábění se využívá řada plynů, které mají zásadní vliv na obráběcí proces. Podle funkce můžeme plyny rozdělit:

- Plazmové plyny – argon (Ar), argon a vodík (Ar + H₂), helium (He), dusík (N₂), oxid uhličitý (CO₂), vzduch – tyto plyny jsou přiváděny přímo do elektrického oblouku a následně vytvářejí plazmu.
- Fokusační plyny – tyto plyny slouží k zúžení plazmového paprsku. Nejčastěji se používá argon (Ar), argon a vodík (Ar + H₂), argon a dusík (Ar + N₂), dusík (N₂)
- Ochranné plyny – slouží k ochraně plazmového paprsku a místa řezu před účinky atmosféry. Nejčastěji se používá argon (Ar). [1]

Výběr nejlepší řezacího plynu:

V roce 1970 se plazmové řezání ocelového plechu provádělo zejména kombinací dusík-voda díky své spolehlivosti a všestrannosti. Dusíku však kontaminoval řez a poškozoval materiál pro následné svařování.

Nicméně, čas strávený na vytvoření svarové mezery lze snadno odstranit a využít veškeré zisky z rychlejšího plazmového řezání. Jinak řečeno, nezáleží na tom, jak rychle dokážeme řezat materiál, pokud výsledný řez nelze svařovat efektivně.

Uhlíková ocel: Proč je kyslík nejlepší

Při použití dusíku u řezání uhlíkové oceli plasmou, je dusík absorbován do řezaného povrchu základního kovu, Dusík, nicméně, je chemicky méně aktivní než kyslík. Kyslík snadněji reaguje s řadou prvků, jako je křemík, hliník, mangan, které mohou být dodávány do svaru přes legující prvky přidávaného materiálu nebo ochranného plynu. U dusíku hrozí, že v zóně svaru zůstanou nitridy na hranicích zrn a tím pádem pórovitost ve vzniklém svaru, proto je třeba obráběné plochy mechanicky před svařováním připravit (broušení, obrábění).

Kyslík použity pro řezání plazmou z uhlíkové oceli, vede k lepší kvalitě řezu: vyšší rychlost, nižší šikmé úhly (pravoúhlost), drsnost, tenčí tepelně ovlivněná zóna, příznivější pro svary, což může snížit množství vad škodlivých ve struktuře.

Kromě výrazně snížení nitridů v povrchu řezu, kyslík také snižuje ořepky, které se drží na materiálu při řezání. Kyslík exotermicky reaguje s železem tekutého kovu a vytváří oxid železitý. Reakce uvolňuje další energii, která působí na tekutý kov, který se ještě více zahřeje a je méně viskózní. To usnadňuje odstranění tekutého kovu ze strany plazmové trysky. S toho vyplívají čisté řezné hrany bez ořepů na dně.

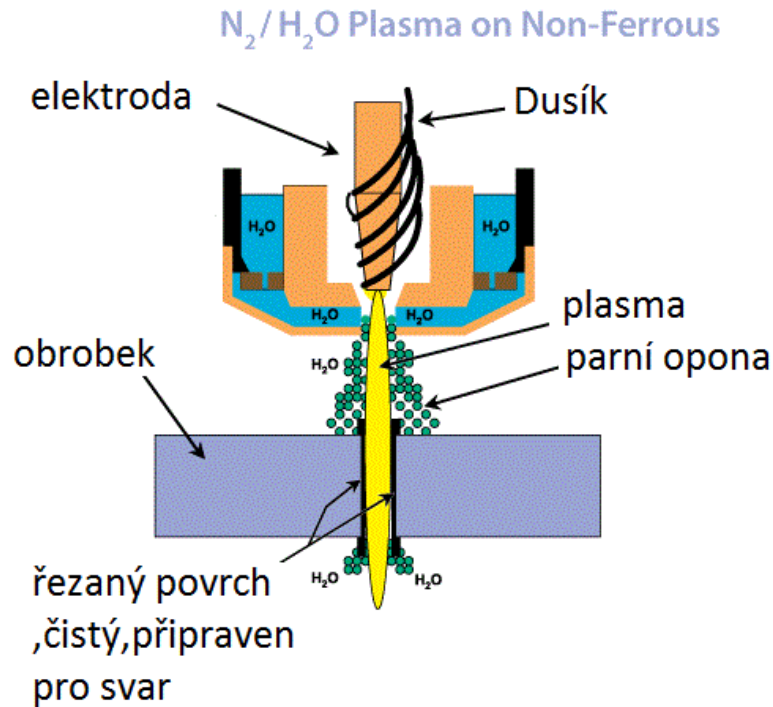
Použití Dusíků: nerez a hliník

To neznamena, že se nedá použít dusík jako plazmový plyn. Kovy bez železa jako je například hliník nebo nereaktivní slitin železa (nerezová oce). Pro hliník, může plynný kyslík vést k těžké oxidaci v řezu.

Pro pálení těchto materiálů se spoléhá výhradně na přenosu tepla z plazmy oblouku k práci. Plyn argon-vodík pracuje dobře, protože má vysokou tepelnou vodivost. Lepší tepelná vodivost znamená více tepla lze přenést z oblouku do kovu.

Ale argon-vodík není jedinou alternativou pro hliník a nerez řezání. Se správnou konstrukcí hořáku se může vstřikování dusík do vody. Je to méně nákladné, než ostatní plyny.

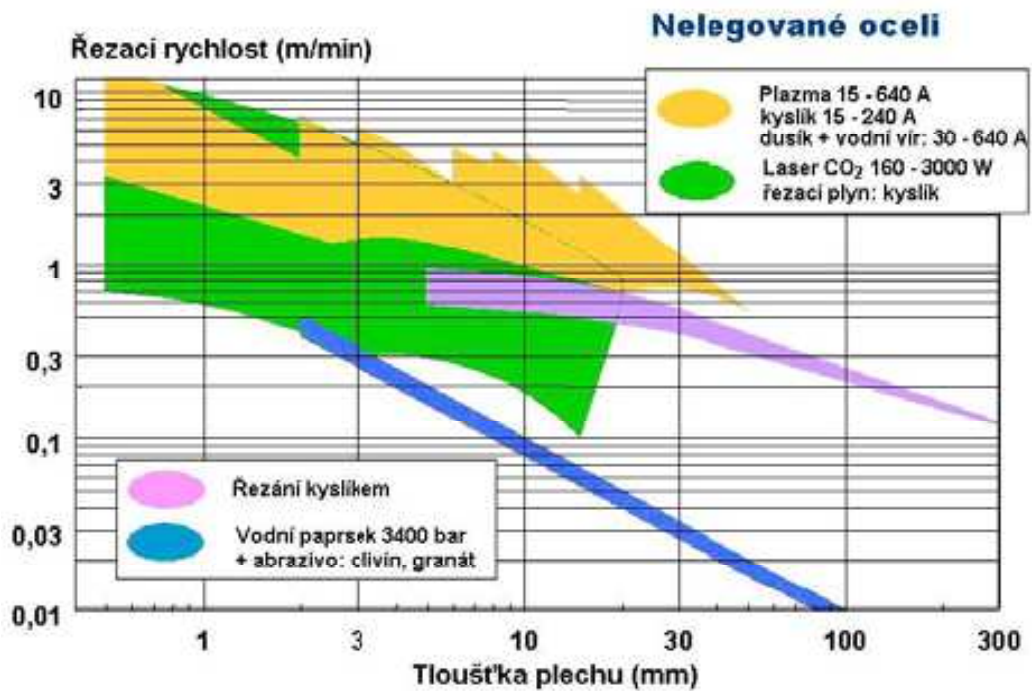
Proces zahrnuje elektrodu obklopenou dusíkem, který je vytápěn elektrickým obloukem plazmy. Parní opona plazmové vody na rozhraní, které chrání řez před atmosférickým vlivem a ochlazuje výpalek. Chlazení napomáhá snížit tepelně ovlivněnou oblast. [11]



Obr. 15. Stabilizace plazmového oblouku pro neferitické materiály. [11]

1.2 Porovnání metod tepelného dělení materiálu

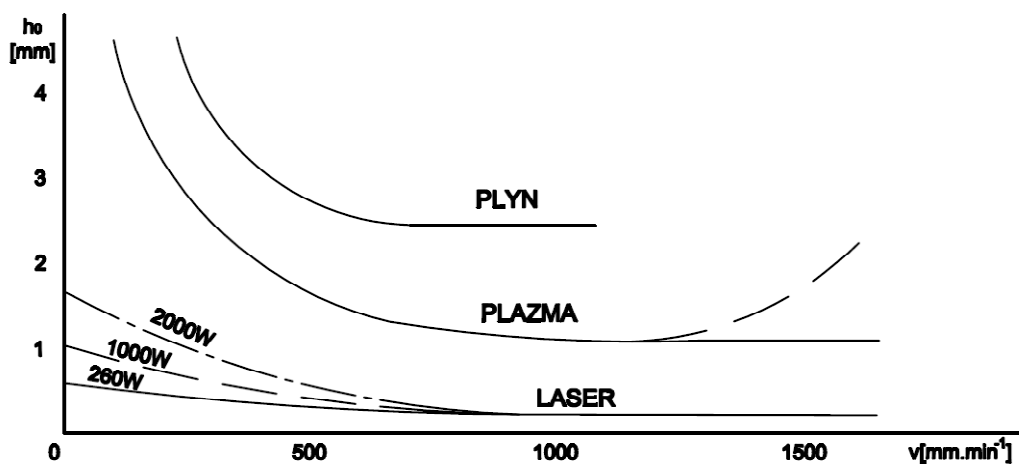
Řezání kyslíkem je ve výrobě ocelových konstrukcí vzhledem k různorodým tloušťkám materiálu a převážně zpracovávaným nelegovaným ocelím nepostradatelnou metodou přípravy materiálu. K tomu přispívají také relativně akceptovatelné investiční náklady. Plazmové řezání zajistí vysokou produktivitu přípravy materiálu, a to jak nelegovaných, tak vysokolegovaných ocelí a slitin hliníku, zejména však menších až středních tloušťek. Investiční náročnost je jen o málo vyšší než technologie řezání kyslíkem. Běžná je konstrukce řezacích strojů kombinujících obě tyto technologie. Investičně náročné laserové řezání je vhodné pro velmi kvalitní řezy vysokými rychlostmi a bez deformace materiálu, ovšem s omezením tloušťky materiálu.[6]



Obr. 16. Závislost řezné rychlosti na tloušťce řezaného plechu. [6]

1.3 Tepelné ovlivnění materiálu

S tepelným dělením je spojen teplotně-deformační cyklus stejného charakteru, jako při tavném svařování. Je proto nutno počítat s obdobnými problémy, například s možností vzniku trhlin, se zakalením, vyžháním, rekrystalizací nebo ztrátou korozní odolnosti. V tomto směru je nutno každý materiál posuzovat obdobně, jako při svařování. V řadě případů je nutno předepsat určitý teplotní režim. Někdy se ovlivněná oblast obrábí, často však zbytečně, zvlášť pokud se takto připravoval materiál pro svařování. [1]

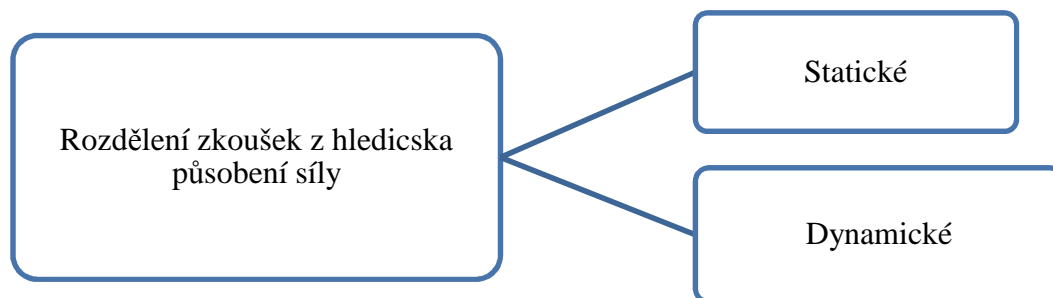


Graf. 1. Tepelně ovlivněná vrstva materiálu. [1]

2 ZKOUŠKY TVRDOSTI

Tvrdotí se rozumí odpor materiálu proti vnikání cizího tělesa a posuzuje se z velikosti trvalé deformace, kterou cizí těleso vtlačované do povrchu zkoušeného materiálu vyvolá. Zjištěná hodnota tvrdosti není fyzikální veličinou, neboť výsledky jsou značně ovlivněny způsobem provedení zkoušky. Hodnoty tvrdosti získané různými metodami lze navzájem srovnávat na základě empirických vztahů.

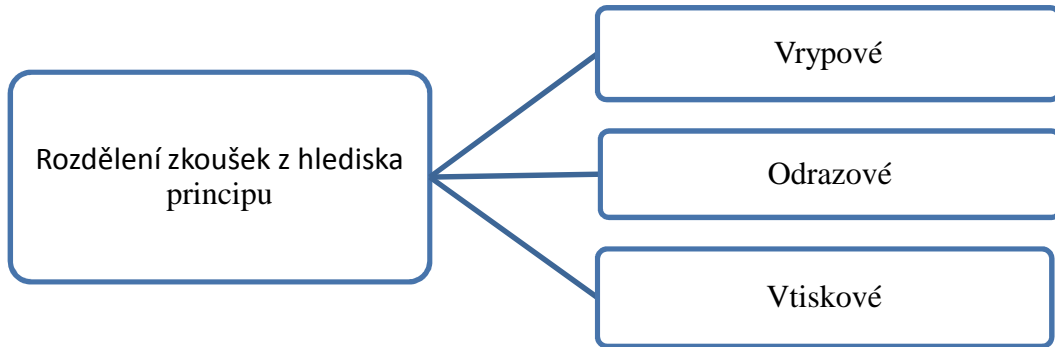
Zkoušky tvrdosti patří mezi nejpoužívanější druhy zkoušek konstrukčních materiálů. Jejich přednost spočívá zejména v poměrně snadném a rychlém provedení a možnosti zkoušení i hotových součástí bez jejich znehodnocení. [1]



Obr. 17. Rozdělení zkoušek tvrdosti

Statické zkoušky tvrdosti jsou zkoušky, u kterých zatěžující síla je stálá nebo se pozvolna zvyšuje. Zátěžná síla působí kolmo k povrchu předmětu a pozvolna vzrůstá až po stanovenou hodnotu, na které se udržuje předepsanou dobu. Nejrozšířenější jsou zkoušky podle Brinell, Rockwella a Vickerse.

Dynamické zkoušky se zejména využívají v provozních podmínkách a pro měření tvrdosti velkých výrobků. Přístroje pro dynamické zkoušky jsou obvykle malé, přenosné a jsou konstruovány na principu vnikací zkoušky statické; vnikací těleso (kulička) je však do zkoušeného materiálu vtlačována rázem. Nejběžnější je tak zvané Baumannovo kladívko a kladívko Poldi. [1]



Obr. 18. Rozdělení zkoušek tvrdosti

2.1 Vrypové :

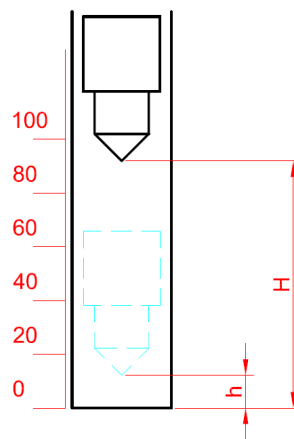
Tvrdým hrotem (obvykle diamantovým) se při malém zatížení vytvoří na broušeném povrchu zkoušeného materiálu rýha (vryp), jejíž šířka je měřítkem tvrdosti (martensova zkouška), (porovnání minerálů dle Mohsa). [1] V technické praxi se využívá zejména na tvrdé a křehké materiály (sklo, porcelán) [5]

2.1.1.1 Vrypová tvrdost podle Martense (HMA)

Zjišťuje se přitlačováním kuželového diamantového hrotu měnitelným tlakem na leštěný povrch zkušebního předmětu, kterým pohybujeme určitou rychlostí. Mírou tvrdosti je pak síla potřebná pro ke vzniku vrypu širokého 0,01mm. [5]

2.2 Odrazové:

Tvrdost se měří velikostí odrazu závaží s kulovitě vybroušeným diamantovým hrotem, které dopadá z určité výšky na zkoušený předmět (Shoreho zkouška). [1]



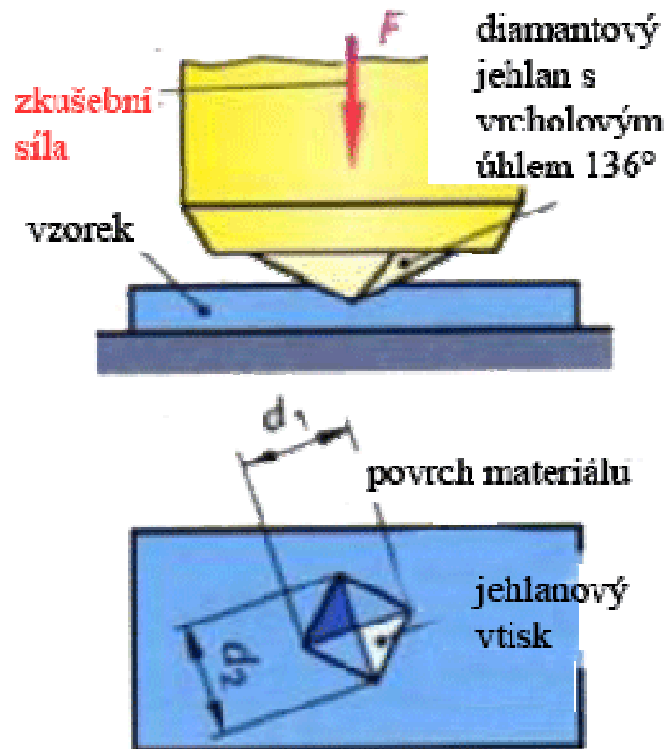
Obr. 19. Zkouška tvrdosti odrazem. [2]

2.3 Vtiskové (vnikací):

Tvrдость se určuje ze z plochy povrchu nebo hloubky vtisku způsobené indentorem (vnikající těleso). [1]

2.3.1 Zkouška tvrdosti podle Vickerse (ČSN EN ISO 6507-1, 2 (42 0374):1999)

Při zkoušce tvrdosti podle Vickerse se vtlačuje do rovné plochy zkoušeného materiálu zkušební silou F diamantové vnikající těleso tvaru čtyřbokého jehlanu s vrcholovým úhlem 136° a po jeho vyjmutí se měří úhlopříčky základny vytvořeného jehlanového vtisku. [2]



Obr. 20. Zkouška tvrdosti podle Vickerse. [2]

Úhlopříčka d se určuje jako aritmetický průměr obou úhlopříček: $d = \frac{d_1 + d_2}{2}$

Tvrdotost podle Vickerse se označuje HV a určuje se podle vzorce: $HV = 0,189 \times \frac{F}{d^2}$

F [N] Síla

d [mm] Aritmetický průměr úhlopříček

Je možná i varianta měření mikrotvrdosti za použití velmi malých sil (2N ž 50N). Rozměry vtisku se měří pod mikroskopem, který je součástí mikrotvrdoměru. Metoda se používá pro měření vytvrzených povrchů (např. nitrídaných).

Provedení zkoušky:

Zkouška tvrdosti se většinou provádí na univerzálních strojích. Zkušební těleso se pomalu vtlačí do vzorku materiálu a po 10 až 15 sekundách se hlava s hrotem zvedne a otočí stranou. Vytvořený vtisk se ve zvětšené velikosti promítne na opticky na matnici a pomocí pohyblivého měřítka se přesně změří jeho úhlopříčky. Při zkoušce tvrdosti se standardně používají tyto síly: 49,03N (HV 5); 98,07N (HV 10); 196,1N (HV 20); 294,2N (HV 30);

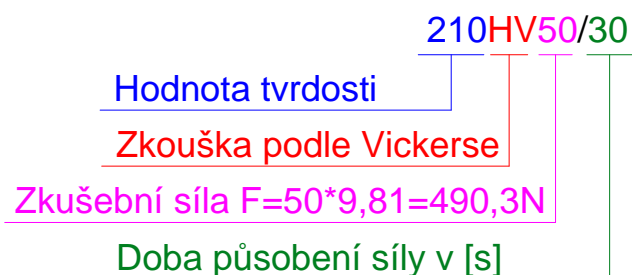
490,3N (HV 50) a 980,7 (HV 100). Při zkoušce podle Vickerse se používá pro měkké i tvrdé materiály stejného zkušebního tělesa. [2]



Obr. 21. Tvrdoměr NEXUS 4500. [28]

Označování:

Tvrdomost podle Vickerse se označuje číselnou hodnotou tvrdosti, zkratkou HV, hodnotou podílu síly a síly 9,81N a dobou působení síly v sekundách.



Obr. 22. Označení zkoušky podle Vickerse. [2]

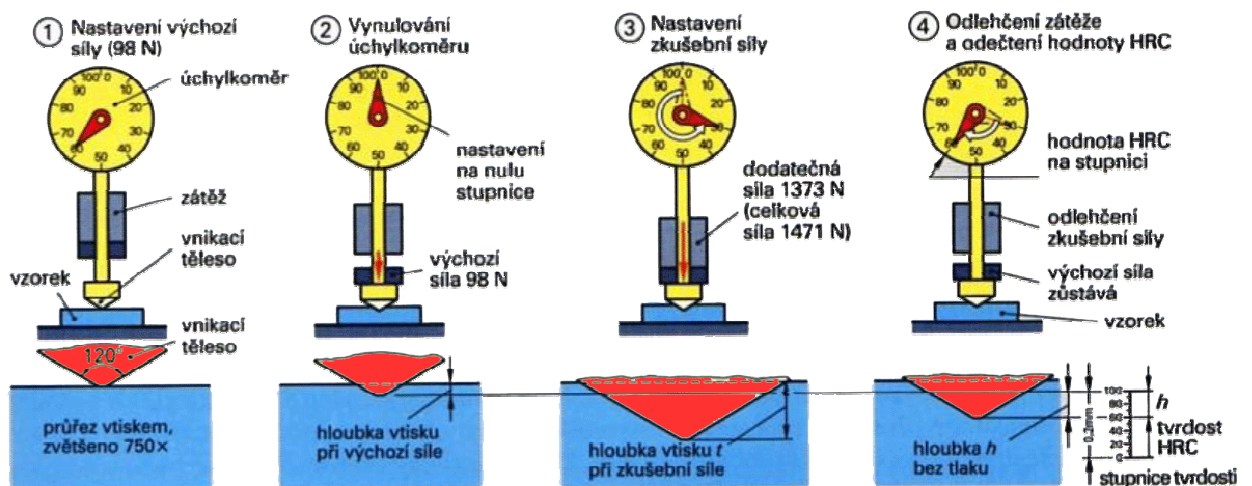
2.3.2 Zkouška tvrdosti podle Rockwella (ČSN EN ISO 6508-1, 2 (42 0360):2000)

Zkouška na rozdíl od Vickerse a Brinella měří hloubku vtisku. Metoda rockwellova je vhodná pro velmi široké rozmezí tvrdostí. Výhodou této metody je přímé odečítání tvrdosti, jednoduchost i rychlost provedení zkoušky. [1]

Provedení zkoušky:

Zkouška podle rockwella se skládá ze čtyř kroků.

Vnikající těleso se nejprve vtlačí do vzorku určitou silou (např. 98N) a na této úrovni se vynuluje měřicí úchylkoměr, který má dvě stupnice pro dvě vnikající tělesa (kužel a kuličku). Potom se vtlačí vnikající těleso zkušební silou (např. 1373N) a po krátké chvíli se zvedne. Nárůst hloubky vtisku h je odečten na úchylkoměru v dílcích, přímo jako tvrdost podle rockwella. Pro různé materiály se používají stupnice A, B, C, D, E, F, G, H, K nebo T. [2]



Obr. 23. Zkouška tvrdosti podle Rockwella. [2]

K měření tvrdosti tvrdých materiálů se používá diamantový kužel s vrcholovým úhlem 120° (HRA, HRC)

K měření měkkých materiálů se používá zakalená ocelová kulička průměru 1,59mm nebo 3,175mm (HRB nebo HRF)

K Měření tvrdosti různě tvrdých materiálů se používají různé zkušební síly (příklady: HRA: $F=490,3N$, HRB: $F=882,6N$, HRC: $F=1373N$). [2]

Označování:

Tvrдость podle Rockwella se označuje naměřenou hodnotou a písmeny HR a písmenem označující stupnici. [2]

56HRC
Hodnota tvrdosti
Rockwellova zkouška C

Obr. 24. Označení zkoušky podle Rockwella. [2]



Obr. 25. Tvrdoměr Rockwell Briro R. [29]

2.3.3 Zkouška podle Brinella (ČSN EN ISO 6506-1, 2, 3 (42 0371):2000)

Zkoušky tvrdosti podle Brinella se provádějí na univerzálních tvrdoměrech. Zkouška se hodí jen pro zkoušení tvrdosti středně tvrdých a měkkých materiálů, např. hliníku nebo plastů. [2]

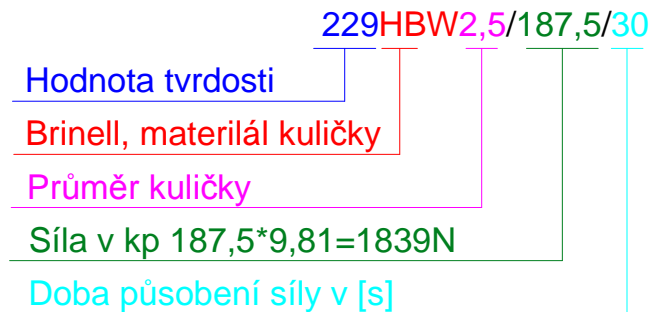
Provedení zkoušky:

Do povrchu zkoušeného materiálu se zatlačuje určitou silou F ocelová kalená kulička o průměru D . Po odlehčení se měří průměr vtisku d . Tvrдость podle Brinella je vyjádření poměrem zatížení F a plochy povrchu vtisku A . (kulový vrchlík o průměru D . [1]

$$HB = \frac{0,102 \cdot F}{A} = \frac{0,102 \cdot 2F}{\pi \cdot D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

Označování:

Tvrдость podle Brinella se označuje naměřenou hodnotou a při standardní síle a velikosti kuličky ještě písmeny HB: třetí písmeno označuje materiál kuličky, HBS označuje Brinellovu zkoušku s ocelovou kuličkou a HBW s kuličkou z tvrdokovu. Označení může dále obsahovat průměr kuličky (je-li odlišný od 10mm), zkušební sílu v kp (je-li odlišná od standardu 187,5kp nebo 30000N) a dobu působení zatížení. [2]



Obr. 26. Označení zkoušky podle Brinella. [2]

2.3.4 Martensova univerzální tvrďost (DIN EN ISO 14577) (modifikovaná metoda Vickers)

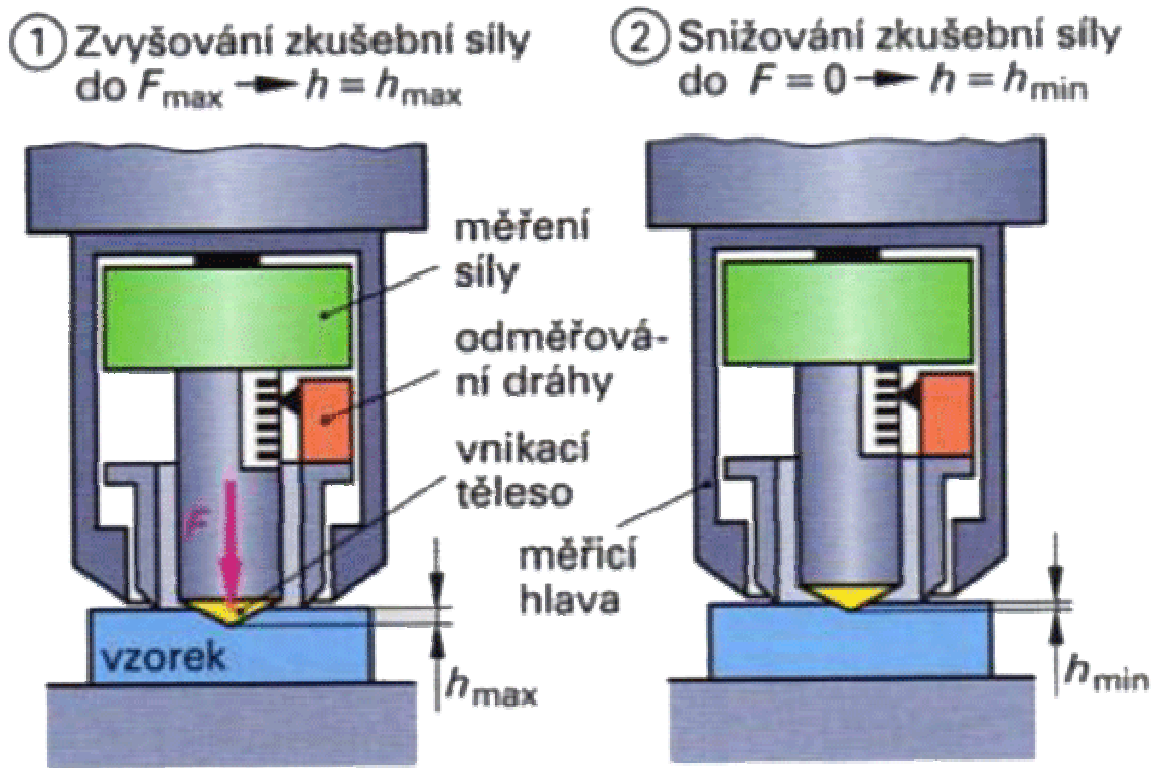
Přednosti Univerzálního měření tvrďosti jsou:

- Umožňuje měřit tvrďost všech materiálů od plastů až po tvrdokovy.
- Umožňuje posoudit elastické i plastické chování materiálů z poměru h_{\max}/h_{\min}
- Měření lze automatizovat

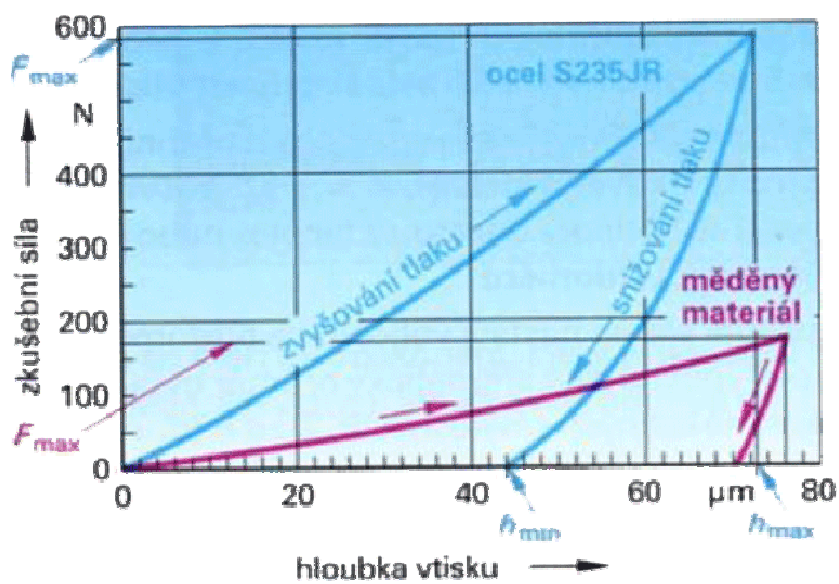
Provedení zkoušky:

Vnikající těleso diamantového jehlanu je vtlačováno plynule řízenou narůstající silou (0,5N až 2500N) za současného přesného odměření hloubky vtisku h a na obrazovce počítače tvrdoměru se zobrazí diagram závislosti zkušební síly na hloubce vtisku. Po dosažení nastaveného maxima se síla plynule zmenšuje, měří se opět hloubka vtlačení a zobrazuje se odpovídající křivka. Metoda je přizpůsobena možností moderních tvrdoměrů s velmi

přesným odměřováním a konstanta ve vzorci pro výpočet univerzální tvrdosti HU je stanovena tak, aby $HU \approx HV$.



Obr. 27. Univerzální zkouška tvrdosti. [2]



Graf. 2. Univerzální zkouška tvrdosti. [2]

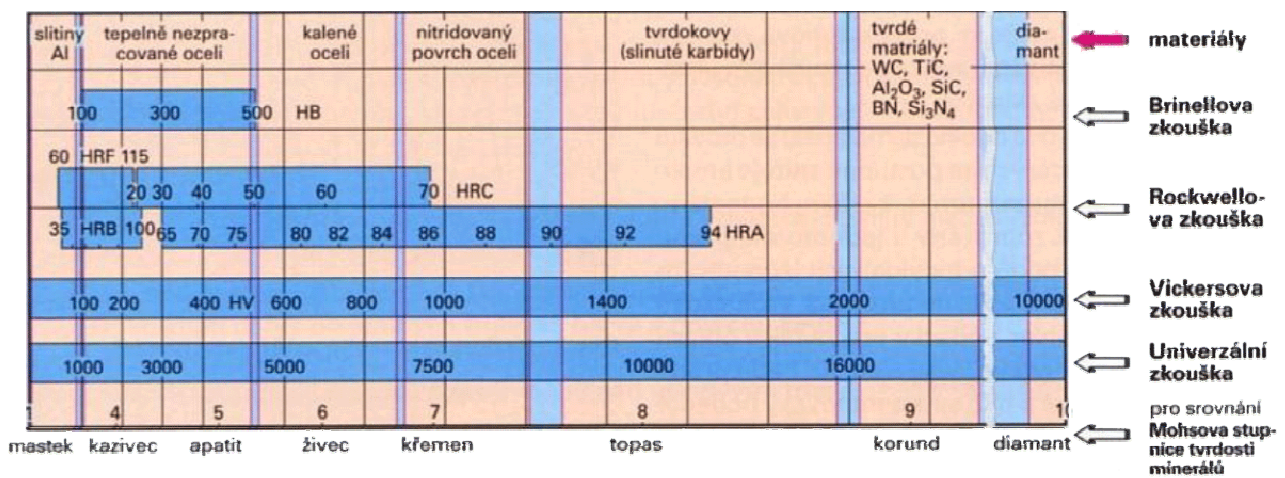
Značení:

Univerzální tvrdost se označuje HU, podmínkami a výsledkem měření.



Obr. 28. Označování univerzální zkoušky tvrdosti. [2]

Vhodnost jednotlivých metod měření je tvrdosti pro různé materiály je zřejmá z porovnání následujícího grafu. Z grafu je vidět omezené použití měření podle Brinella i podle Rockwella a univerzálnost měření tvrdosti podle Vickerse.



Obr. 29. Rozsah jednotlivých zkoušek tvrdosti. [2]

3 JAKOST POVRCHU

Jedním z nejdůležitějších úkolů technologie je zajištění požadované jakosti výrobku. Pod pojmem „jakost“ se původně rozuměla jen rozměrová přesnost. I když tato charakteristika výrobku je velmi důležitá, je pojem jakosti mnohem širší a zahrnuje v sobě nejen rozměrovou a geometrickou přesnost, ale i vlastnosti povrchové vrstvy a všechny změny, které v povrchové vrstvě nastávají. Jedná se o texturu povrchu, která se projevuje v drsnosti a vlnitosti a dále o změny, které nastávají po technologických operacích a směřují pod povrch materiálu. To jsou změny struktury, fázové přeměny, které jsou důsledkem mechanických a tepelných účinků na povrch součástí. Hodnocení těchto změn i směrem do materiálu, může být vyjádřeno hodnotami zbytkových napětí.

Funkční plocha dokončená některou technologickou operací má svou jakost, tj. rozměr, tvar a drsnost. Na každém povrchu je možné sledovat a vyhodnocovat průběh povrchových nerovností, tj. výšku jejich vrcholů a prohlubní, tvar nerovnosti nebo rozteče jednotlivých charakteristických bodů profilu. Všechny tyto údaje je možné zahrnout pod pojem „textura povrchu“.

3.1 Hodnocení textury povrchu:

Řešení otázek vlivu jakosti povrchu na funkci je v popředí zájmu konstruktérů i technologů. Znalost podmínek interakce ploch umožňuje totiž předem stanovit, jaké musí mít vlastnosti hodnocené plochy, aby byla zabezpečena jejich funkce.

Jednou z cest je dokonalé zvládnutí a optimalizace těch technologických operací, které se využívají pro dokončování funkčních ploch součástí.

To vede k tomu, že bude možné a nutné na základě provozních podmínek funkční plochy přesně a jasně specifikovat úchyly rozměru, tvaru, texturu povrchu, tj. její drsnost a vlnitost, zbytková napětí v povrchové vrstvě, a tak přispět ke splnění požadavků na zajištění spolehlivosti a životnosti vyráběných součástí.

Textura povrchu, tj. je jeho uspořádání z hlediska makro a mikrogeometrie představuje důležitý prvek, který určuje významné vlastnosti součástí. Textura povrchu zahrnuje drsnost, vlnitost i tvarovou úchytku sledovaného povrchu. Rozdíly mezi těmito charakteristikami textury jsou dány poměrem rozteče nerovností k jejich výšce. U drsnosti je to poměr 1-50, u vlnitosti je to poměr 50-1000, u tvarové úchytky povrchu je to hodnota nad 1000.

Z geometrického hlediska je velikost, tvar a vzájemné rozložení nerovnosti povrchu určen tvarem ostří řezného nástroje a podmínkami, které určují trajektorie pohybu ostří nástroje vzhledem k obrobenému povrchu.

3.2 Drsnost povrchu:

Drsnosti povrchu se nazývá část geometrických úchylek skutečného povrchu s poměrně malou vzdáleností sousedních nerovností. Na obrobeném povrchu jsou tyto nerovnosti stopami, které zanechává řezný nástroj, volné brusivo či jiskrový výboj.

Na neobrobených plochách zůstávají podle způsobu zpracování – otisk nerovností formy, průvlaků, okují a dalších jiných nečistot.

Vady povrchu způsobené náhodným poškozením materiálu (póry, lunkry, trhliny) se do drsnosti povrchu nezahrnují.

Drsnost povrchu významně ovlivňuje funkční vlastnosti ploch, a to jak ploch stykových, tvořících uložení nebo dosedajících na jinou plochu, tak i některých ploch volných. U stykových ploch závisí na drsnosti povrchu ztráty tření, odolnosti proti opotřebení a životnost součástí, jakost mazání, doba záběhu, pevnosti a tuhost jejich spojení aj.

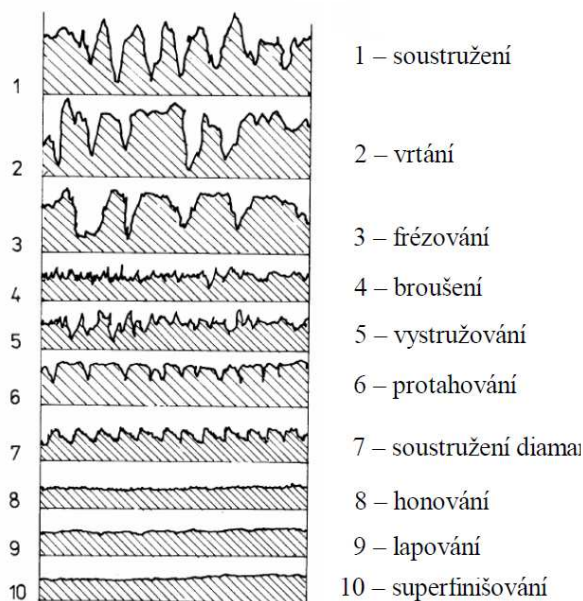
U volných ploch mohou na drsnosti povrchu záviset fyzikální a chemické děje při provozu strojů, jako únava materiálu, obtékání tekutinami, přestup tepla, odraz světla, koroze aj. Drsnost povrchu do jisté míry podmiňuje dosažení určité přesnosti rozměru a tvaru ploch a má nezanedbatelný vliv na výrobní náklady. Sledování, hodnocení a využívání mikrogeometrie povrchu pro zvyšování jakosti a efektivnosti strojních součástí je jedním ze základních úkolů, které si vynutil řešení problémů kvantitativního hodnocení vlastností funkčních ploch. Měření jakosti, zvláště pak měření drsnosti povrchu zaznamenalo výrazný pokrok. Rozvíjí se měřicí technika, zavádějí se nové parametry, nové normy.

Vzrostly požadavky na:

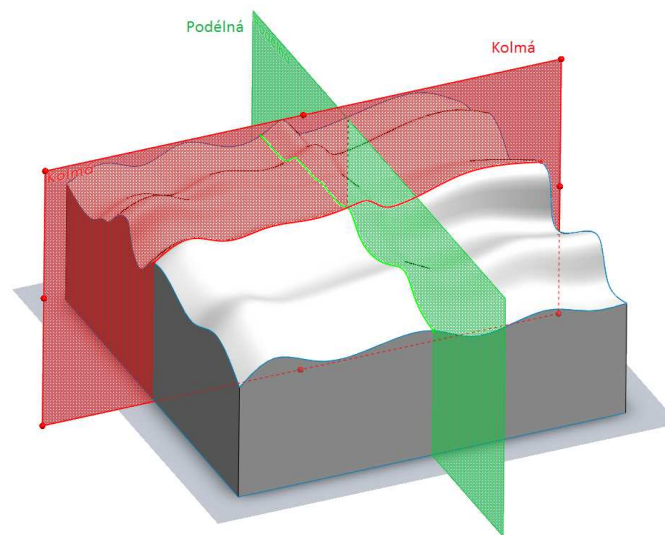
- hospodárnost měření;
- větší univerzálnost přístrojů;
- větší možnosti při měření;
- možnost vyjadřovat vliv geometrie povrchu na funkční vlastnosti.
- přesnější, spolehlivější měření a lepší ověřování přesnosti měření.

3.2.1 Posuzování drsnosti povrchu:

Drsnost povrchu nazýváme souhrn jemných nerovností (výstupků a prohlubní), které vznikají při každém zpracování materiálu. Na obrobeném povrchu to jsou nejčastěji poměrně pravidelně a směrově uspořádané stopy (rýhy) zanechávané řezným nástrojem. U některých způsobů obrábění, např. soustružení, frézování, hoblování není drsnost povrchu stejná ve všech směrech. Proto rozlišujeme drsnost příčnou, tj. drsnost ve směru kolmém na řezný pohyb a drsnost podélnou, tj. drsnost ve směru řezného pohybu.



Obr. 30. Jakost povrchu vibračních technologií



Obr. 31 Kolmá a podélná drsnost

Neobrobený povrch součásti nese některé typické stopy zpracování (stopy zanechané písek odlévací formy, drsnými stěnami zápustky, válců, průvlaků apod.).

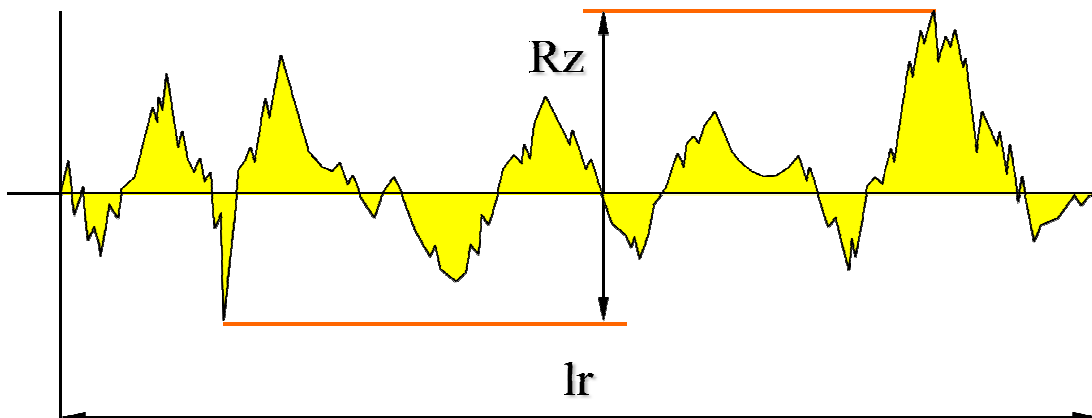
Kromě těchto nerovností vznikají zejména na obrobených plochách také rozsáhlejší, periodicky se opakující nerovnosti, které se překrývají s drsností a nazývají se vlnitostí povrchu.

Vlnitost povrchu obráběných ploch je způsobena příliš velkým nebo proměnným tlakem řezného nástroje, nedostatečnou tuhostí nosných částí obráběcího stroje, chvěním soustavy, stroj – nástroj – obrobek a vnitřním pnutím a deformacemi obrobku.

Stupeň drsnosti plochy se určuje buď, porovnáváním nebo změřením profilu, který vznikne vhodně vedeným rovinným řezem přístroji založenými na optických nebo elektrických principech. Při určování stupně drsnosti porovnáváním, srovnáváme obrobenou plochu s plochou, jejíž stupeň drsnosti známe nebo se speciálními vzorky, uspořádanými do vzorkovnice. Porovnává se buď přímo okem a hmatem nebo se použije mikroskopu.

Největší výška profilu R_z (μm)

je součet výšky Z_p nejvyššího výstupku profilu a hloubky Z_v nejnižší prohlubně profilu v rozsahu základní délky. [22]

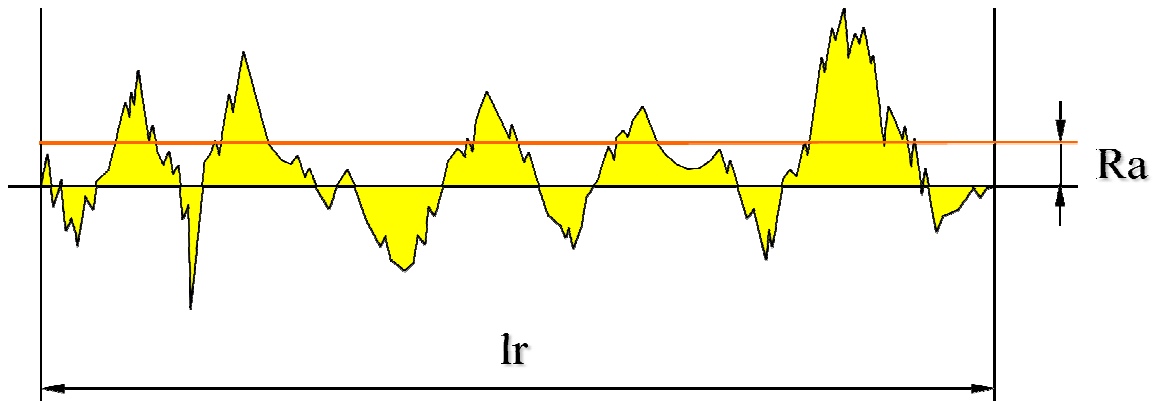


Obr. 32 Největší výška profilu R_z [22]

Průměrná aritmetická úchylna posuzovaného profilu R_a (μm)

je aritmetický průměr absolutních hodnot pořadnic $Z(x)$ v rozsahu základní délky. [22]

$$R_a = \frac{1}{l_r} \cdot \int_0^{l_r} |Z(x)| dx \quad (\mu\text{m}) \quad [22]$$

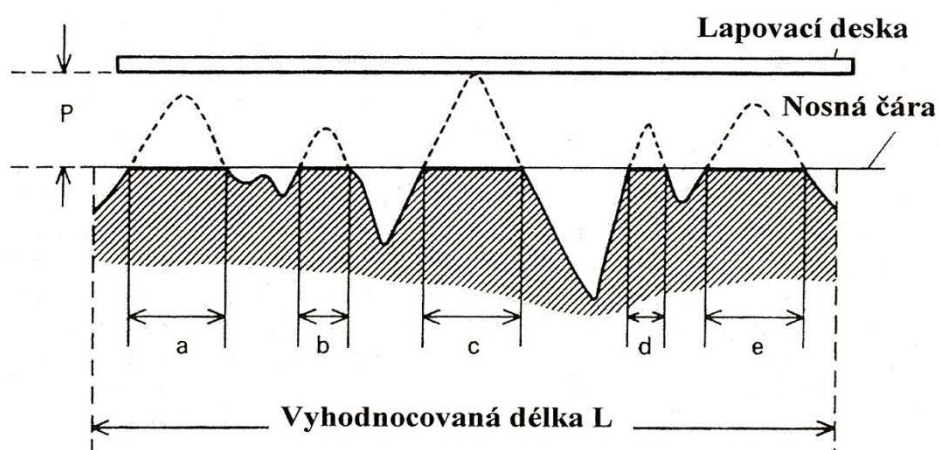


Obr. 33. Průměrná aritmetická úchylka profilu R_a [22]

Materiálový poměr R_{mr} (%)

Materiálový poměr označovaný symbolem R_{mr} je poměr délky nosné plochy v kterékoliv hloubce profilu k celkové délce profilu. Výsledkem naměřených hodnot v celém profilu je Abbot-Firestonova křivka, která umožňuje rozlišovat různé tvary profilu. [22]

$$R_{mr} = \frac{a+b+c+d+e}{L} \cdot 100\% \quad [22]$$



Obr. 34. Materiálový poměr R_{mr} [22]

3.2.2 Metody měření drsnosti povrchu:

Dotyková metoda

Dotyková metoda je pro hodnocení povrchu nejrozšířenější. Její výhodou je možnost převádět analogový záznam do digitální formy, a také proto, že naměřené hodnoty slouží jako vztažné a srovnávací hodnoty pro jiné metody měření. [18]

Výhodou této metody je její přesná reprodukovatelnost, tj. schopnost zobrazit měřený geometrický profil. Nicméně v důsledku tlaku na hrot snímače dochází k elastické (možná i plastické) deformaci v povrchové vrstvě. To závisí na tvrdosti povrchu. V některých případech může dojít k tomu, že hrot snímače poškodí měřený povrch, což je nevhodné nejen pro hodnocení povrchu, ale i pro přesný výsledek měření [19].

Nejčastěji používané přístroje pro vyhodnocení:

Profilograf – dotykový přístroj, u něhož je výsledkem měření grafický záznam profilu.

Profilometr – přístroj vyhodnocující automaticky některé z normalizovaných charakteristik drsnosti povrchu.

Profiloměr – jednak kombinovaný přístroj profilometr-profilograf a jednak obecně dotykový přístroj na měření drsnosti povrchu.

Bezdotyková metoda

Vhodnou alternativou měření povrchu dotykovými profilometry jsou optické metody. Jedná se o bezdotykové měření, čímž je vyloučeno poškození měřeného povrchu. Dotykový hrot je nahrazen světelným paprskem, který se odráží nebo rozptyluje na měřeném povrchu. Interakce mezi světelným paprskem a povrchem závisí na vlnové délce světla, drsnosti povrchu a vlastnostech měřeného tělesa. Hloubka vnikání světelného paprsku také ovlivňuje výsledek měření. Tato hloubka se mění podle součinitele absorpce materiálu. Intenzita v místě dopadu na povrch je poměr dopadajícího světla k jeho odrazu. U kovů jsou součinitele absorpce a odrazu obecně vysoké. Pro jiné materiály jsou naopak oba součinitele nízké tak, že velký podíl dopadajícího světla proniká do materiálu. Nicméně v případě vrstveného povrchu může dojít k vícenásobnému odrazu v různých hloubkách. Tato změna ovlivňuje optickou délku dráhy a tím i měření. [20]

Metoda světelného řezu

Ze zdroje světla procházejí paprsky zeleným filtrem a kondenzorem. Rovnoběžný svazek paprsků je omezen štěrbinou do tvaru velmi tenké světelné roviny a je promítán soustavou čoček objektivu pod úhlem 45° na měřený povrch. Průnikem světelné roviny nerovnostmi povrchu vznikne obraz profilu šikmého řezu nerovností plochy, který se pozoruje druhým mikroskopem se stejnými optickými vlastnostmi, jaké má osvětlovací mikroskop. Měřicí okulár má skleněnou destičku s nitkovým křížem a pomocnou stupnicí s milimetrovým dělením, orientovanou k nitkovému kříži pod úhlem 45° . Natáčením měřicího okuláru lze nastavit různou polohu nitkového kříže k proměřovanému profilu. Vzhledem k tomu, že hloubka ostroty mikroskopů je malá, zaostřuje se pouze jedna strana obrazu světelné štěrbinu a na tomto profilu se nitkovým křížem a mikrometrickým šroubem měřicího okuláru měří výšky nerovností povrchu. [20]

Interferenční metody měření drsnosti povrchu

Při měření drsnosti jemně obrobených povrchů, např. broušených, superfinišovaných, leštěných apod., jsou profily zjištěné i nejdokonalejšími profiloměry vždy do určité míry zkreslené technicky použitelným zaoblením měřících hrotů. V takových případech lze nejpřesněji měřit nerovnosti povrchu menší než $1 \mu\text{m}$ jen optickými interferenčními metodami. Nejmenší výška nerovností povrchu měřitelná optickými interferenčními metodami je omezena vlnovou délkou použitého monochromatického světla, charakterem nerovností měřeného povrchu, drsnosti a porovnávací plochy. Základní podmínkou pro interferenční měření je malá drsnost povrchu a jeho dostatečná odrazivost světelných paprsků. [21]

Použití plastických otisků pro měření drsnosti povrchu

Měření drsnosti povrchu dotykovými profiloměry i optickými měřicími metodami je často omezeno nebo znemožněno celou řadou důvodů, např. hmotností a rozměry součástí, nepřístupnosti ploch pro metody, které jsou k dispozici, obrobek je upnut na stroji a mají být na něm provedeny další operace atd. Byl proto hledán nepřímý způsob stanovení drsnosti povrchu strojních součástí prostřednictvím negativních otisků nerovností. Otisky reliéfů musí být: věrné až do zlomku mikrometru, dostatečně silné, aby se po oddělení od povrchu nedeformovaly, dostatečně tvrdé, aby měřící hrot alespoň při jednom měření nepoškodil jemnou strukturu otisknutých nerovností. [21]

3.3 Cíle praktické části:

Cílem praktické části je

- hodnotit vliv technologických podmínek na vlastnosti řezných ploch;
- hodnotit vliv různých materiálů a strukturální změny po obrábění plasmou;
- Vývoj zařízení a technologie obrábění materiálů plazmovým obloukem v laboratoři Ústavu Výrobního Inženýrství;
- hodnotit ekonomický přínos řešení.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 CHARAKTERISTIKA MĚŘENÝCH MATERIÁLŮ

Pro vyhodnocení výsledků obrábění plazmovým obloukem byly použity tři různé ocelové konstrukční materiály.

4.1 Chemické složení:

označení dle EN 10027-1	S235JR	P355NH	X2CrNi18-9
	(ČSN 11373)		(AISI 304L)
C	0,2	0,18	0,03
Mn	1,4	1,7	2
P	0,04	0,025	0,045
S	0,04	0,015	0,015
N	0,012	0,012	0,11
Si	-	0,5	1
Cr	-	0,3	19,5
Mo	-	0,08	-
V	-	0,1	-
Nb	-	0,05	-
Ti	-	0,03	-
Al	-	0,02	-
Cu	0,55	0,3	-
Ni	-	0,5	8-10,5
Rm	360-510	490-630	450-700
λ	50*[27]	50*[27]	22**[27]

Tab. 2. Chemické složení [23]

*při 20 °C; **při 30 °C

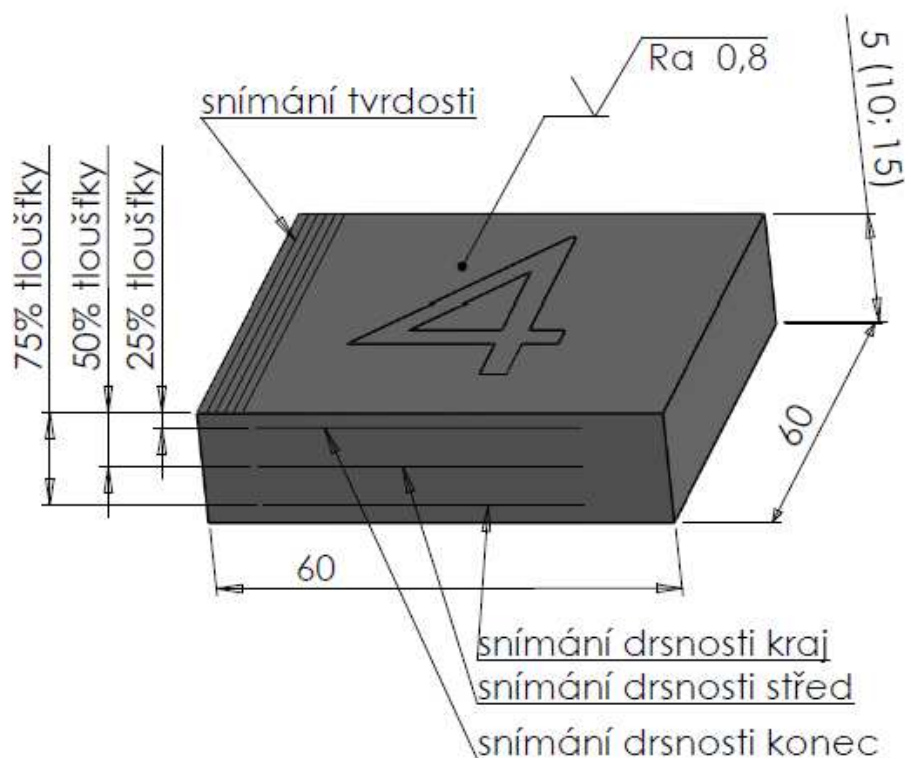
S235JR (ČSN 11373) – Jedná se o nelegovanou jakostní konstrukční ocel zejména vhodnou pro svařování obvykle používanými způsoby. Používá se pro součásti konstrukcí a strojů namáhané staticky i mírně dynamicky.

P355NH – Jedná se o jemnozrnnou normalizovanou svařitelnou ocel používanou na tepelně namáhané součásti. Použití: Kotle, výfukové potrubí.

X2CrNi18-9 (AISI 304L) – Jedná se o svařitelnou austenitickou nerezovou ocel s vynikající odolností proti korozi i v chemicky agresivních prostředí (kyselina dusičná). Tato ocel se zejména používá v chemickém, potravinářském a farmaceutickém průmyslu.

4.2 Schéma měření:

Na CNC řízeném plazmovém stroji byly vypáleny vzorky o rozměrech 60mm x 60 mm z různých tloušťek, různých materiálů při proměnné řezné rychlosti.



Obr. 35. Schéma měření

4.3 Zařízení pro plazmové obrábění:

K plazmovému obrábění byl použit stroj českého výrobce z Tábora MGM OMNICUT 4000 o výkonu 2,5kVA. Konstrukce stroje je opatřena přesně opracovaným lineárním vedením s broušenými tyčemi a broušenými ozubenými hřebeny v bez mazném provedení. Portál jezdí po robustní a přesně opracované dráze a jeho pojezd zaručují výkonné servomotory na obou stranách portálu. Rozchod kolejí je 4000mm a pracovní šířka je 3000mm.

Délka pracovní plochy stroje je 12000mm. Přístroj je osazen strojní plasmou Kjellberg Hi-Focus 360i, která umožňuje řezat plechy v rozsahu 0,5-40mm tloušťky. Řezná proud je plynule nastavitelný od 20-360A. Přístroj dokáže i plasmou značit v rozsahu proudu 4-25A. Doporučené plyny: vzduch, dusík (N_2), kyslík (O_2), argon (Ar), vodík (H_2), fluor (F_5). Elektroda se používá wolframová. [25]



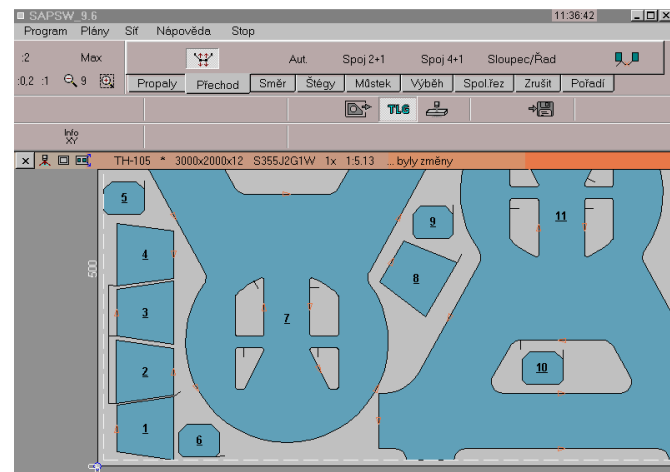
Obr. 36. MGM OMNICUT 4000 – plasma



Obr. 37. Kjellberg HiFocus 360i



Obr. 38. Složení plasmové hlavy



Obr. 39. Software SAPSproW [26]

Programovací pracoviště řezného stroje:

SAPSproW je programovací systém pro programování CNC-pálících strojů. SAPSproW je vytvořen pro aktuálně používané operační systémy MS Windows a je možné jej provozovat jako samostatný program, popř. je možná komunikace a výměna dat mezi jednotlivými programy SAPSproW po síti v MS Windows. Program SAPSproW se skládá z následujících základních modulů:

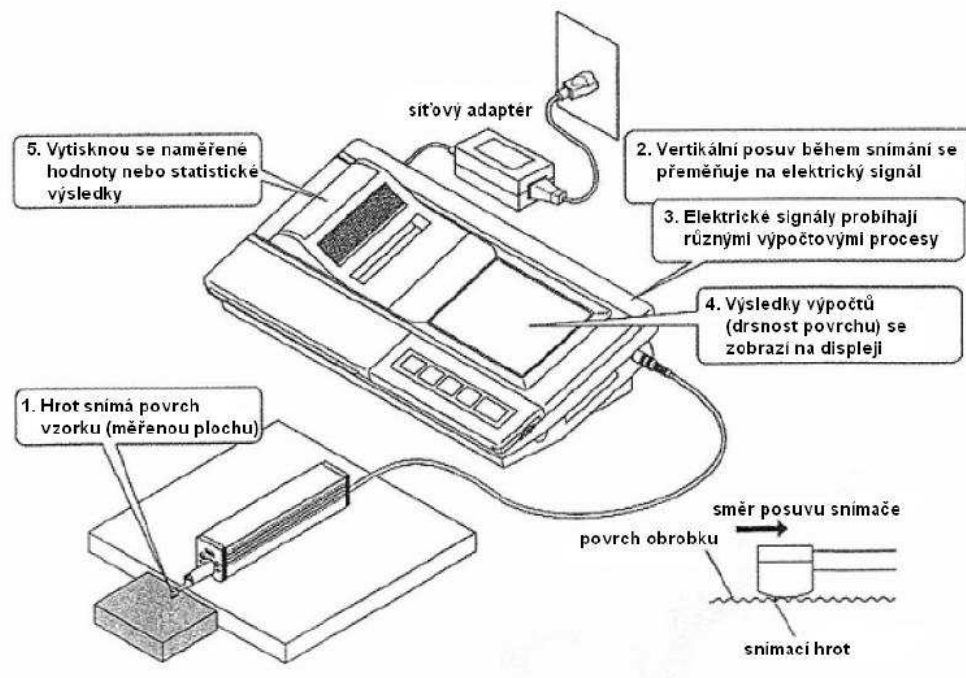
- SCADW pro konstrukci dílů;
- SAPSW pro tvorbu pálicích plánů;
- Databanka pro obsluhu systému a správu uživatelských dat;
- Viewer pro náhled dílů, NC-programů a automatizaci systému;
- Kalkulační program např. pro výpočet čisté hmotnosti vypálených dílů s výpočtem odpadního materiálu, délky a doby pálení a ceny řezu. [25]

4.4 Zařízení pro vyhodnocení výsledků:

4.4.1 Měření drsnosti:

Měření drsnosti povrchu na jednotlivých vzorcích bylo prováděno na přístroji MITUTOYO SJ-301 v laboratoři Ústavu Výrobního Inženýrství ve Zlíně. MITUTOYO SJ-301 je přístroj na měření drsnosti povrchu pro použití v dílenském prostředí. Snímací hrot přístroje SJ-301 zaznamenává i nejjemnější nepravidelnosti povrchu vzorku. Drsnost povrchu se vypočítá z vertikálního posuvu snímacího hrotu, ke kterému dochází, když snímací hrot přejíždí přes nepravidelnosti povrchu. Výsledky měření se zobrazí digitálně a graficky na speciální na dotek citlivé ovládací obrazovce a pomocí vestavěné tiskárny se může, vytisknou. [24]

Pro všechny vzorky byly naměřené hodnoty vyhodnocovány v softwaru pro analýzu dat – Minitab 16.



Obr. 40. Schéma snímání jakosti povrchu

Použité vzorce:

Aritmetický průměr:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

Směrodatná odchylka:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{x=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

Variační koeficient:

$$V_x = \frac{S}{\bar{x}}$$

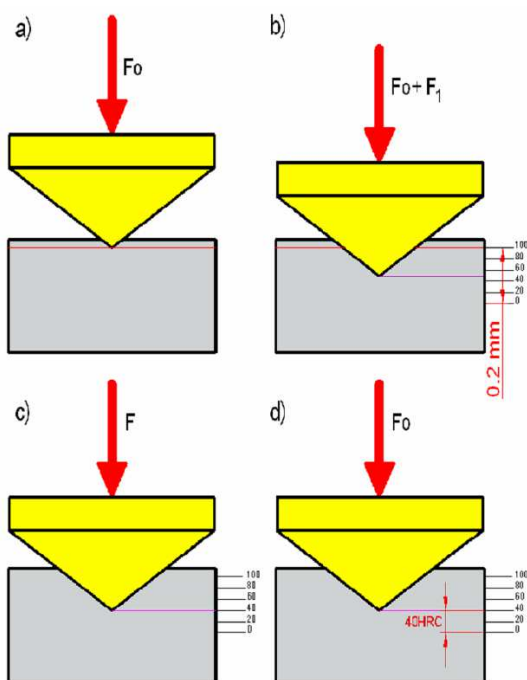
4.4.2 Měření tvrdosti:

Měření tvrdosti povrchu na jednotlivých vzorcích bylo prováděno na přístroji univerzálním tvrdoměru Affri v laboratoři Ústavu Výrobního Inženýrství ve Zlíně.

Vypálené vzorky byly před měřením tvrdosti opracovány frézováním a broušením, aby zkoumaný povrch byl co nejvíce rovnoběžný a hladký.

Postup měření:

Zvolená metoda Rockwella – HRA používá diamantový indentor ve tvaru kužele s vrcholovým úhlem 120° a poměrem zakřivení špičky $r=2\text{mm}$. Na měřicím zařízení se nastavila daná stupnice dané metody a na podložku pod indentor se umístil zkoušený vzorek. Na vzorek nejprve působilo předběžné zatížení F_0 . Předběžné zatížení se používá z důvodu odstranění nerovností a rozdílné kvality povrchu. Po určité době začala působit přídavná síla F_1 . Velikost zatěžujících sil je součet předběžného a přídavného zatížení ($F=F_0+F_1$). Velikost zatěžujících sil závisí od použité metody. Tvrdost daného vzorku získáme tak, že od hloubky indentoru při předběžném zatížení vyneseme stupnici se sto dílky do hloubky 0,2mm. Výsledná tvrdost se stanovuje z trvalé hloubky vtlačení, která je způsobená zatěžující silou. Tvrdost je rozdíl hloubky předběžného zatížení před působení přídavného zatížení a po ukončení působení přídavného zatížení.



Obr. 41. Postup měření tvrdosti



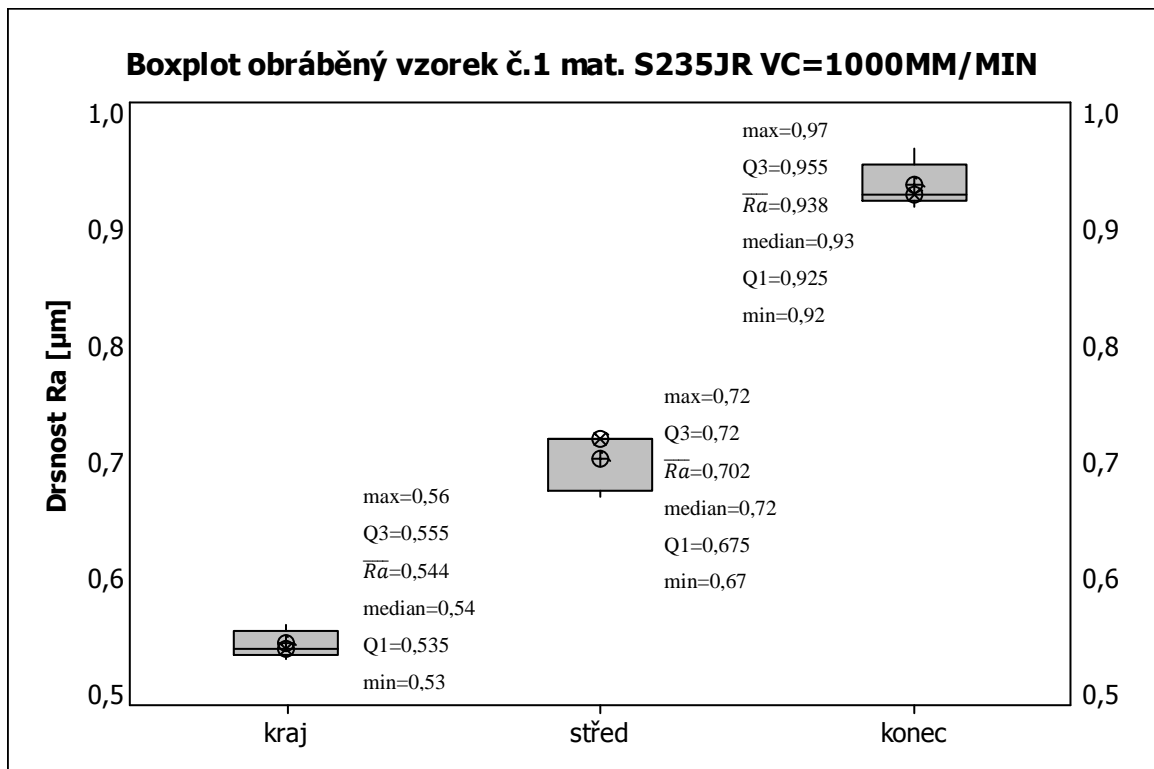
Obr. 42. Měření tvrdosti HRA

5 MĚŘENÍ:

5.1 Naměřené hodnoty tl. Plechu 5mm:

mat. S235JR												Vc= 1000 mm/min	
Vzorek č. 1	Místo	Ra [μm]	\bar{Ra} [μm]	s [μm]	v [%]	rz [μm]	\bar{Rz} [μm]	s [μm]	v [%]	rmr [%]	\bar{rmr} [%]	s [μm]	
	kraj		0,55	0,54	0,010	1,875	3,87	3,76	0,089	2,367	57,00	50,8	4,069
		0,56	3,85				46,00						
		0,54	3,69				48,00						
		0,54	3,75				54,00						
		0,53	3,64				49,00						
střed		0,72	0,70	0,022	3,173	4,40	4,50	0,159	3,544	48,00	42,4	5,083	
		0,67				4,74				42,00			
		0,68				4,64				33,00			
		0,72				4,34				44,00			
		0,72				4,38				45,00			
konec		0,97	0,94	0,017	1,834	7,14	7,00	0,190	2,721	41,00	45,4	3,720	
		0,94				7,30				41,00			
		0,93				6,91				47,00			
		0,93				6,86				48,00			
		0,92				6,79				50,00			

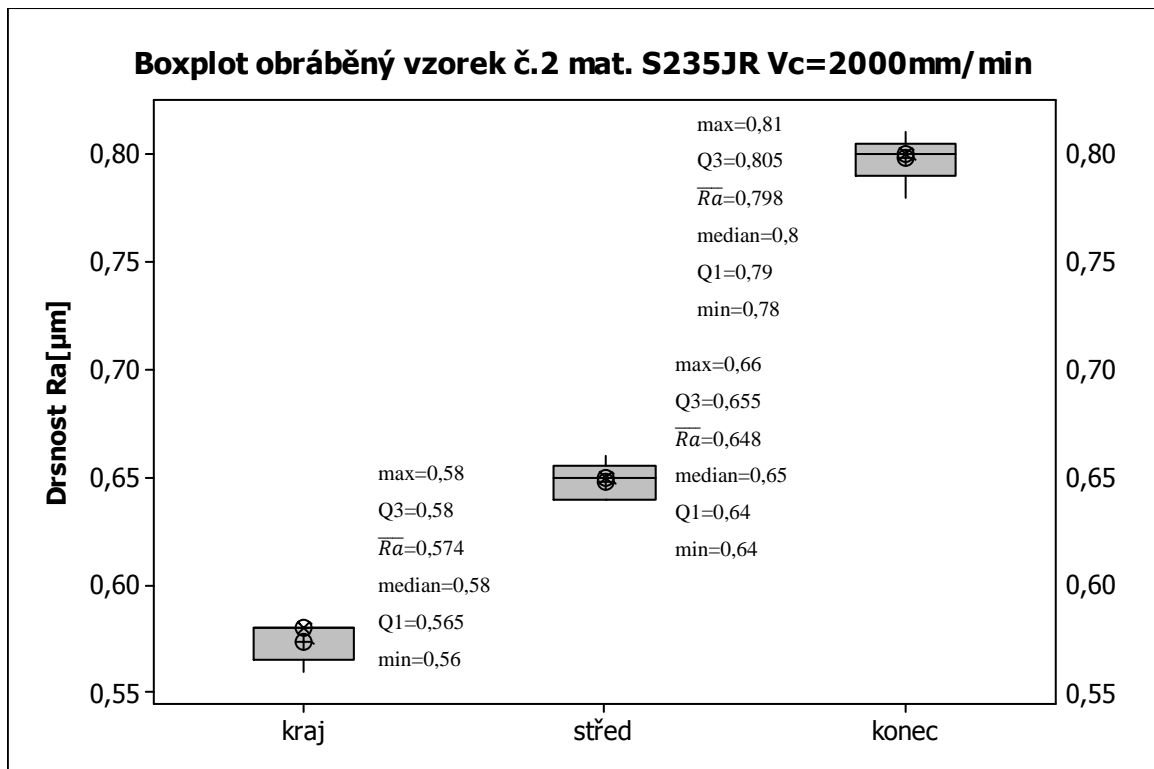
Tab. 3. Naměřené hodnoty jakosti povrchu vzorku č. 1



Graf. 3. Jakost povrchu (boxplot) vzorek č. 1

mat. S235JR												Vc= 2000 m/min		
Vzorek č. 2	Místo	Ra [μm]	\bar{Ra} [μm]	s [μm]	v [%]	rz [μm]	\bar{Rz} [μm]	s [μm]	v [%]	rmr [%]	\bar{rmr} [%]	s [μm]		
	kraj	0,56	0,57	0,008	1,3937	3,41	3,542	0,094	2,645	25,00	33,200	8,232		
		0,57				3,45				49,00				
		0,58				3,59				32,00				
		0,58				3,64				30,00				
		0,58				3,62				30,00				
	střed	0,64	0,65	0,007	1,1548	4,54	4,206	0,226	5,368	42,00	60,400	10,052		
		0,66				4,41				61,00				
		0,65				4,04				72,00				
		0,65				4,07				66,00				
		0,64				3,97				61,00				
	konec	0,81	0,80	0,010	1,2278	5,43	5,604	0,184	3,276	80,00	81,200	13,197		
		0,80				5,66				90,00				
		0,80				5,56				89,00				
		0,80				5,93				56,00				
0,78		5,44				91,00								

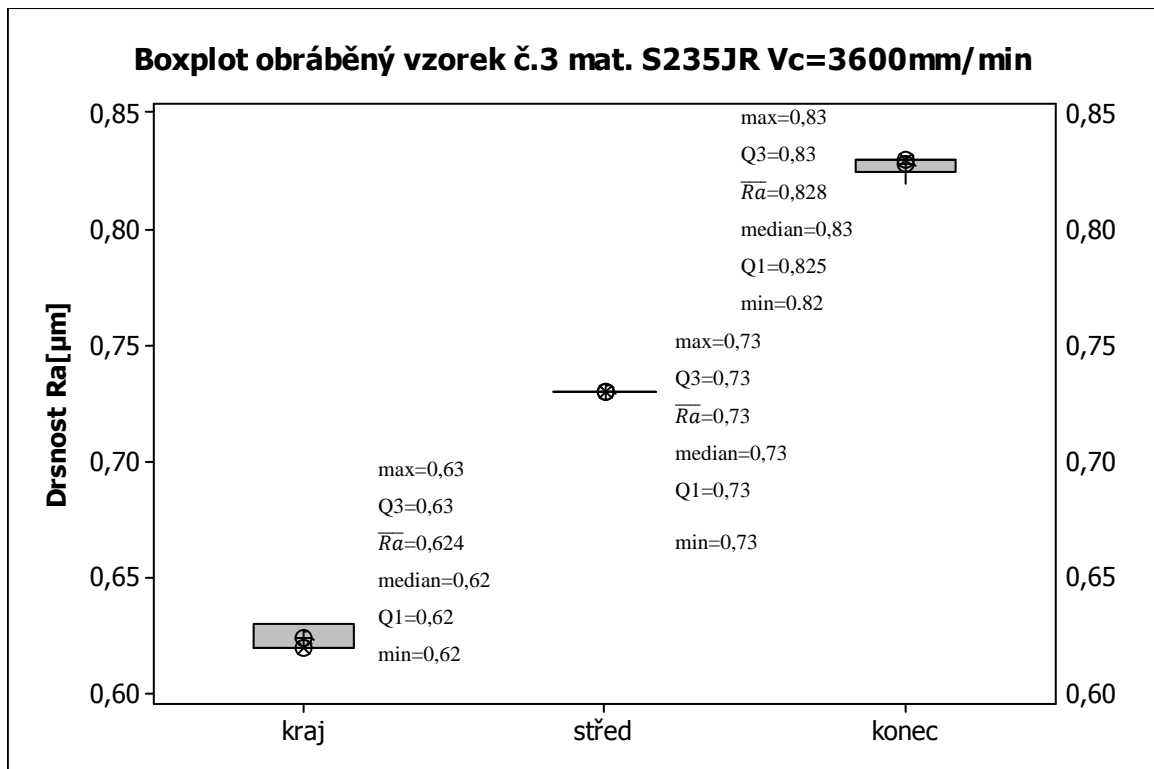
Tab. 4. Naměřené hodnoty jakosti povrchu vzorku č. 2



Graf. 4. Jakost povrchu (boxplot) vzorek č. 2

mat. S235JR												Vc= 3600 m/min	
Vzorek č. 3	Místo	Ra [μm]	\bar{Ra} [μm]	s [μm]	v [%]	rz [μm]	\bar{Rz} [μm]	s [μm]	v [%]	rmr [%]	\bar{rmr} [%]	s [μm]	
	kraj	0,63	0,62	0,005	0,7851	4,40	4,022	0,208	5,181	38,00	54,000	11,261	
		0,63				3,99				49,00			
		0,62				3,87				52,00			
		0,62				3,80				59,00			
		0,62				4,05				72,00			
	střed	0,73	0,73	0,000	0,0000	4,59	4,344	0,123	2,840	45,00	46,800	2,135	
		0,73				4,28				44,00			
		0,73				4,27				47,00			
		0,73				4,28				50,00			
		0,73				4,30				48,00			
	konec	0,82	0,83	0,004	0,4831	4,84	5,038	0,133	2,631	61,00	66,400	3,382	
0,83		4,94				68,00							
0,83		5,07				64,00							
0,83		5,13				69,00							
0,83		5,21				70,00							

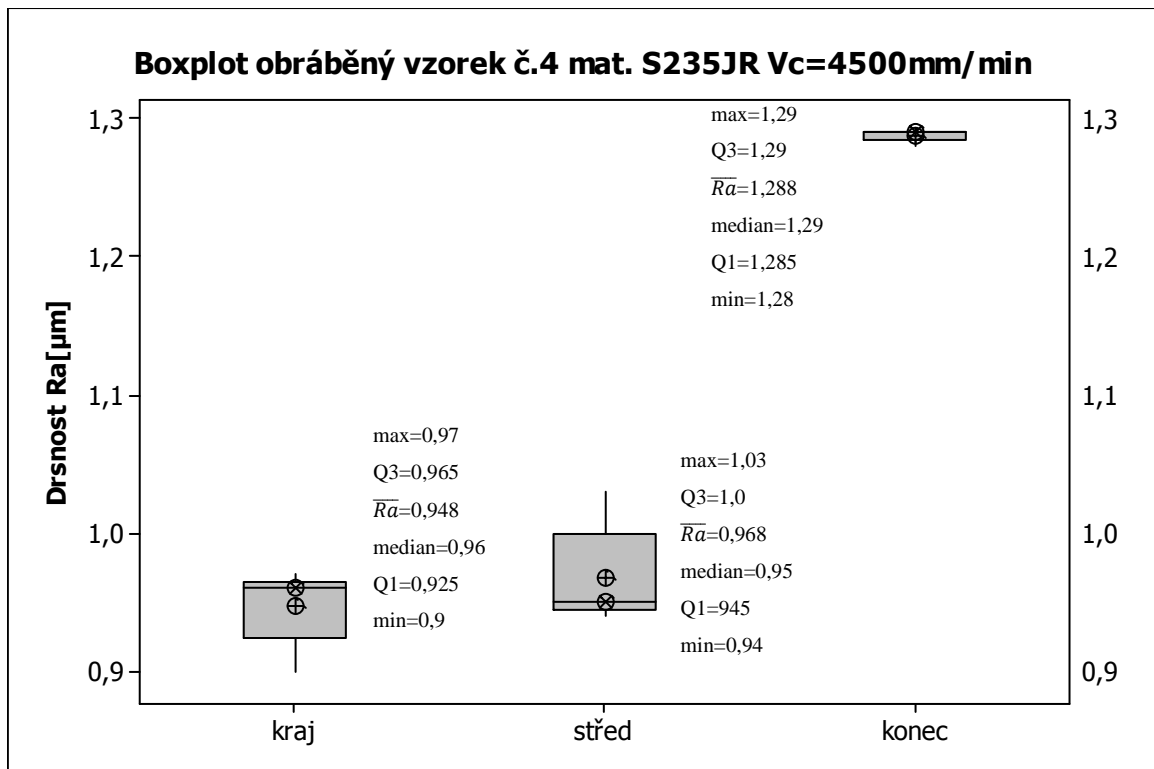
Tab. 5. Naměřené hodnoty jakosti povrchu vzorku č. 3



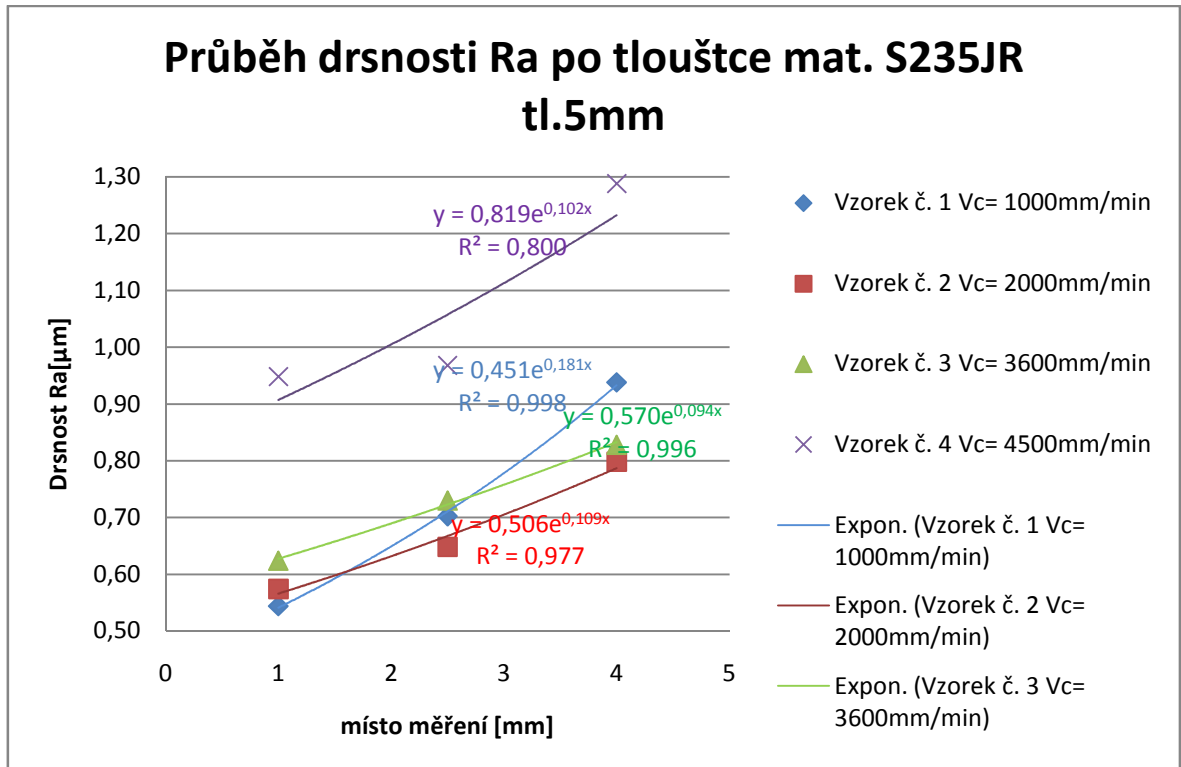
Graf. 5. Jakost povrchu (boxplot) vzorek č. 3

		mat. S235JR					Vc= 4500 m/min					
Vzorek č. 4	Místo	Ra [μm]	\bar{Ra} [μm]	s [μm]	v [%]	rz [μm]	\bar{Rz} [μm]	s [μm]	v [%]	rmr [%]	\bar{rmr} [%]	s [μm]
	kraj	0,95	0,95	0,025	2,6181	4,99	5,068	0,202	3,994	23,00	28,200	6,112
		0,96				5,22				20,00		
		0,90				4,71				37,00		
		0,96				5,15				29,00		
		0,97				5,27				32,00		
	střed	1,03	0,97	0,032	3,3570	4,84	4,878	0,229	4,692	28,00	26,200	3,655
		0,94				5,09				29,00		
		0,95				4,64				27,00		
		0,95				4,63				28,00		
		0,97				5,19				19,00		
	konec	1,29	1,29	0,004	0,3106	5,82	5,692	0,109	1,919	32,00	31,600	1,960
		1,29				5,76				34,00		
1,29		5,72				32,00						
1,29		5,50				32,00						
1,28		5,66				28,00						

Tab. 6. Naměřené hodnoty jakosti povrchu vzorku č. 4



Graf. 6. Jakost povrchu (boxplot) vzorek č. 4

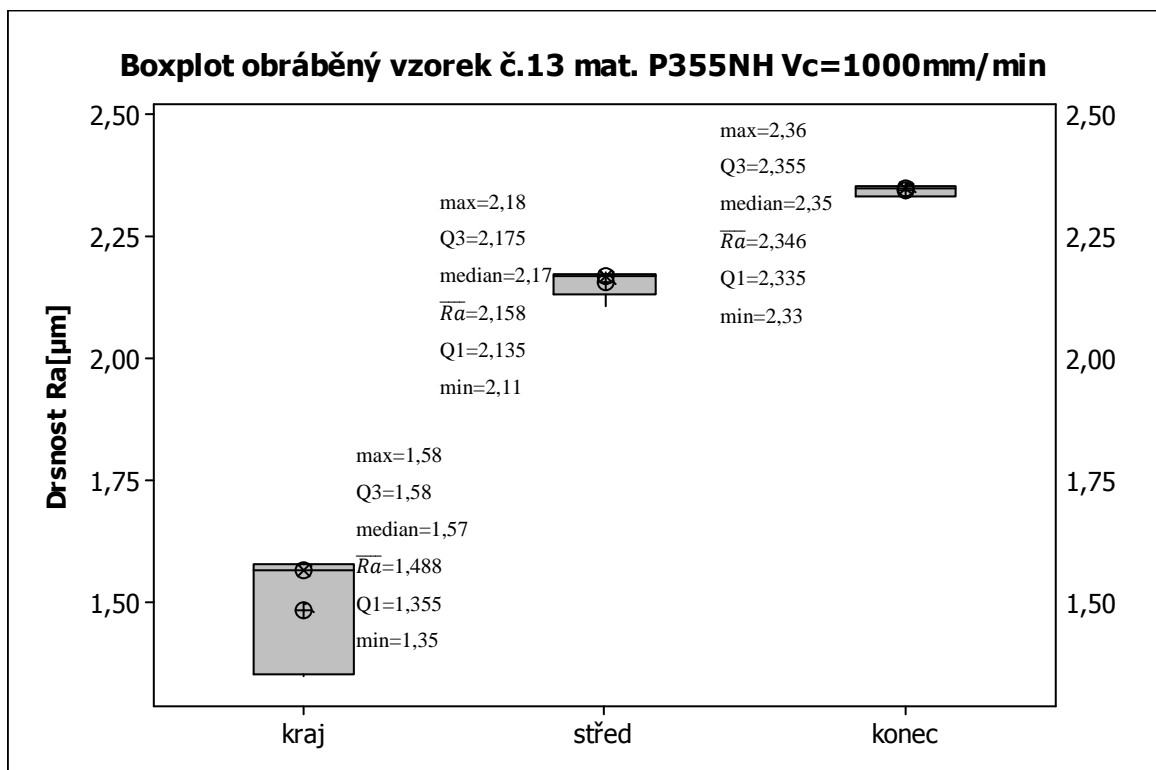


Graf. 7. Trend drsnosti Ra po tloušťce mat. S235JR tl. 5mm

Graf trendu průběhu drsnosti po tloušťce materiálu ukazuje, že se drsnost po tloušťce postupně zvyšuje. Nejvyšší drsnost R_a byla naměřena při řezné rychlosti 4500mm/m. Nejvhodnější řezná rychlost pro obrábění se jeví 3600mm/min, protože má nejmenší rozpětí drsnosti při větší produktivitě vykonané práce (vyšší řezné rychlosti).

mat. P355NH												Vc= 1000 m/min	
Vzorek č. 13	Místo	Ra [μm]	\bar{Ra} [μm]	s [μm]	v [%]	rz [μm]	\bar{Rz} [μm]	s [μm]	v [%]	rmr [%]	\bar{rmr} [%]	s [μm]	
	kraj	1,58	1,49	0,109	7,3052	10,24	10,048	0,270	2,685	83	85,200	3,919	
		1,57				10,23				84			
		1,58				10,32				83			
		1,35				9,65				93			
		1,36				9,80				83			
	střed	2,11	2,16	0,025	1,1501	15,56	16,248	0,355	2,185	91,00	93,400	1,200	
		2,16				16,36				94,00			
		2,17				16,37				94,00			
		2,17				16,36				94,00			
		2,18				16,59				94,00			
	konec	2,35	2,35	0,010	0,4347	18,75	19,002	0,132	0,694	85,00	86,600	0,800	
		2,33				19,01				87,00			
2,34		19,05				87,00							
2,35		19,13				87,00							
2,36		19,07				87,00							

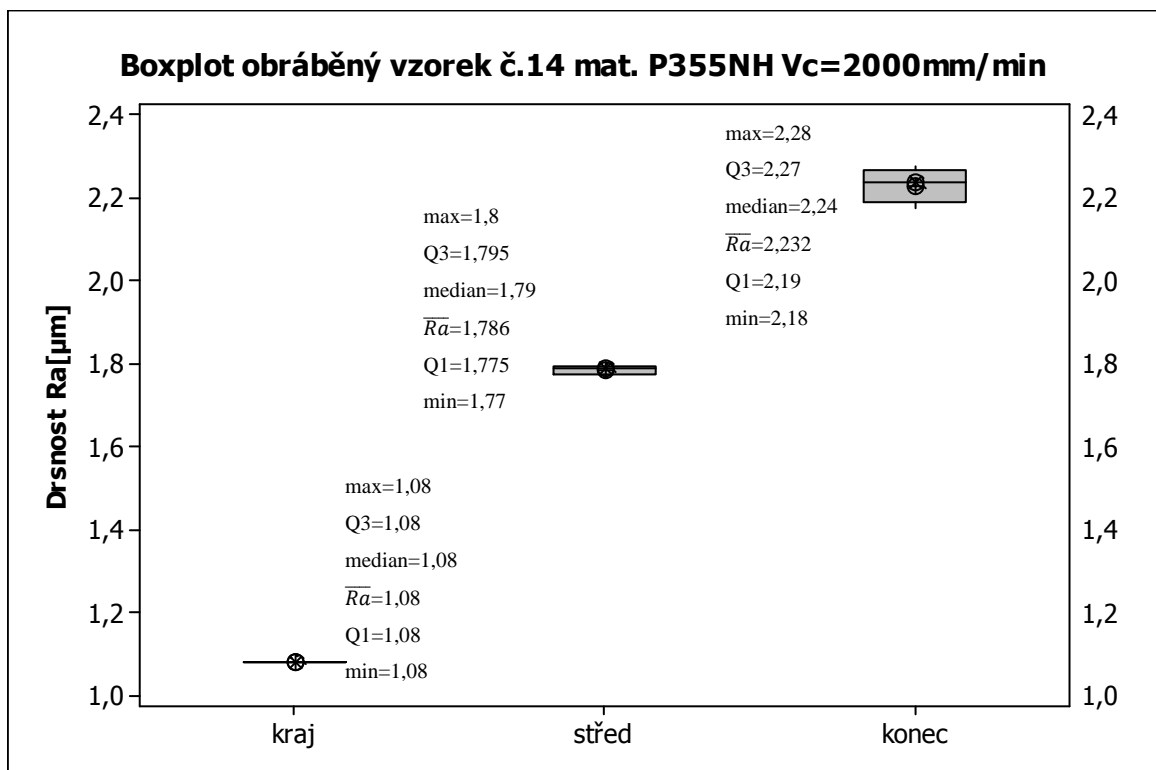
Tab. 7. Naměřené hodnoty jakosti povrchu vzorku č. 13



Graf. 8. Jakost povrchu (boxplot) vzorek č. 13

mat. P355NH												Vc= 2000 m/min	
Vzorek č. 14	Místo	Ra [μm]	\bar{Ra} [μm]	s [μm]	v [%]	rz [μm]	\bar{Rz} [μm]	s [μm]	v [%]	rmr [%]	\bar{rmr} [%]	s [μm]	
	kraj	1,08	1,08	0,000	0,0000	6,43	6,622	0,097	1,459	75,00	79,200	2,227	
		1,08				6,67				79,00			
		1,08				6,69				81,00			
		1,08				6,66				81,00			
		1,08				6,66				80,00			
	střed	1,77	1,79	0,010	0,5710	14,73	14,790	0,044	0,296	65,00	63,600	1,200	
		1,78				14,77				63,00			
		1,80				14,83				63,00			
		1,79				14,77				62,00			
		1,79				14,85				65,00			
	konec	2,28	2,23	0,037	1,6619	16,21	15,772	0,440	2,792	78,00	78,000	0,632	
		2,26				16,25				79,00			
2,24		15,81				78,00							
2,20		15,51				78,00							
2,18		15,08				77,00							

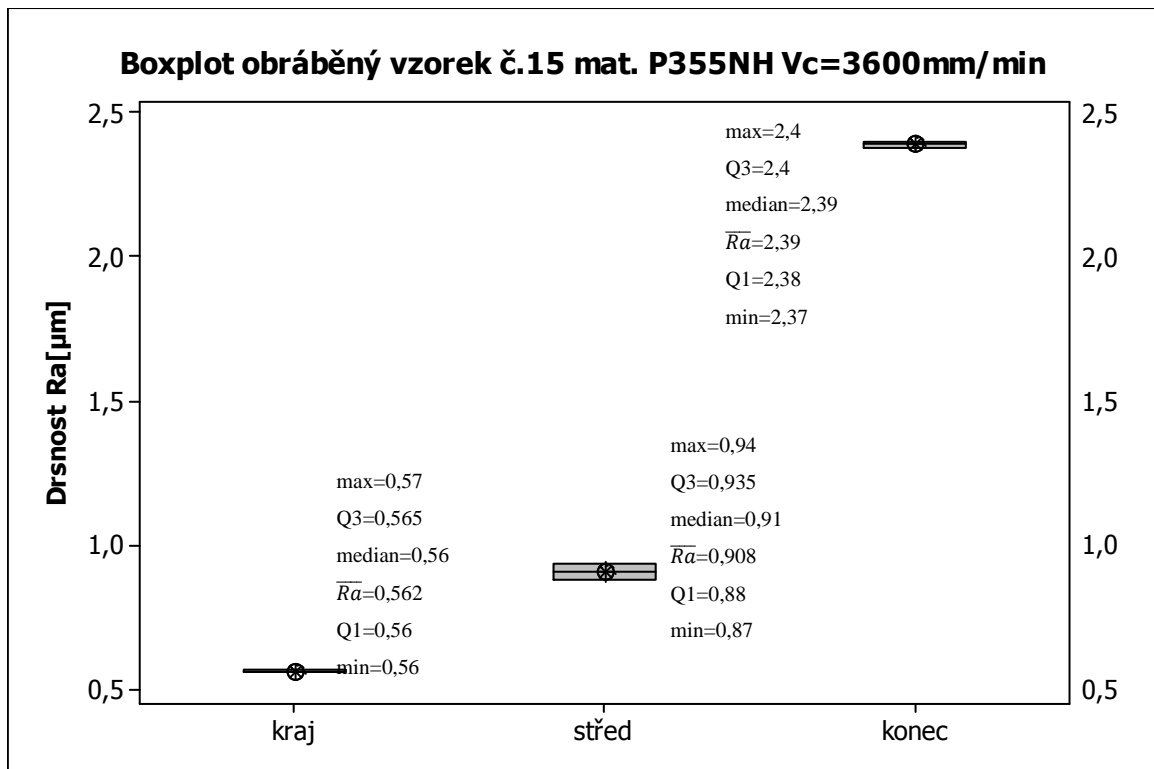
Tab. 8. Naměřené hodnoty jakosti povrchu vzorku č. 14



Graf. 9. Jakost povrchu (boxplot) vzorek č. 14

mat. P355NH												
Vc= 3600 m/min												
Vzorek č. 15	Místo	Ra [μm]	\bar{Ra} [μm]	s [μm]	v [%]	rz [μm]	\bar{Rz} [μm]	s [μm]	v [%]	rmr [%]	\bar{rmr} [%]	s [μm]
	kraj	0,57	0,56	0,004	0,7117	4,08	3,962	0,073	1,844	61,00	66,400	2,800
		0,56				4,01				68,00		
		0,56				3,93				67,00		
		0,56				3,91				67,00		
		0,56				3,88				69,00		
	střed	0,87	0,91	0,026	2,8208	7,99	8,120	0,201	2,475	77,00	87,200	5,492
		0,89				8,31				86,00		
		0,91				7,87				90,00		
		0,93				8,40				91,00		
		0,94				8,03				92,00		
	konec	2,40	2,39	0,011	0,4583	18,73	18,670	0,270	1,447	32,00	34,400	1,200
2,37		18,49				35,00						
2,39		19,15				35,00						
2,40		18,36				35,00						
2,39		18,62				35,00						

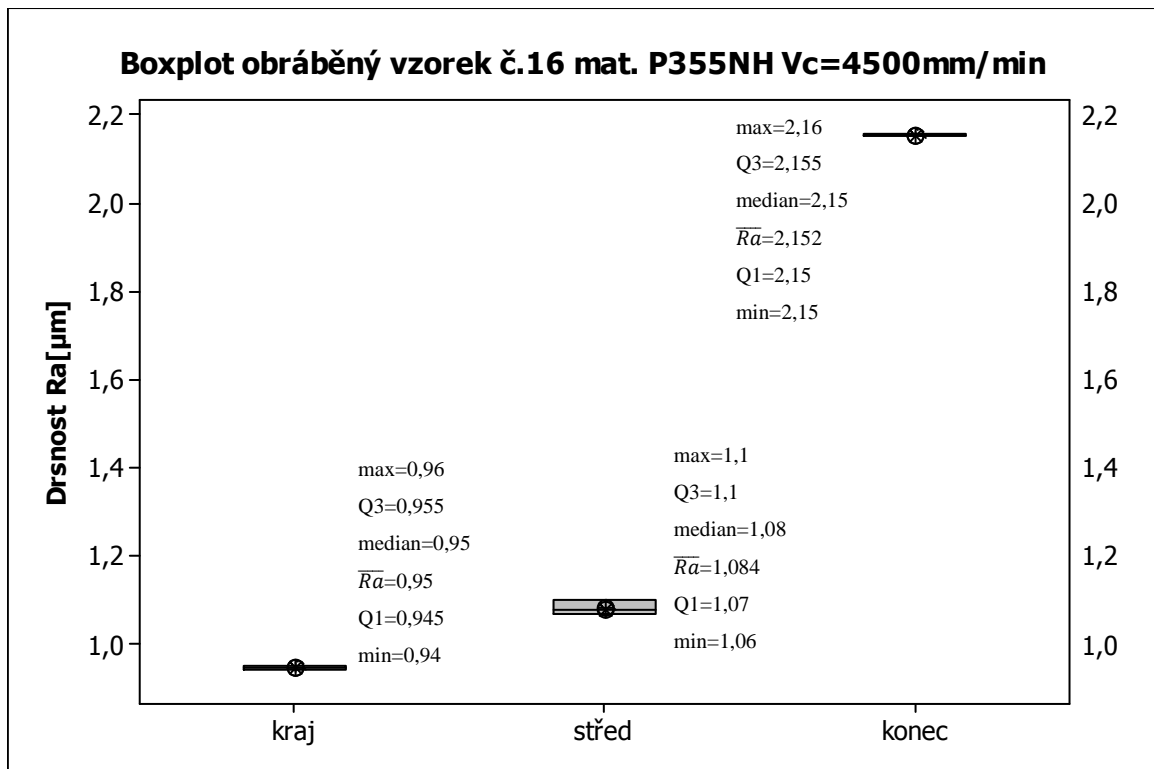
Tab. 9. Naměřené hodnoty jakosti povrchu vzorku č. 15



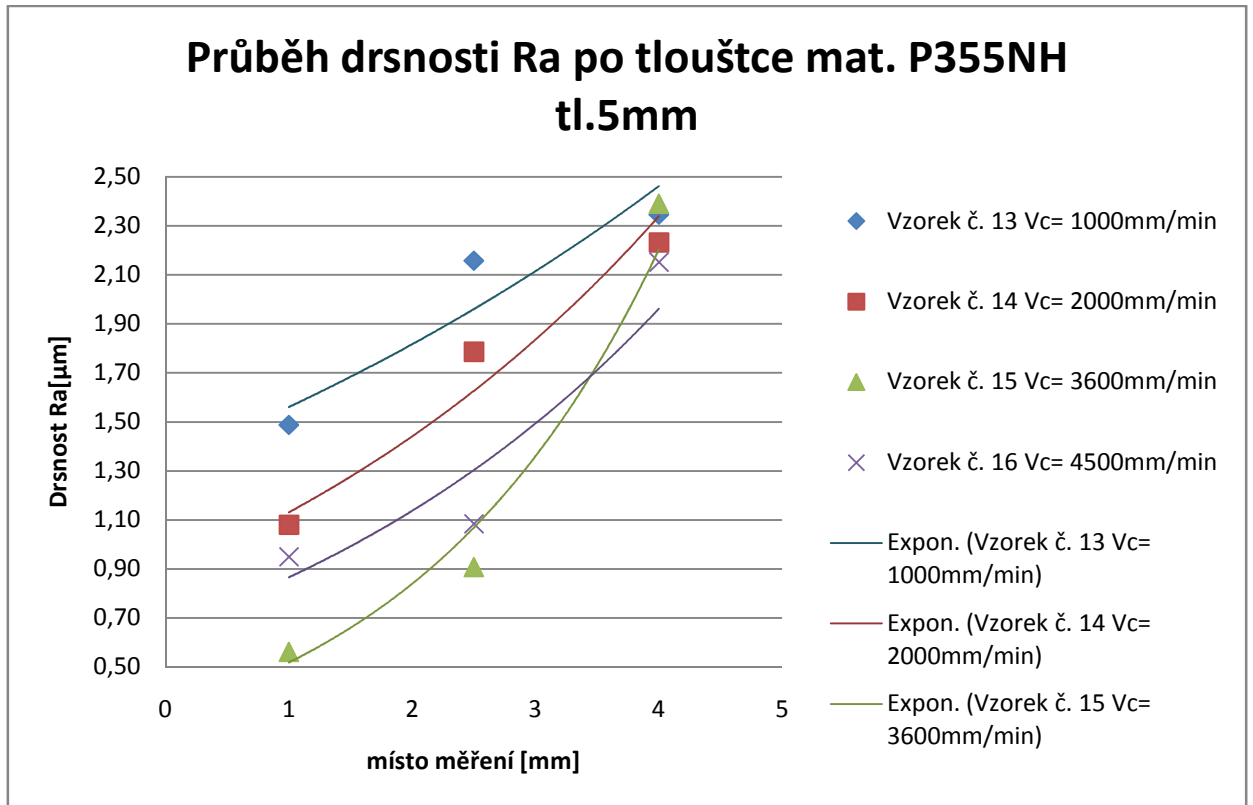
Graf. 10. Jakost povrchu (boxplot) vzorek č. 15

		mat. P355NH					Vc= 4500 m/min					
Vzorek č. 16	Místo	Ra [μm]	\bar{Ra} [μm]	s [μm]	v [%]	rz [μm]	\bar{Rz} [μm]	s [μm]	v [%]	rmr [%]	\bar{rmr} [%]	s [μm]
	kraj	0,96	0,95	0,006	0,6657	8,30	7,750	0,319	4,115	92,00	93,000	1,095
		0,94				7,86				95,00		
		0,95				7,71				92,00		
		0,95				7,43				93,00		
		0,95				7,45				93,00		
	střed	1,06	1,08	0,015	1,3807	8,94	8,920	0,106	1,189	60,00	57,200	1,939
		1,08				8,75				56,00		
		1,08				9,00				59,00		
		1,10				8,86				56,00		
		1,10				9,05				55,00		
	konec	2,15	2,15	0,004	0,1859	15,99	16,262	0,182	1,118	52,00	51,000	2,449
		2,16				16,25				55,00		
		2,15				16,15				49,00		
		2,15				16,45				51,00		
2,15		16,47				48,00						

Tab. 10. Naměřené hodnoty jakosti povrchu vzorku č. 16



Graf. 11. Jakost povrchu (boxplot) vzorek č. 16

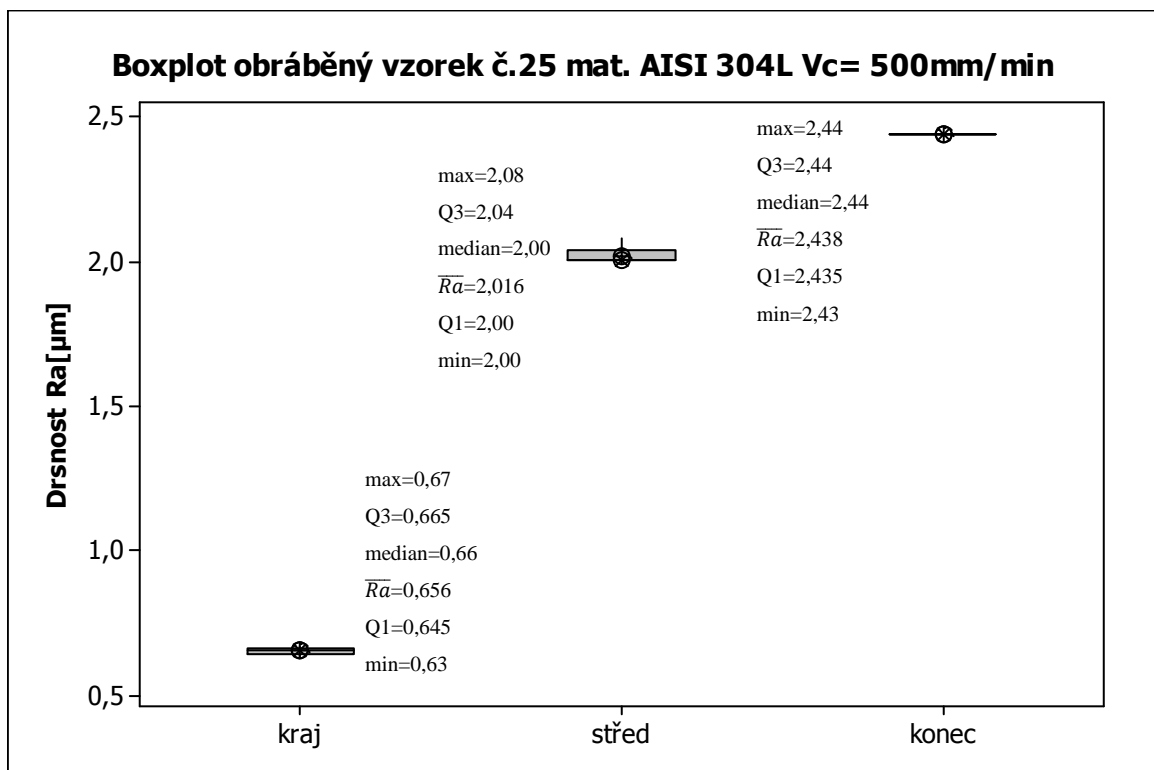


Graf. 12. Trend drsnosti Ra po tloušťce mat. P355NH tl. 5mm

Graf trendu průběhu drsnosti po tloušťce materiálu ukazuje, že se drsnost po tloušťce postupně zvyšuje. Nejvyšší drsnost Ra byla naměřena při řezné rychlosti 3600mm/m. Nejmenší rozpětí drsností je u řezné rychlosti 4500mm/min. Nejvhodnější řezná rychlost pro obrábění se jeví 3600mm/min, ačkoliv nemá nejmenší rozpětí, má nejmenší drsnost Ra.

mat. 304L												Vc= 500 m/min		
Vzorek č. 25	Místo	Ra [μm]	\bar{Ra} [μm]	s [μm]	v [%]	rz [μm]	\bar{Rz} [μm]	s [μm]	v [%]	rmr [%]	\bar{rmr} [%]	s [μm]		
	kraj	0,63	0,66	0,014	2,0678	3,66	4,024	0,188	4,680	52,00	44,600	4,079		
		0,67				4,12				42,00				
		0,66				4,18				41,00				
		0,66				4,13				42,00				
		0,66				4,03				46,00				
	střed	2,08	2,02	0,032	1,5873	11,00	10,284	0,361	3,513	33,00	35,000	1,095		
		2,00				10,18				36,00				
		2,00				10,13				36,00				
		2,00				10,07				35,00				
		2,00				10,04				35,00				
	konec	2,43	2,44	0,004	0,1641	10,89	10,904	0,010	0,094	52,00	52,800	0,400		
2,44		10,90				53,00								
2,44		10,91				53,00								
2,44		10,92				53,00								
2,44		10,90				53,00								

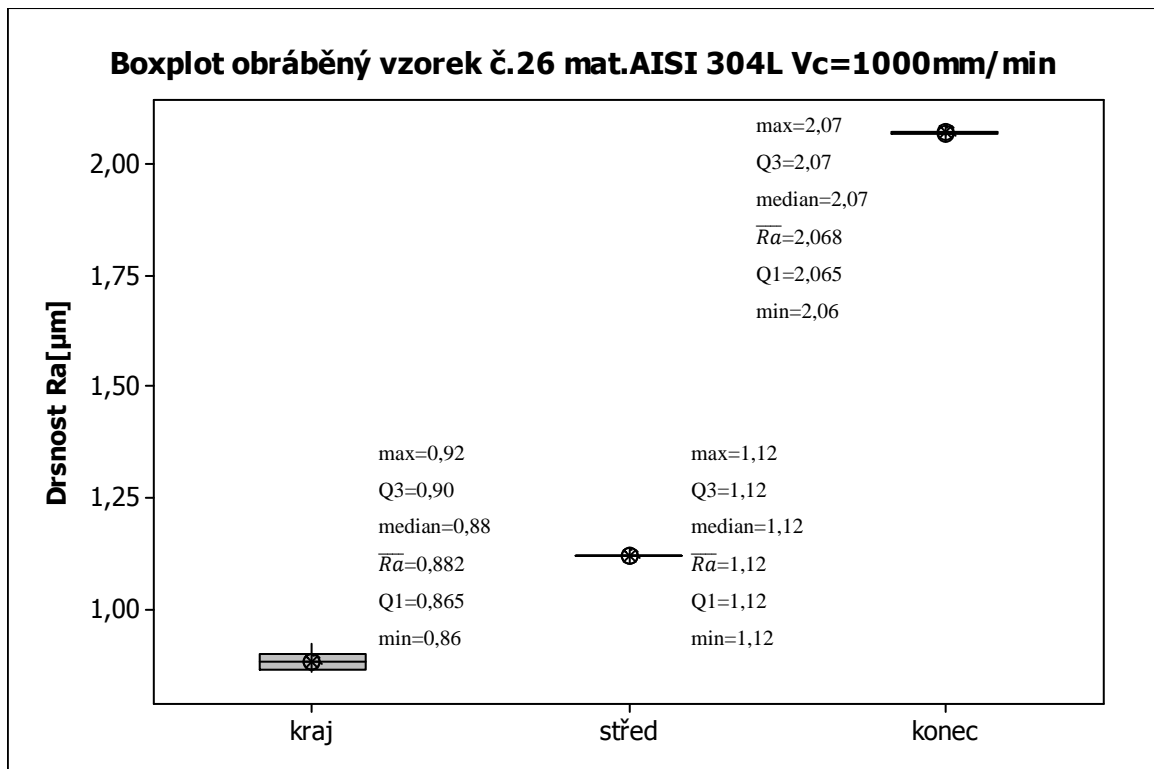
Tab. 11. Naměřené hodnoty jakosti povrchu vzorku č. 25



Graf. 13. Jakost povrchu (boxplot) vzorek č. 25

mat. 304L												
Vc= 1000 m/min												
Vzorek č. 26	Místo	Ra [μm]	\bar{Ra} [μm]	s [μm]	v [%]	rz [μm]	\bar{Rz} [μm]	s [μm]	v [%]	rmr [%]	\bar{rmr} [%]	s [μm]
	kraj		0,92	0,88	0,020	2,3125	4,71	4,648	0,110	2,362	59,00	52,000
		0,86	4,44				53,00					
		0,87	4,66				49,00					
		0,88	4,67				52,00					
		0,88	4,76				47,00					
střed		1,12	1,12	0,000	0,0000	5,12	5,164	0,023	0,452	56,00	58,400	1,744
		1,12				5,17				57,00		
		1,12				5,17				59,00		
		1,12				5,17				59,00		
		1,12				5,19				61,00		
konec		2,06	2,07	0,004	0,1934	10,52	10,592	0,040	0,375	45,00	45,800	0,748
		2,07				10,64				47,00		
		2,07				10,60				46,00		
		2,07				10,59				46,00		
		2,07				10,61				45,00		

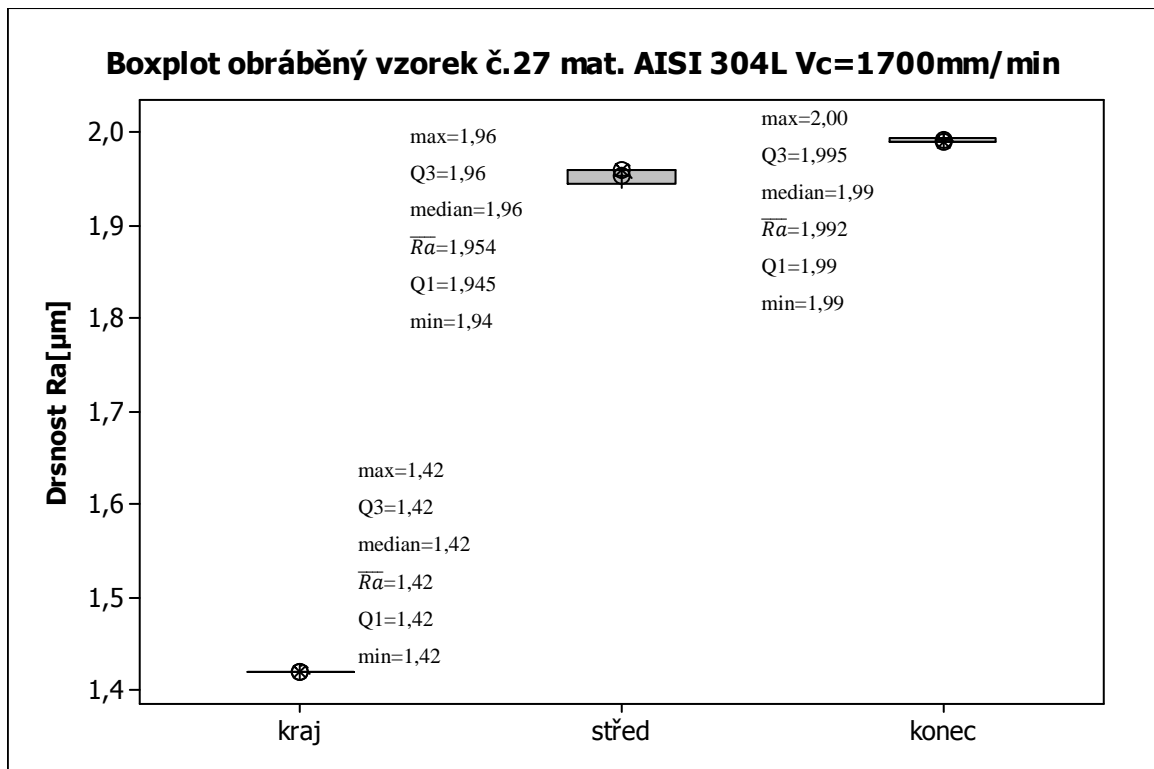
Tab. 12. Naměřené hodnoty jakosti povrchu vzorku č. 26



Graf. 14. Jakost povrchu (boxplot) vzorek č. 26

mat. 304L											
Vc= 1700 m/min											
Místo	Ra [μm]	\bar{Ra} [μm]	s [μm]	v [%]	rz [μm]	\bar{Rz} [μm]	s [μm]	v [%]	rmr [%]	\bar{rmr} [%]	s [μm]
kraj	1,42	1,42	0,000	0,0000	7,22	7,154	0,036	0,497	46,00	44,800	0,980
	1,42				7,16				46,00		
	1,42				7,13				44,00		
	1,42				7,14				44,00		
	1,42				7,12				44,00		
střed	1,95	1,95	0,008	0,4094	10,51	10,554	0,034	0,326	51,00	50,800	0,748
	1,94				10,55				51,00		
	1,96				10,61				52,00		
	1,96				10,57				50,00		
	1,96				10,53				50,00		
konec	1,99	1,99	0,004	0,2008	9,32	9,382	0,047	0,497	61,00	65,200	2,400
	1,99				9,46				64,00		
	1,99				9,40				67,00		
	2,00				9,37				67,00		
	1,99				9,36				67,00		

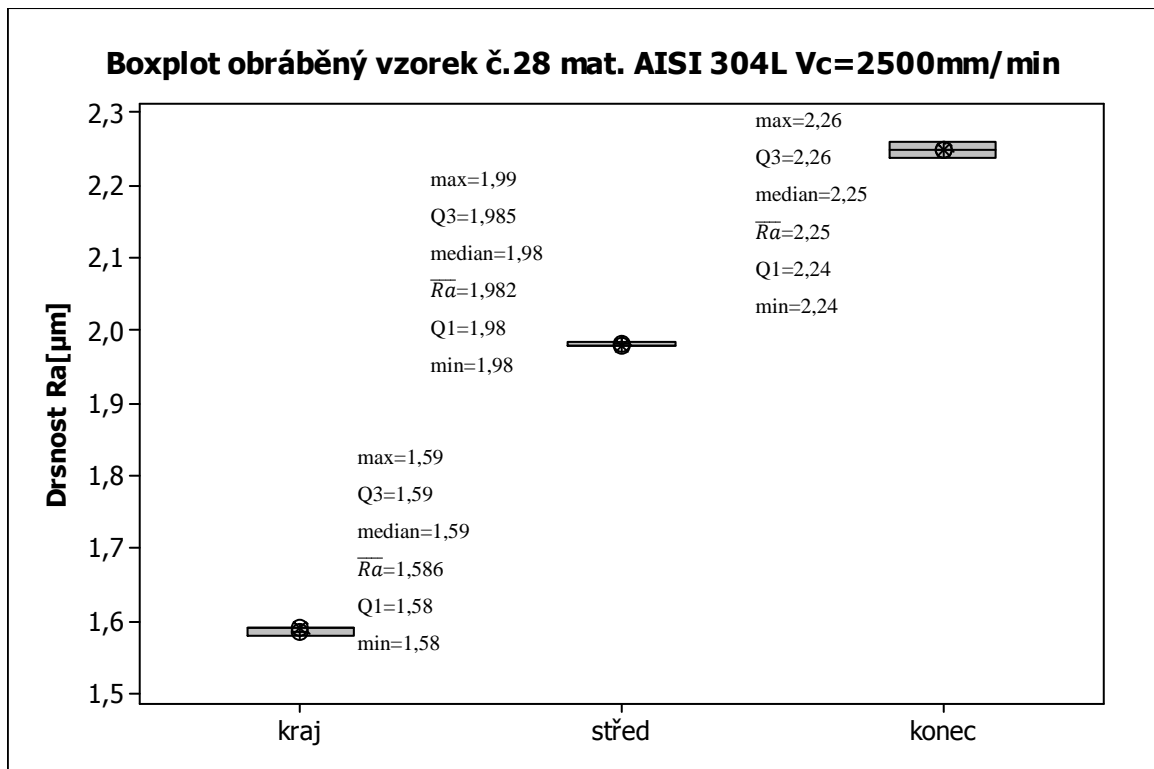
Tab. 13. Naměřené hodnoty jakosti povrchu vzorku č. 27



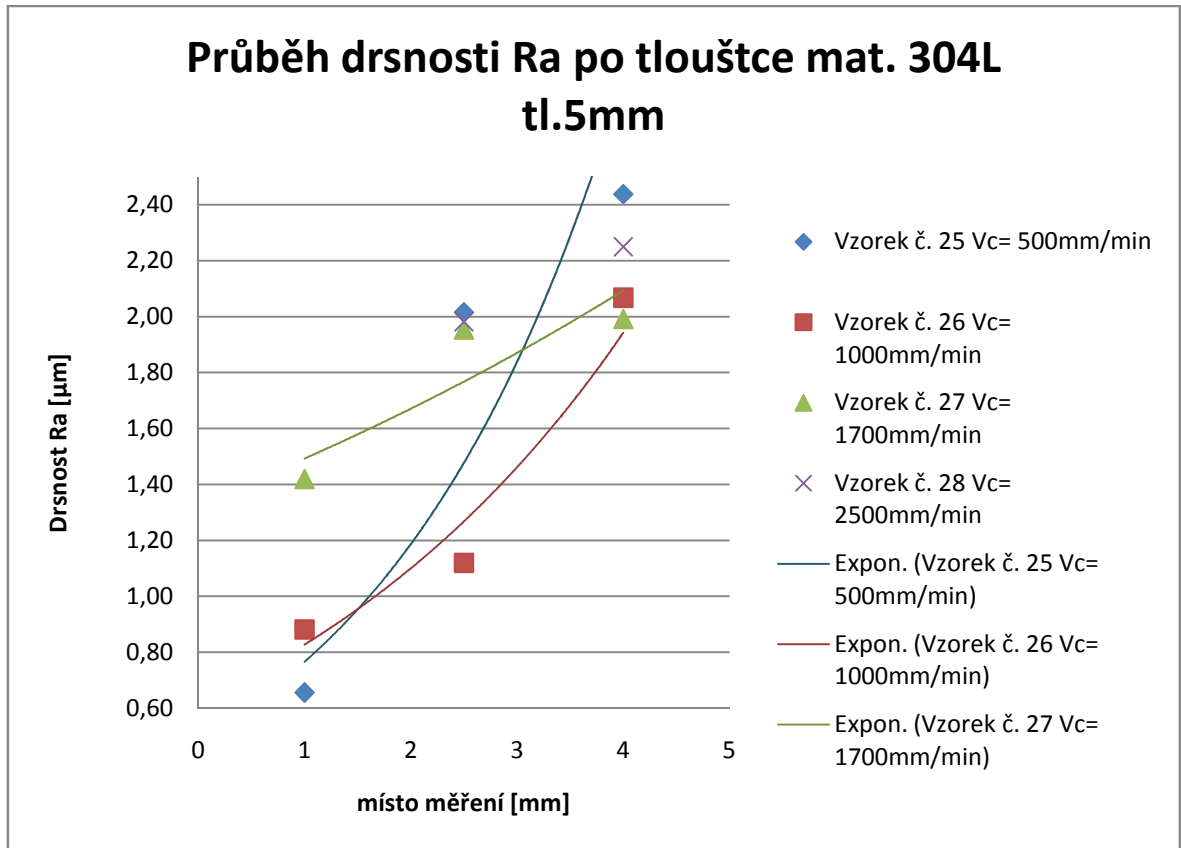
Graf. 15. Jakost povrchu (boxplot) vzorek č. 27

mat. 304L											
Vc= 2500 m/min											
Místo	Ra [μm]	\bar{Ra} [μm]	s [μm]	v [%]	rz [μm]	\bar{Rz} [μm]	s [μm]	v [%]	r _{mr} [%]	\bar{r}_{mr} [%]	s [μm]
kraj	1,58	1,59	0,005	0,3089	7,85	7,924	0,045	0,562	55,00	56,000	0,632
	1,58				7,93				56,00		
	1,59				7,93				57,00		
	1,59				7,99				56,00		
	1,59				7,92				56,00		
střed	1,98	1,98	0,004	0,2018	9,70	9,820	0,077	0,784	54,00	54,600	1,200
	1,99				9,94				57,00		
	1,98				9,84				54,00		
	1,98				9,82				54,00		
	1,98				9,80				54,00		
konec	2,24	2,25	0,009	0,3975	11,43	11,288	0,092	0,815	47,00	47,000	0,632
	2,25				11,25				48,00		
	2,24				11,36				47,00		
	2,26				11,20				46,00		
	2,26				11,20				47,00		

Tab. 14. Naměřené hodnoty jakosti povrchu vzorku č. 28

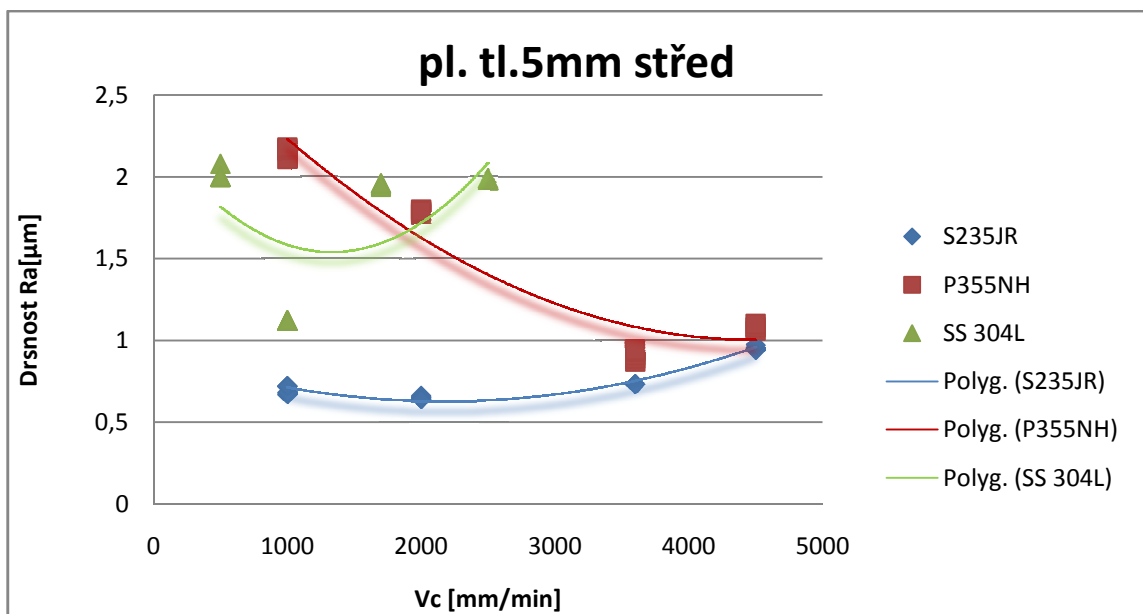


Graf. 16. Jakost povrchu (boxplot) vzorek č. 28



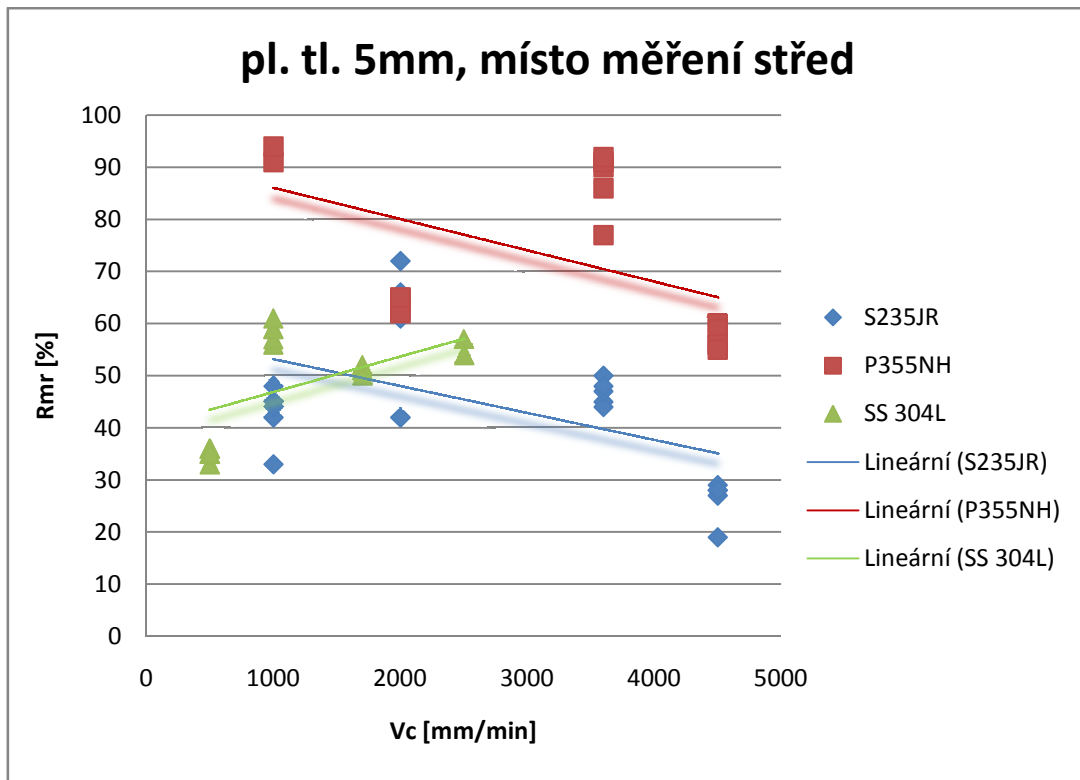
Graf. 17. Trend drsnosti Ra po tloušťce mat. AISI 304L tl. 5mm

Graf trendu průběhu drsnosti po tloušťce materiálu ukazuje, že se drsnost po tloušťce postupem zvyšuje. Nejvyšší drsnost Ra byla naměřena při řezné rychlosti 2500mm/m. Nejvhodnější řezná rychlost pro obrábění se jeví 1700mm/min, protože má nejmenší rozpětí drsnosti při větší produktivitě vykonané práce.



Graf. 18. Trend drsnosti Ra na řezné rychlosti Vc pro vzorky tl. 5mm

U všech měřených materiálu (S235JR, P355NH, AISI 304L) je vidět vzrůstající konvexní průběh drsnosti Ra při zvyšující se řezné rychlosti. Dle nejnižší polohy drsnosti Ra pro materiál S235JR odpovídá řezná rychlost kolem 2250mm/min. U P355NH kolem 4000mm/min a u AISI 304L kolem 1100mm/min.



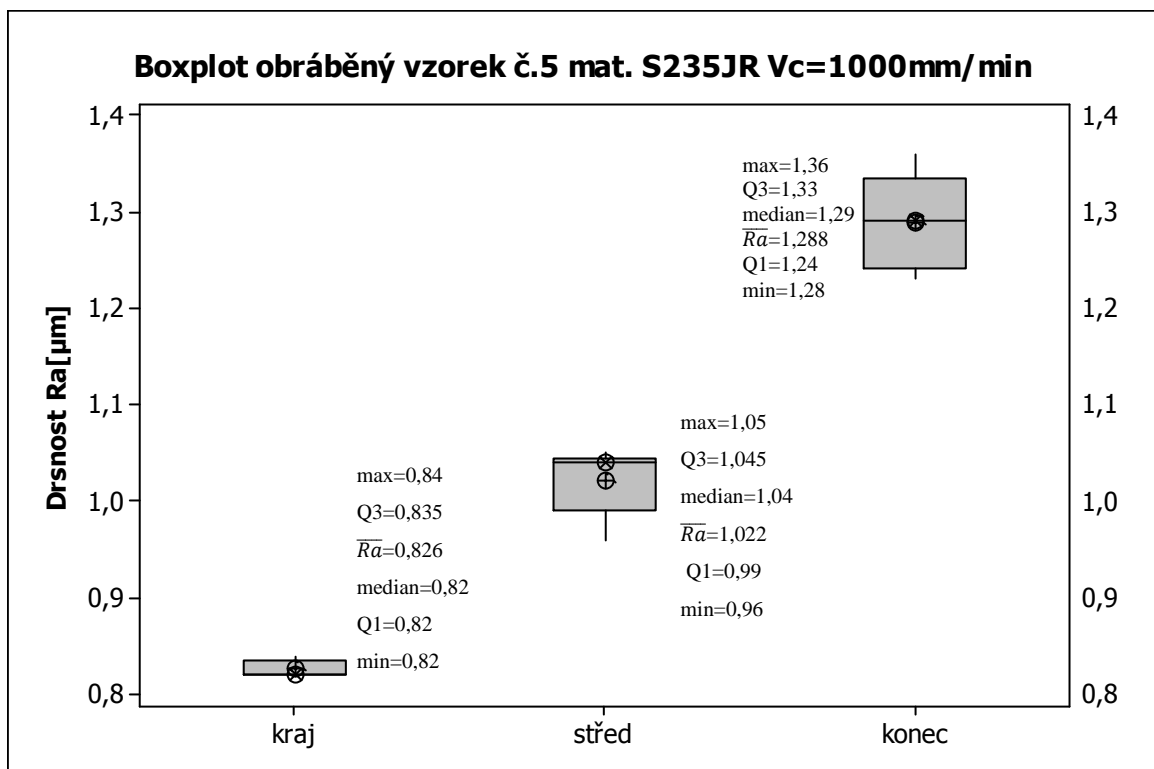
Graf. 19. Závislost Rmr na řezné rychlosti pro pl. tl. 5mm

U nízko uhlíkových konstrukčních materiálu (S235JR a P355NH) je snižující se trend hodnot Rmr na řezné rychlosti. U nerezového materiálu tomu je naopak.

5.2 Naměřené hodnoty tl. Plechu 10mm:

mat. S235JR												Vc= 1000 mm/min	
Vzorek č. 5	Místo	Ra [μm]	\bar{Ra} [μm]	s [μm]	v [%]	rz [μm]	\bar{Rz} [μm]	s [μm]	v [%]	rmr [%]	\overline{rmr} [%]	s [μm]	
	kraj		0,82	0,83	0,008	0,9685	5,82	5,72	0,071	1,233	44,00	42,6	3,007
		0,84	38,00										
		0,83	47,00										
		0,82	43,00										
		0,82	41,00										
střed		1,05	1,02	0,032	3,1797	8,66	7,62	0,576	7,564	33,00	62,2	14,634	
		0,96				68,00							
		1,04				71,00							
		1,02				69,00							
		1,04				70,00							
konec		1,36	1,29	0,046	3,5545	7,64	7,06	0,317	4,493	38,00	59,0	10,900	
		1,25				64,00							
		1,23				59,00							
		1,29				67,00							
		1,31				67,00							

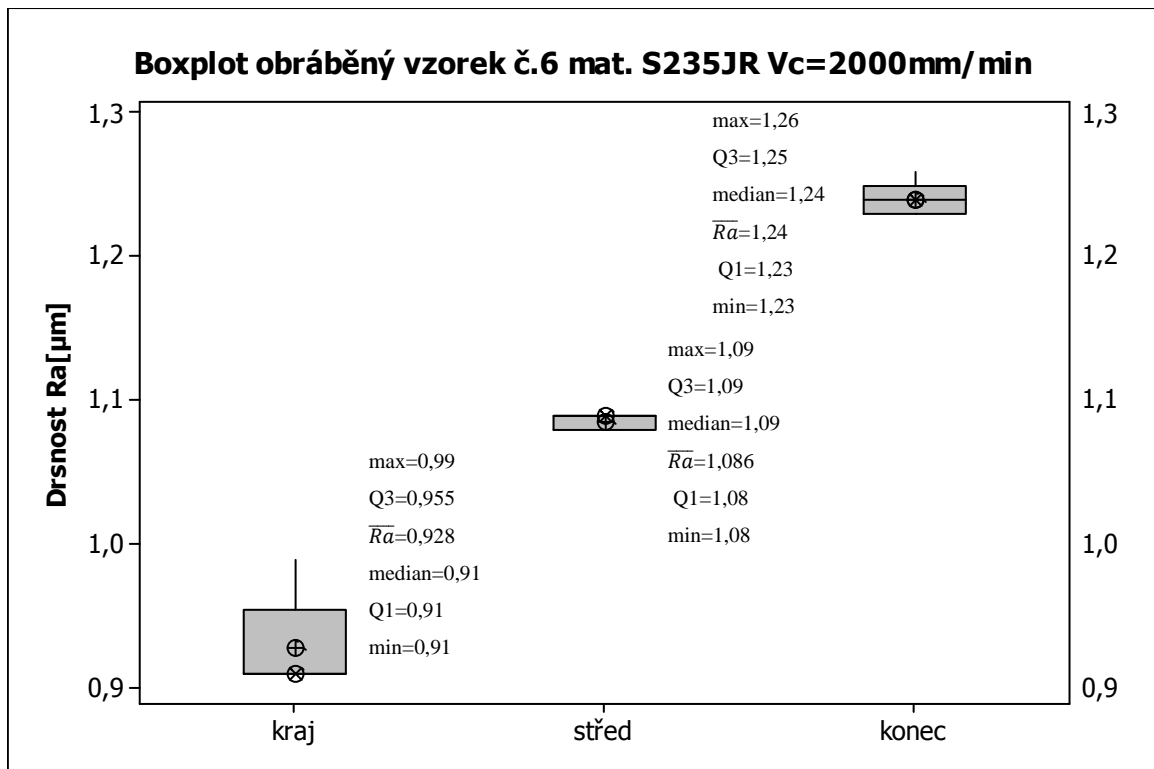
Tab. 15. Naměřené hodnoty jakosti povrchu vzorku č. 5



Graf. 20. Jakost povrchu (boxplot) vzorek č. 5

mat. S235JR Vc= 2000 mm/min												
Vzorek č. 6	Místo	Ra [μm]	\bar{Ra} [μm]	s [μm]	v [%]	rz [μm]	\bar{Rz} [μm]	s [μm]	v [%]	rmr [%]	\bar{rmr} [%]	s [μm]
	kraj	0,99	0,93	0,031	3,3665	4,32	4,07	0,127	3,129	50,00	51,0	0,632
		0,91				4,00				51,00		
		0,91				4,01				51,00		
		0,92				3,99				51,00		
		0,91				4,01				52,00		
	střed	1,09	1,09	0,005	0,4511	6,94	6,91	0,059	0,859	39,00	53,0	8,025
		1,09				7,01				49,00		
		1,09				6,88				58,00		
		1,08				6,84				59,00		
		1,08				6,88				60,00		
	konec	1,26	1,24	0,011	0,8834	8,09	7,86	0,186	2,371	33,00	26,4	3,720
		1,24				7,96				24,00		
1,24		7,97				26,00						
1,23		7,61				22,00						
1,23		7,67				27,00						

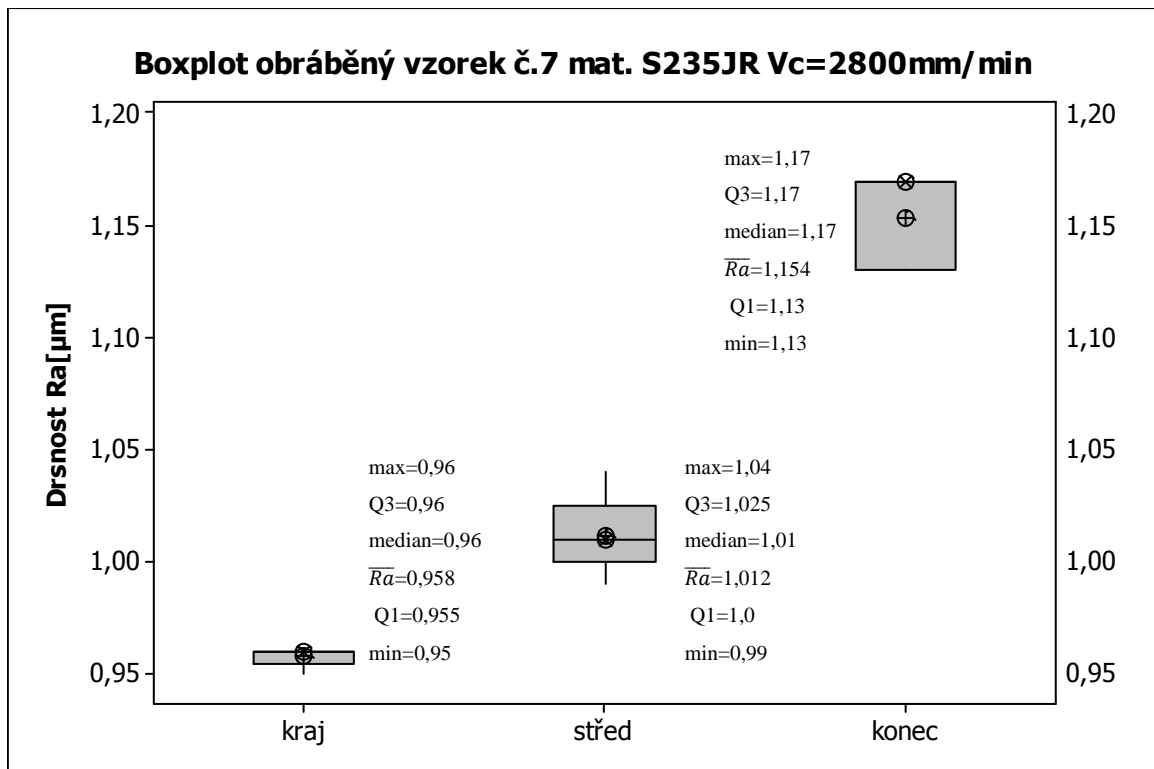
Tab. 16. Naměřené hodnoty jakosti povrchu vzorku č. 6



Graf. 21. Jakost povrchu (boxplot) vzorek č. 6

mat. S235JR												Vc= 2800 mm/min		
Vzorek č. 7	Místo	Ra [μm]	\bar{Ra} [μm]	s [μm]	v [%]	rz [μm]	\bar{Rz} [μm]	s [μm]	v [%]	rmr [%]	\bar{rmr} [%]	s [μm]		
	kraj	0,96	0,96	0,004	0,4175	5,12	5,07	0,043	0,841	50,00	53,6	3,007		
		0,96				5,00				55,00				
		0,96				5,04				56,00				
		0,95				5,09				57,00				
		0,96				5,09				50,00				
	střed	1,04	1,01	0,016	1,5810	5,70	5,38	0,166	3,080	36,00	47,4	5,783		
		0,99				5,25				49,00				
		1,01				5,27				50,00				
		1,01				5,31				52,00				
		1,01				5,35				50,00				
	konec	1,17	1,15	0,020	1,6981	6,64	6,44	0,174	2,695	47,00	52,4	2,871		
		1,17				6,48				52,00				
1,17		6,61				54,00								
1,13		6,25				54,00								
1,13		6,23				55,00								

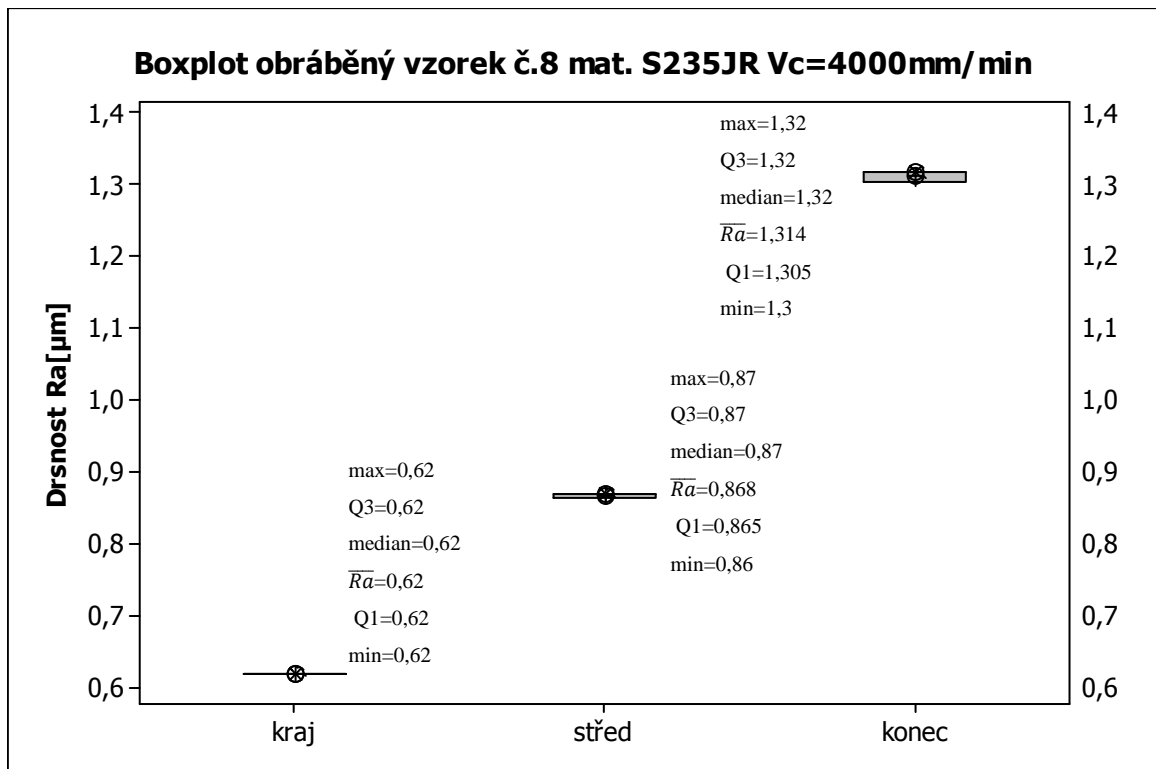
Tab. 17. Naměřené hodnoty jakosti povrchu vzorku č. 7



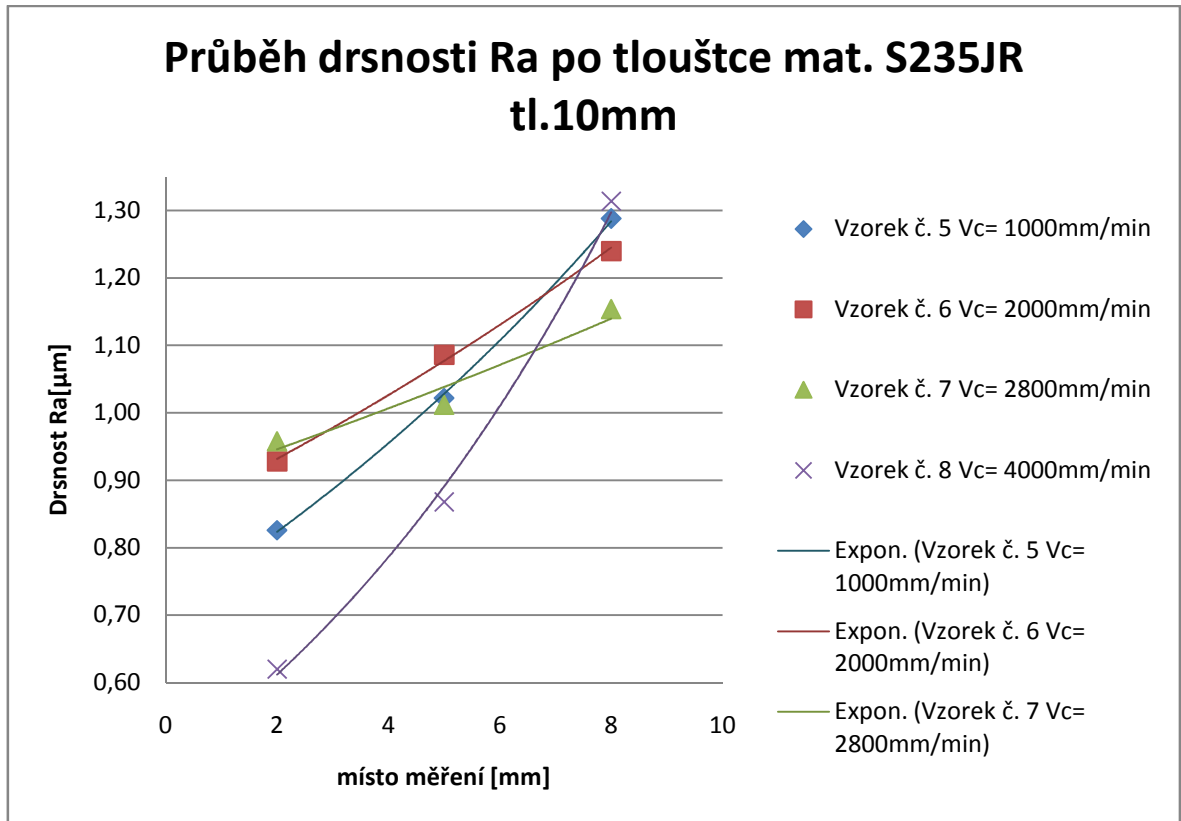
Graf. 22. Jakost povrchu (boxplot) vzorek č. 7

mat. S235JR												Vc= 4000 mm/min	
Vzorek č. 8	Místo	Ra [μm]	\bar{Ra} [μm]	s [μm]	v [%]	rz [μm]	\bar{Rz} [μm]	s [μm]	v [%]	rmr [%]	\bar{rmr} [%]	s [μm]	
	kraj	0,62	0,62	0,000	0,0000	3,20	3,21	0,027	0,826	34,00	39,2	3,970	
		0,62				3,17				35,00			
		0,62				3,22				41,00			
		0,62				3,24				42,00			
		0,62				3,24				44,00			
	střed	0,87	0,87	0,004	0,4608	4,56	4,48	0,067	1,489	24,00	27,0	2,757	
		0,87				4,51				27,00			
		0,87				4,53				29,00			
		0,86				4,43				31,00			
		0,87				4,38				24,00			
	konec	1,30	1,31	0,008	0,6088	7,15	7,27	0,080	1,096	68,00	69,6	1,020	
		1,31				7,25				70,00			
		1,32				7,27				69,00			
		1,32				7,26				70,00			
1,32		7,40				71,00							

Tab. 18. Naměřené hodnoty jakosti povrchu vzorku č. 8



Graf. 23. Jakost povrchu (boxplot) vzorek č. 8

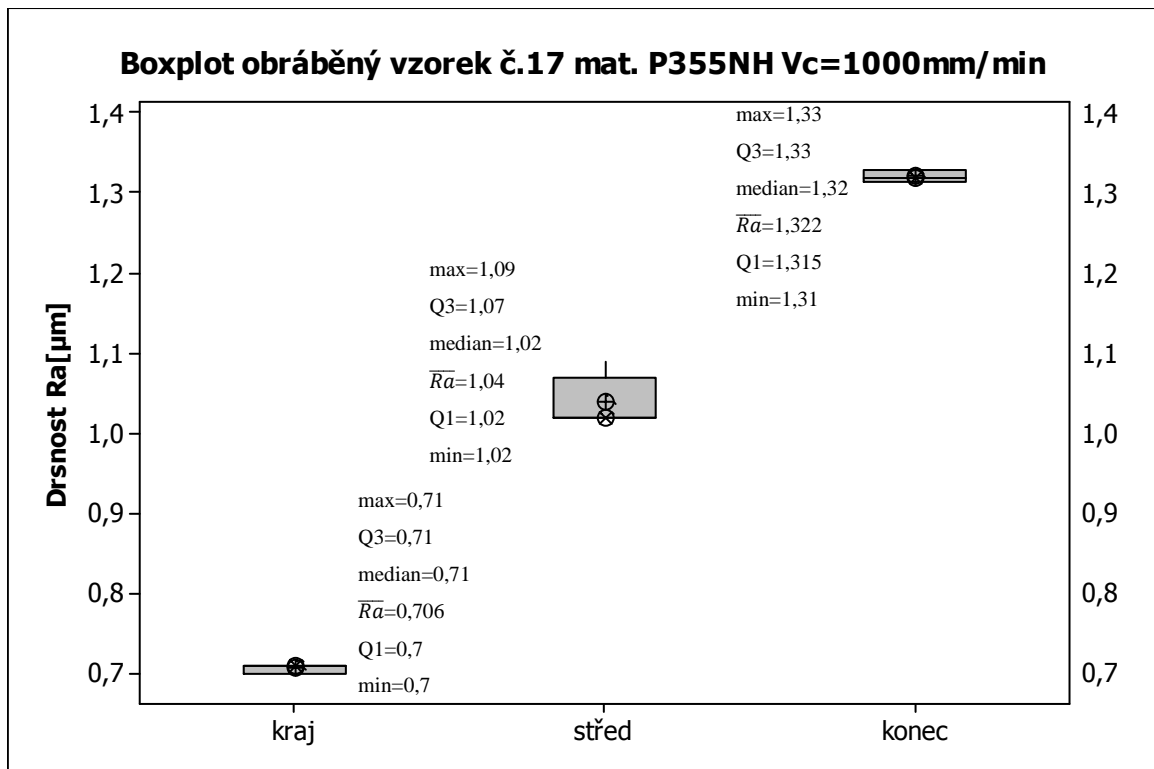


Graf. 24. Trend drsnosti Ra po tloušťce mat. S235JR tl. 10mm

Graf trendu průběhu drsnosti po tloušťce materiálu ukazuje, že se drsnost po tloušťce postupně zvyšuje. Nejvyšší drsnost R_a byla naměřena při řezné rychlosti 4000mm/m. Nejmenší rozpětí drsností je u řezné rychlosti 2800mm/min a proto je i nejvhodnější.

mat. P355NH												
Vc= 1000 mm/min												
Vzorek č. 17	Místo	Ra [μm]	\bar{Ra} [μm]	s [μm]	v [%]	rz [μm]	\bar{Rz} [μm]	s [μm]	v [%]	rmr [%]	\bar{rmr} [%]	s [μm]
	Vzorek č. 17	kraj	0,7	0,71	0,005	0,6939	4,46	4,74	0,146	3,080	60,00	47,2
0,7			4,81				47,00					
0,71			4,88				37,00					
0,71			4,74				37,00					
0,71			4,8				55,00					
střed		1,09	1,04	0,028	2,6508	8,01	7,77	0,172	2,216	28,00	28,2	4,490
		1,05				7,70				22,00		
		1,02				7,91				27,00		
		1,02				7,52				36,00		
		1,02				7,71				28,00		
konec		1,32	1,32	0,007	0,5661	8,77	8,88	0,095	1,071	12,00	11,6	1,020
		1,32				8,79				12,00		
		1,31				8,87				11,00		
		1,33				9,01				13,00		
		1,33				8,97				10,00		

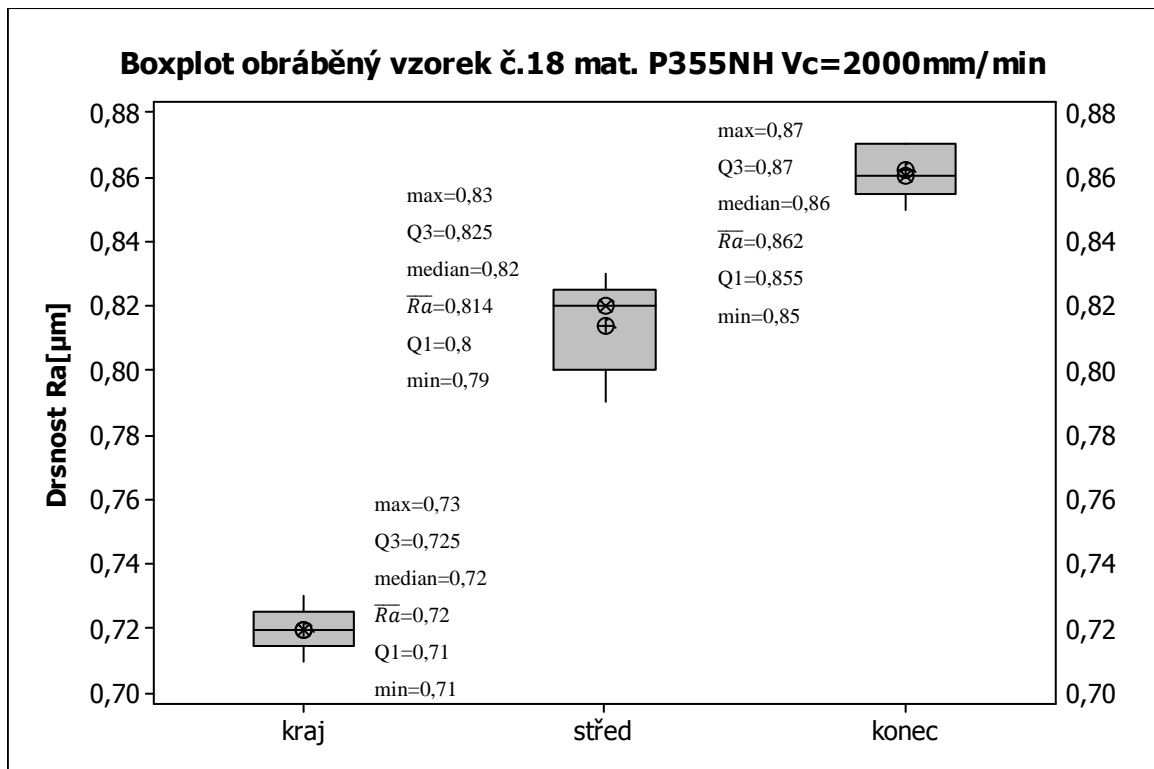
Tab. 19. Naměřené hodnoty jakosti povrchu vzorku č. 17



Graf. 25. Jakost povrchu (boxplot) vzorek č. 17

mat. P355NH												
Vc= 2000 mm/min												
Vzorek č. 18	Místo	Ra [μm]	\bar{Ra} [μm]	s [μm]	v [%]	rz [μm]	\bar{Rz} [μm]	s [μm]	v [%]	rmr [%]	\bar{rmr} [%]	s [μm]
	kraj	0,73	0,72	0,006	0,8784	4,55	4,65	0,050	1,068	14,00	14,6	1,625
		0,72				4,65				12,00		
		0,72				4,69				15,00		
		0,71				4,67				15,00		
		0,72				4,67				17,00		
střed	0,79	0,81	0,014	1,6664	4,27	4,55	0,149	3,268	53,00	46,4	3,382	
	0,83				4,62				44,00			
	0,82				4,55				45,00			
	0,82				4,59				44,00			
	0,81				4,71				46,00			
konec	0,85	0,86	0,007	0,8681	5,01	5,09	0,050	0,989	75,00	77,8	2,713	
	0,86				5,12				81,00			
	0,86				5,15				81,00			
	0,87				5,06				75,00			
	0,87				5,12				77,00			

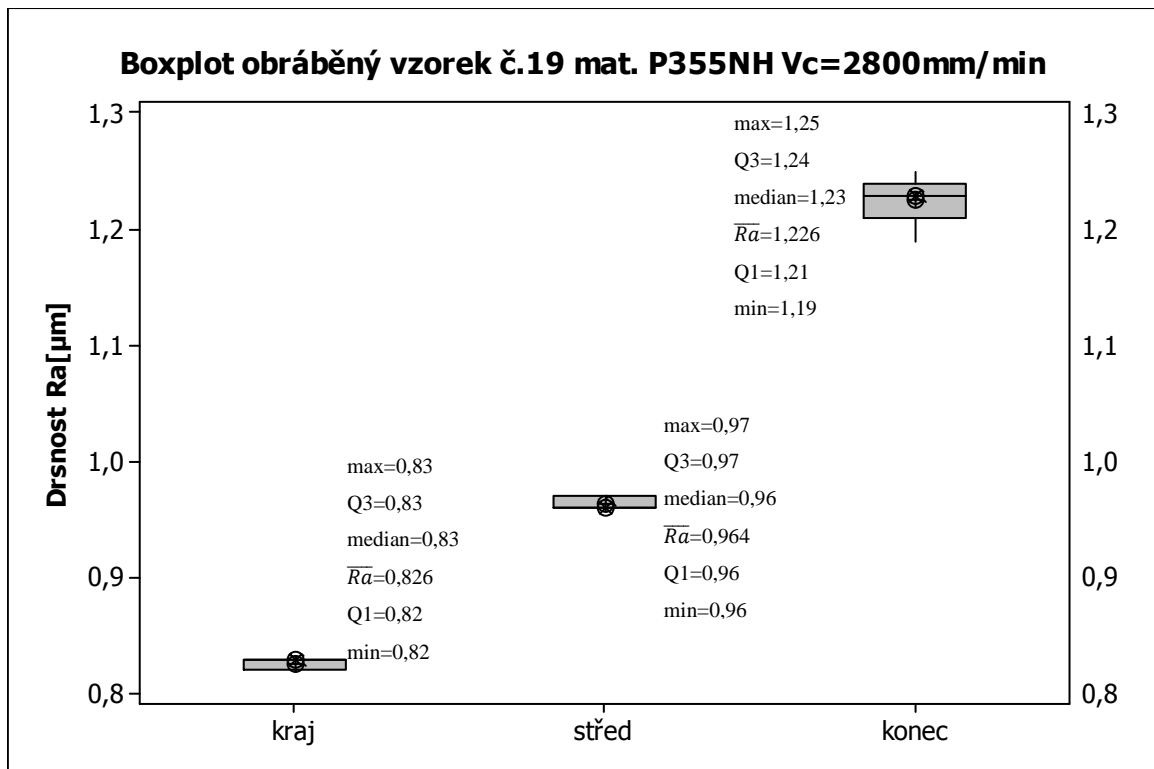
Tab. 20. Naměřené hodnoty jakosti povrchu vzorku č. 18



Graf. 26. Jakost povrchu (boxplot) vzorek č. 18

mat. P355NH												Vc= 2800 mm/min	
Vzorek č. 19	Místo	Ra [μm]	\bar{Ra} [μm]	s [μm]	v [%]	rz [μm]	\bar{Rz} [μm]	s [μm]	v [%]	r _{mr} [%]	\bar{r}_{mr} [%]	s [μm]	
	kraj	0,83	0,83	0,005	0,5931	5,05	5,14	0,055	1,066	26,00	30,6	2,332	
		0,83				5,12				32,00			
		0,82				5,18				31,00			
		0,83				5,21				32,00			
		0,82				5,14				32,00			
	střed	0,97	0,96	0,005	0,5082	5,52	5,49	0,074	1,356	75,00	71,4	3,382	
		0,96				5,52				75,00			
		0,96				5,34				72,00			
		0,96				5,52				67,00			
		0,97				5,54				68,00			
	konec	1,19	1,23	0,020	1,5984	6,81	7,21	0,204	2,823	41,00	29,8	5,741	
		1,25				7,31				25,00			
		1,23				7,36				27,00			
		1,23				7,28				27,00			
1,23		7,31				29,00							

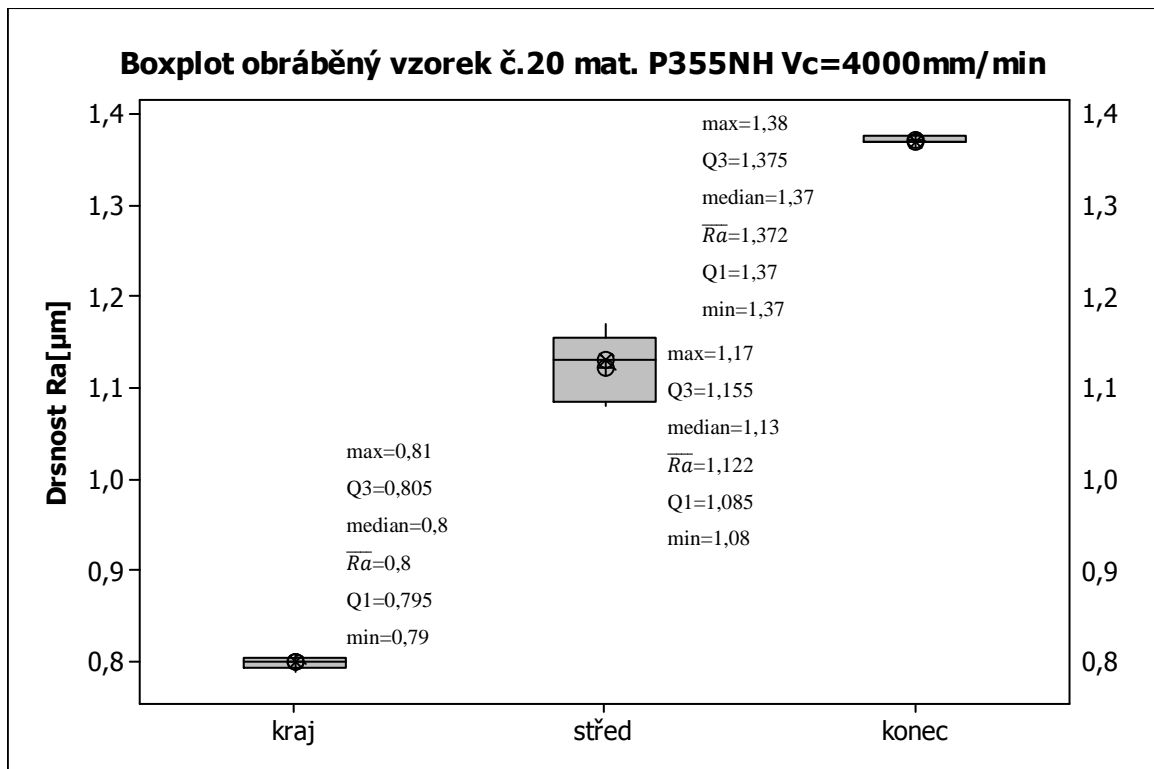
Tab. 21. Naměřené hodnoty jakosti povrchu vzorku č. 19



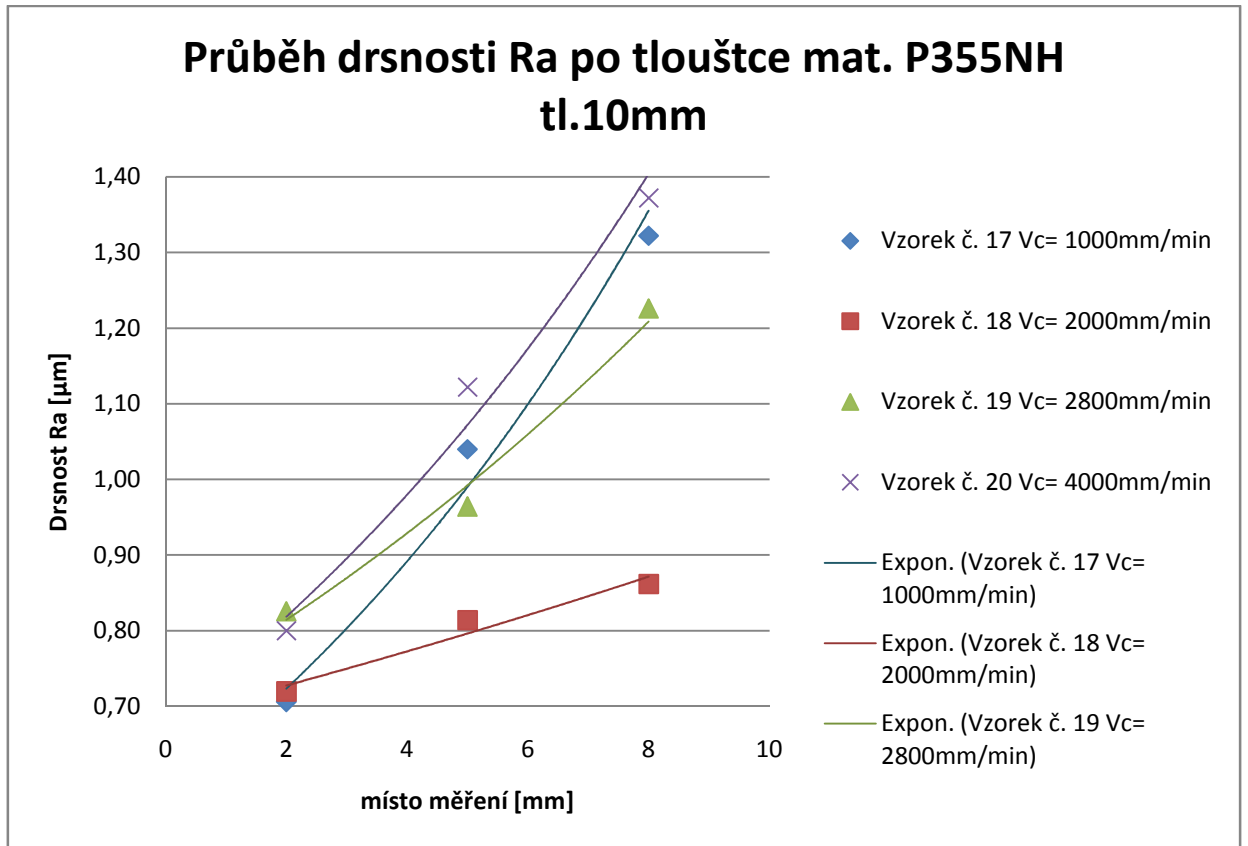
Graf. 27. Jakost povrchu (boxplot) vzorek č. 19

mat. P355NH												Vc= 4000 mm/min	
Místo	Ra [μm]	\bar{Ra} [μm]	s [μm]	v [%]	rz [μm]	\bar{Rz} [μm]	s [μm]	v [%]	rmr [%]	$\bar{r}mr$ [%]	s [μm]		
kraj	0,79	0,80	0,006	0,7906	5,01	5,32	0,185	3,470	38,00	46,6	6,741		
	0,80				5,27				39,00				
	0,80				5,37				54,00				
	0,80				5,36				52,00				
	0,81				5,58				50,00				
střed	1,08	1,12	0,033	2,9506	6,42	6,37	0,168	2,640	71,00	54,8	9,282		
	1,17				6,60				57,00				
	1,13				6,28				48,00				
	1,14				6,44				44,00				
	1,09				6,10				54,00				
konec	1,37	1,37	0,004	0,2915	8,32	8,30	0,119	1,436	22,00	28,0	3,847		
	1,37				8,13				27,00				
	1,37				8,21				29,00				
	1,38				8,39				34,00				
	1,37				8,46				28,00				

Tab. 22. Naměřené hodnoty jakosti povrchu vzorku č. 20



Graf. 28. Jakost povrchu (boxplot) vzorek č. 20

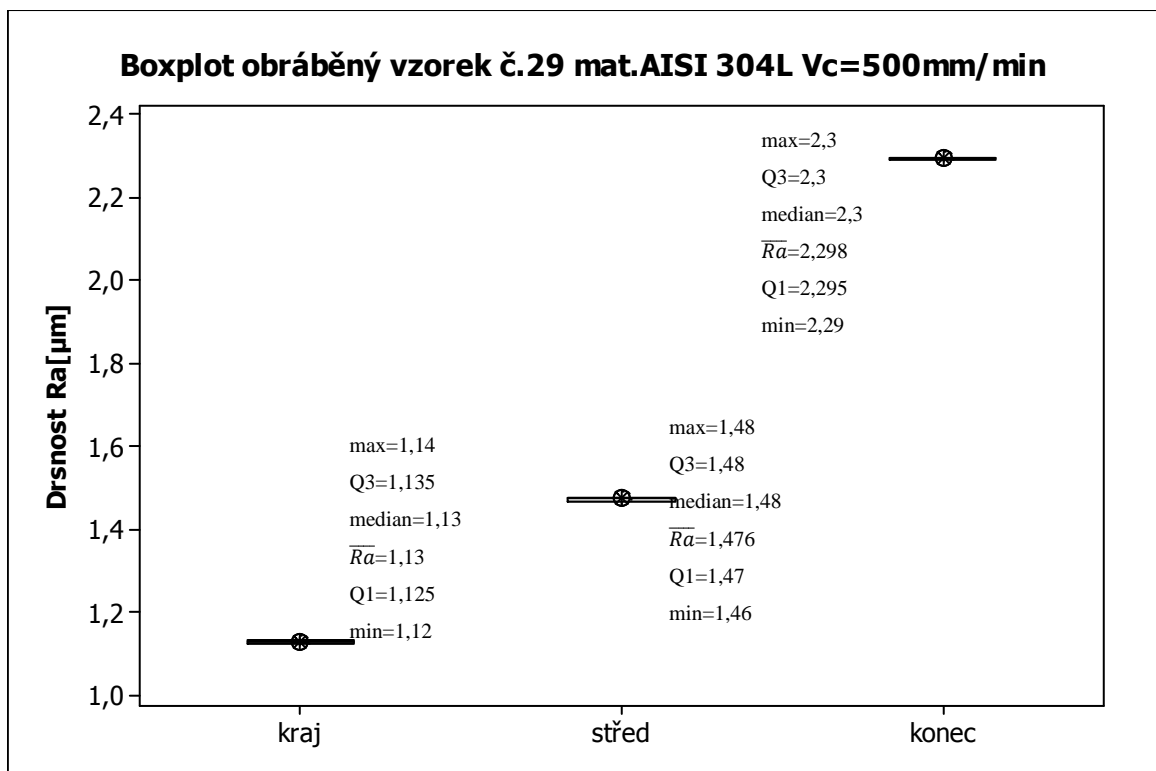


Graf. 29. Trend drsnosti Ra po tloušťce mat. P355NH tl. 10mm

Graf trendu průběhu drsnosti po tloušťce materiálu ukazuje, že se drsnost po tloušťce postupně zvyšuje. Nejvyšší drsnost R_a byla naměřena při řezné rychlosti 4000mm/m. Nejmenší rozpětí drsností je u řezné rychlosti 2000mm/min. Nejvhodnější řezná rychlost pro obrábění se jeví 2800mm/min, ačkoliv nemá nejmenší rozpětí, maximální drsnosti kolem 1,25 není příliš vysoká, a proto vyšší řezná rychlost bude vhodnější.

mat. 304L												
Vc= 500 mm/min												
Vzorek č. 29	Místo	Ra [μm]	\bar{Ra} [μm]	s [μm]	v [%]	rz [μm]	\bar{Rz} [μm]	s [μm]	v [%]	rmr [%]	\bar{rmr} [%]	s [μm]
	kraj	1,12	1,13	0,006	0,5597	5,25	5,31	0,046	0,862	51,00	50,8	0,748
		1,13				5,32				50,00		
		1,13				5,35				51,00		
		1,13				5,27				50,00		
		1,14				5,37				52,00		
	střed	1,46	1,48	0,008	0,5420	6,59	6,58	0,057	0,870	40,00	41,0	1,414
		1,48				6,66				43,00		
		1,48				6,61				42,00		
		1,48				6,55				41,00		
		1,48				6,49				39,00		
	konec	2,29	2,30	0,004	0,1741	9,49	9,40	0,049	0,524	31,00	34,4	1,744
2,3		9,36				36,00						
2,3		9,4				35,00						
2,3		9,36				35,00						
2,3		9,37				35,00						

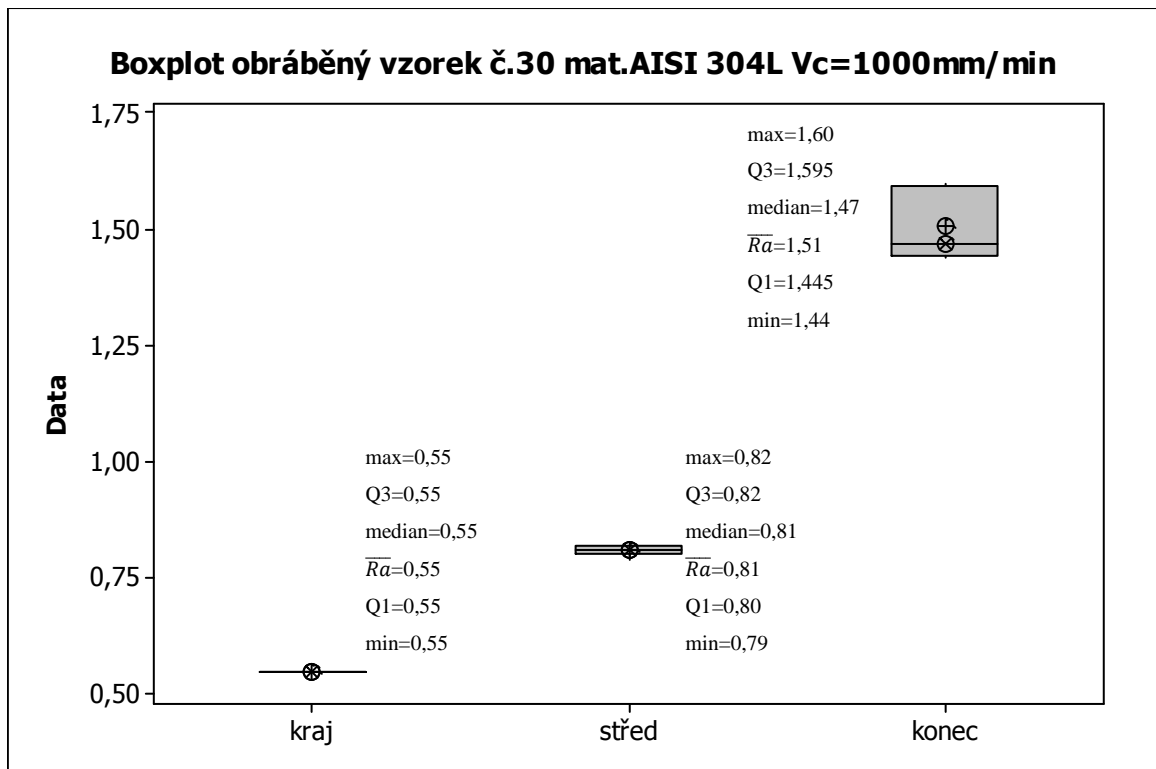
Tab. 23. Naměřené hodnoty jakosti povrchu vzorku č. 29



Graf. 30. Jakost povrchu (boxplot) vzorek č. 29

mat. 304L												Vc= 1000 mm/min	
Vzorek č. 30	Místo	Ra [μm]	\bar{Ra} [μm]	s [μm]	v [%]	rz [μm]	\bar{Rz} [μm]	s [μm]	v [%]	rmr [%]	\bar{rmr} [%]	s [μm]	
	kraj	0,55	0,55	0,000	0,0000	3,36	3,23	0,068	2,112	30,00	36,0	3,162	
		0,55				3,25				39,00			
		0,55				3,17				37,00			
		0,55				3,19				36,00			
		0,55				3,20				38,00			
	střed	0,81	0,81	0,011	1,3524	4,73	4,77	0,103	2,150	56,00	55,2	7,833	
		0,82				4,97				51,00			
		0,81				4,68				43,00			
		0,82				4,72				60,00			
		0,79				4,75				66,00			
	konec	1,47	1,51	0,070	4,6452	8,79	8,46	0,184	2,176	22,00	27,8	3,600	
1,45		8,46				28,00							
1,44		8,46				26,00							
1,60		8,24				31,00							
1,59		8,35				32,00							

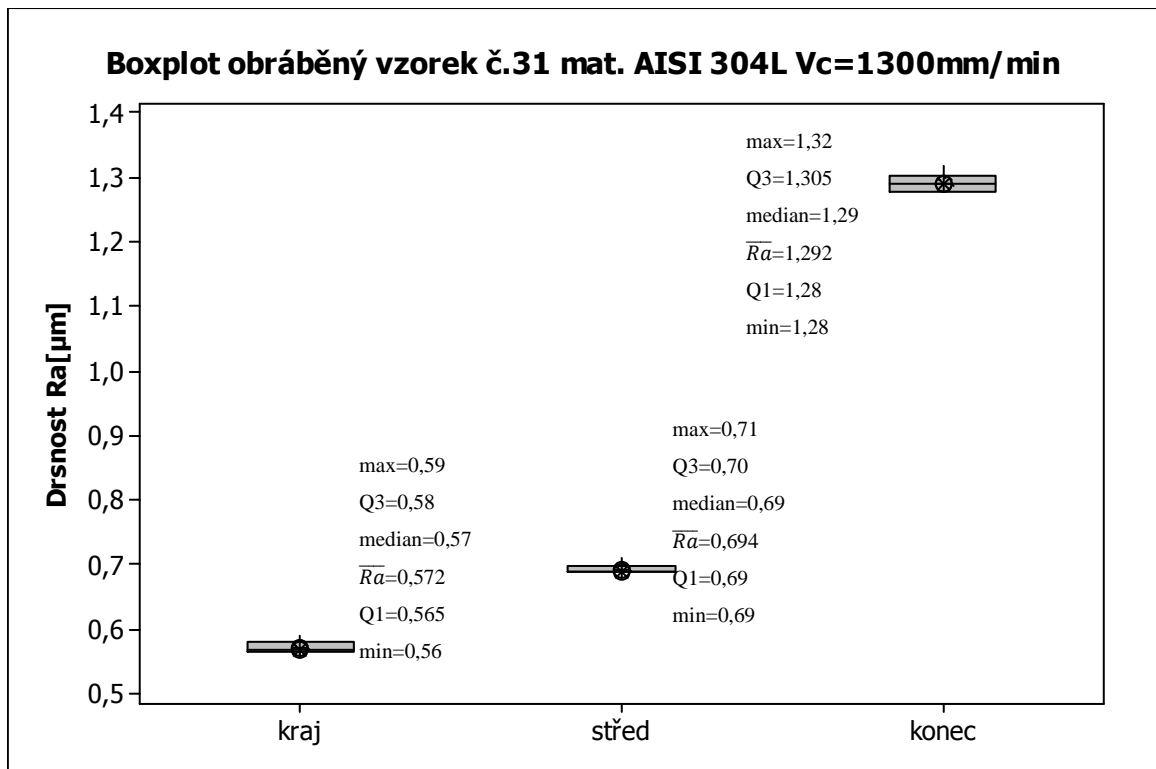
Tab. 24. Naměřené hodnoty jakosti povrchu vzorku č. 30



Graf. 31. Jakost povrchu (boxplot) vzorek č. 30

mat. 304L												Vc= 1300 mm/min		
Vzorek č. 31	Místo	Ra [μm]	\bar{Ra} [μm]	s [μm]	v [%]	rz [μm]	\bar{Rz} [μm]	s [μm]	v [%]	rmr [%]	\bar{rmr} [%]	s [μm]		
	kraj	0,57	0,57	0,010	1,7129	3,12	3,09	0,100	3,236	41,00	43,0	4,000		
		0,59				3,26				37,00				
		0,57				3,09				43,00				
		0,57				2,98				49,00				
		0,56				3,00				45,00				
	střed	0,71	0,69	0,008	1,1527	3,95	3,99	0,026	0,661	50,00	48,8	1,166		
		0,69				4,02				49,00				
		0,69				3,98				48,00				
		0,69				4,02				50,00				
		0,69				3,99				47,00				
	konec	1,32	1,29	0,015	1,1375	6,92	6,77	0,085	1,248	43,00	43,8	0,748		
1,28		6,79				43,00								
1,28		6,75				44,00								
1,29		6,75				44,00								
1,29		6,66				45,00								

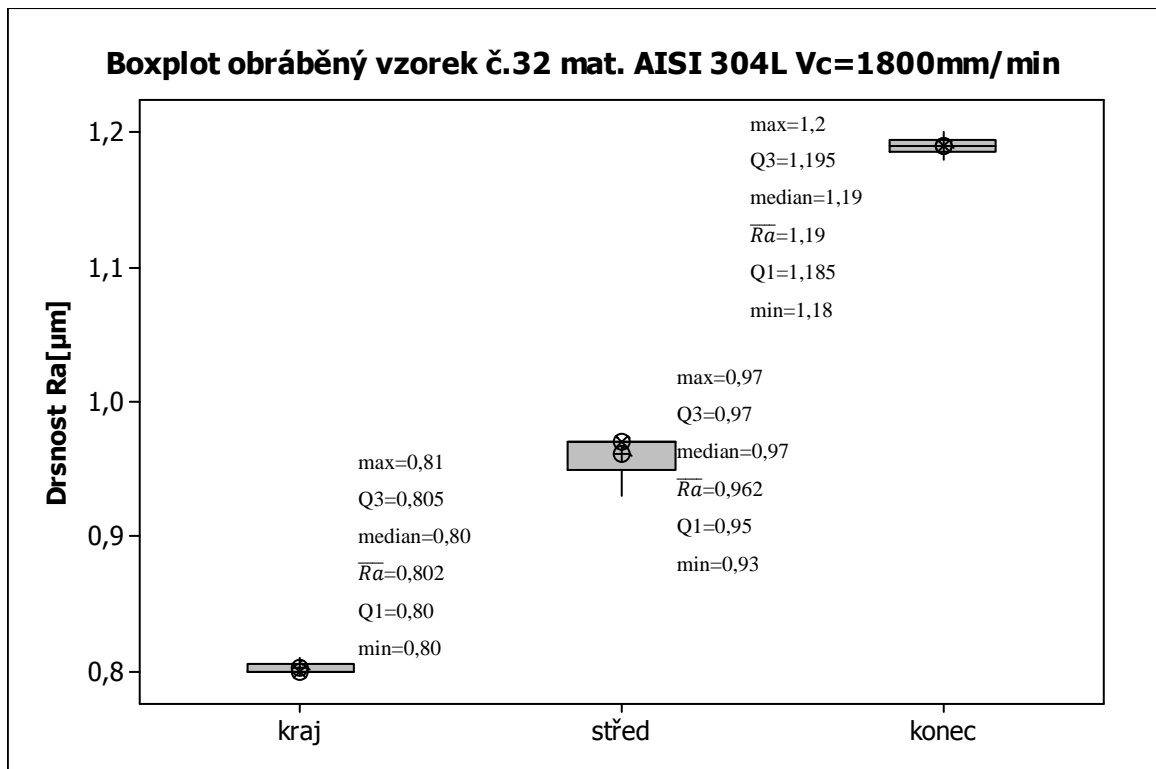
Tab. 25. Naměřené hodnoty jakosti povrchu vzorku č. 31



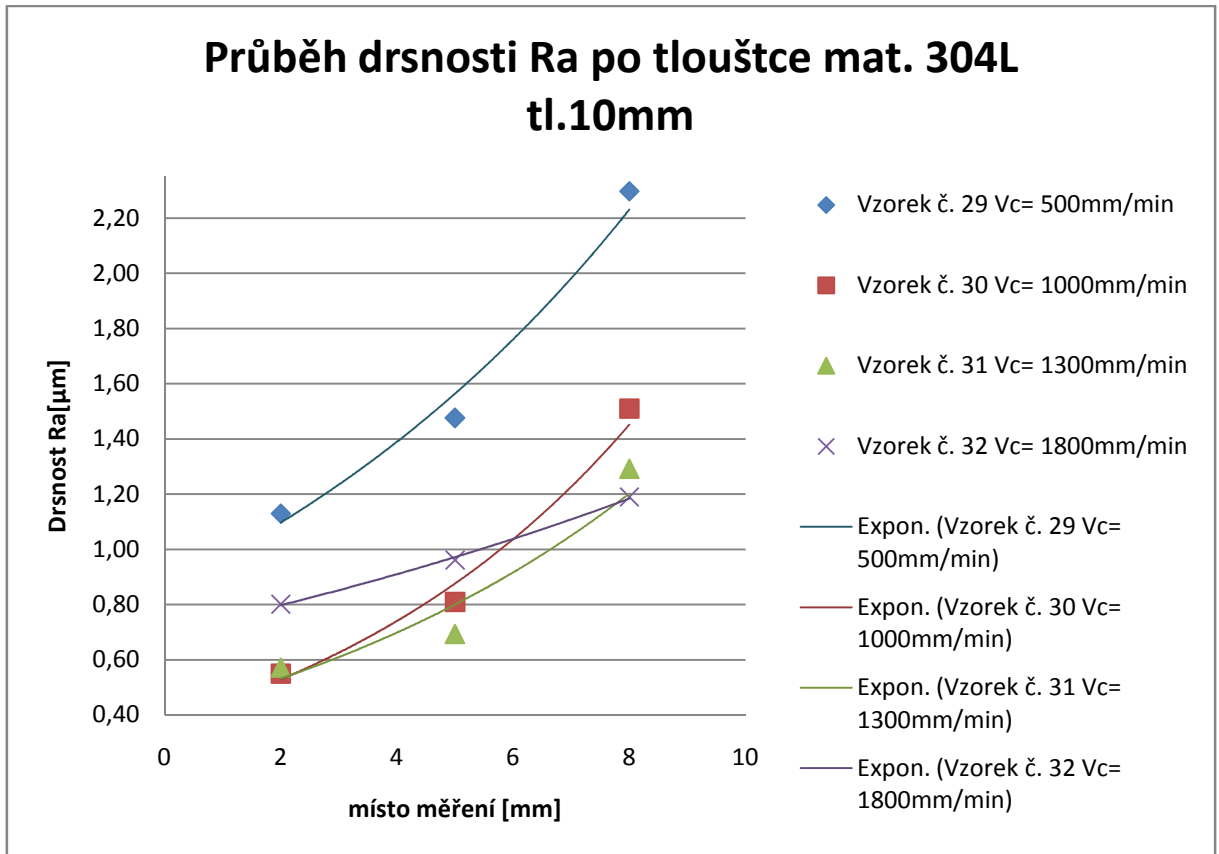
Graf. 32. Jakost povrchu (boxplot) vzorek č. 31

mat. 304L												
Vc= 1800 mm/min												
Vzorek č. 32	Místo	Ra [μm]	\bar{Ra} [μm]	s [μm]	v [%]	rz [μm]	\bar{Rz} [μm]	s [μm]	v [%]	rmr [%]	\bar{rmr} [%]	s [μm]
	kraj	0,81	0,80	0,004	0,4988	4,64	4,69	0,045	0,963	31,00	36,8	6,765
		0,80				4,73				29,00		
		0,80				4,69				35,00		
		0,80				4,75				47,00		
		0,80				4,64				42,00		
	střed	0,93	0,96	0,016	1,6632	5,16	5,09	0,111	2,185	44,00	53,6	5,783
		0,97				5,26				57,00		
		0,97				4,93				61,00		
		0,97				5,04				55,00		
		0,97				5,08				51,00		
	konec	1,18	1,19	0,006	0,5315	6,00	6,19	0,113	1,820	38,00	43,6	2,871
1,20		6,18				46,00						
1,19		6,29				44,00						
1,19		6,32				45,00						
1,19		6,17				45,00						

Tab. 26. Naměřené hodnoty jakosti povrchu vzorku č. 32

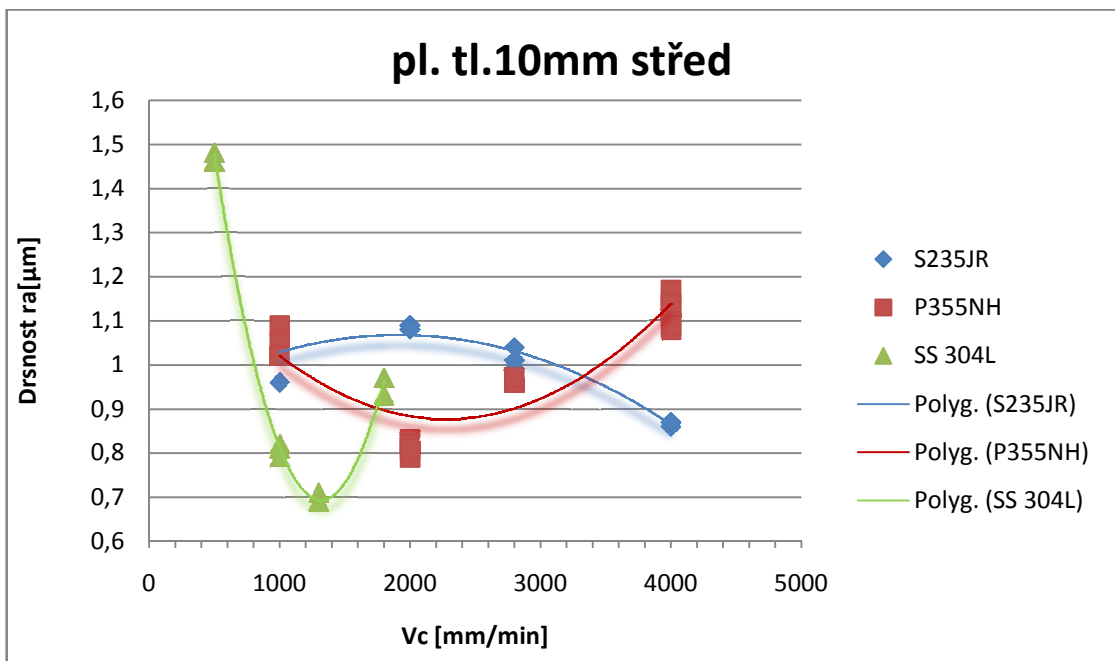


Graf. 33. Jakost povrchu (boxplot) vzorek č. 32



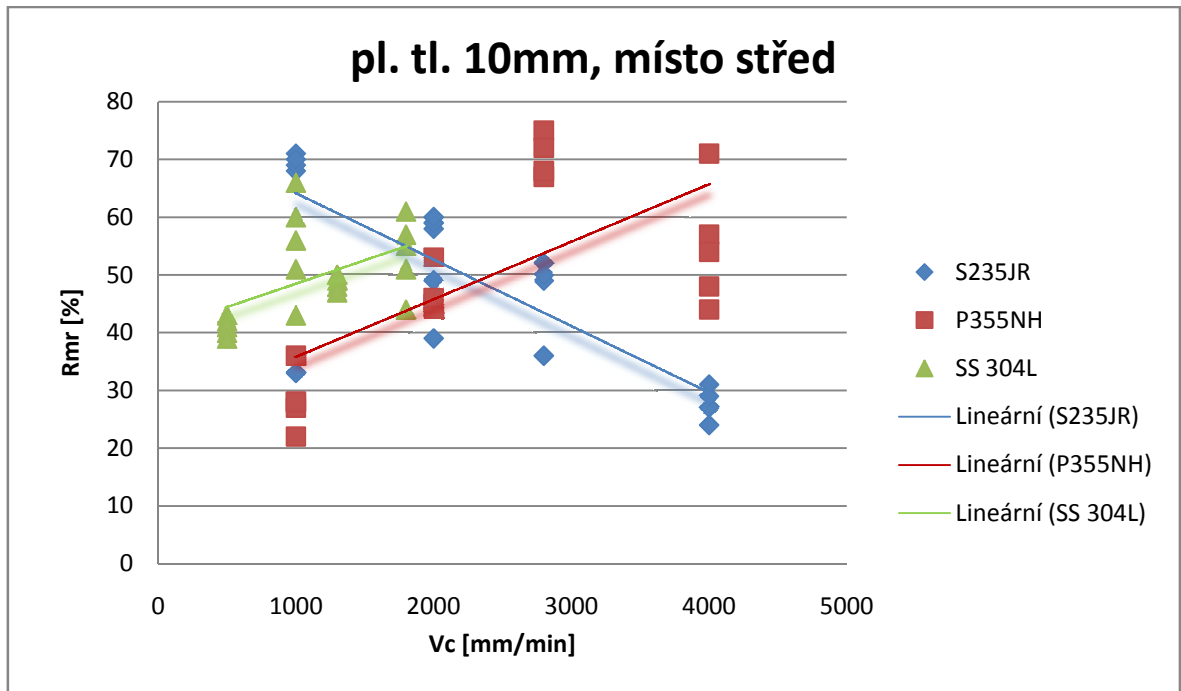
Graf. 34. Trend drsnosti Ra po tloušťce mat. AISI 304L tl. 10mm

Graf trendu průběhu drsnosti po tloušťce materiálu ukazuje, že se drsnost po tloušťce postupně zvyšuje. Nejvyšší drsnost Ra byla naměřena při řezné rychlosti 500mm/m. Nejmenší rozpětí drsností je u řezné rychlosti 1800mm/min a proto je i nejvhodnější.



Graf. 35. Trend drsnosti Ra na řezné rychlosti Vc pro vzorky tl. 10mm

U materiálu AISI 304L drsnost Ra se zvyšující řeznou rychlostí nejprve konvexně klesala a následně rostla. Nejvhodnější řeznou rychlostí je 1300 mm/min. U materiálu S235JR je vidět konkávní průběh a se zvyšující se řeznou rychlostí klesá drsnost a nejvhodnější řeznou rychlost 2900mm/min. U materiálu P355NH je vidět konvexní průběh a nejvhodnější řeznou rychlost 2400mm/min.



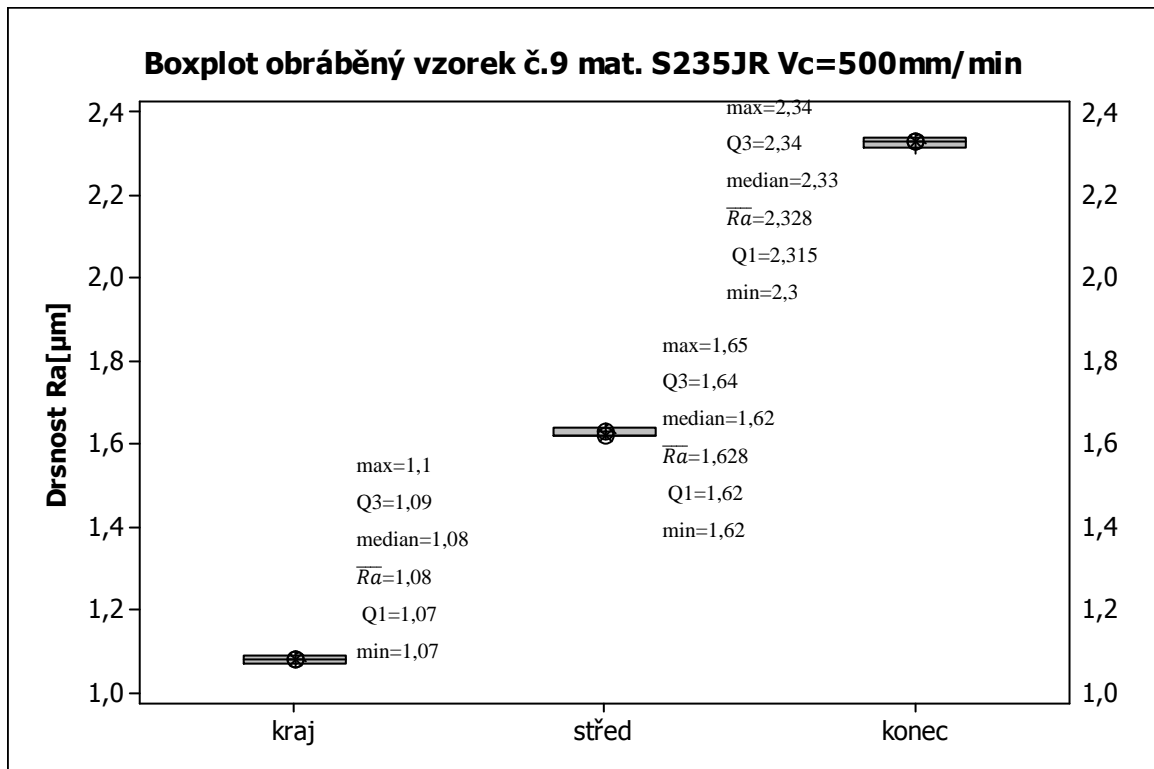
Graf. 36. Závislost Rmr na řezné rychlosti pro pl. tl. 10mm

U materiálu S235JR je vidět snižující se trend Rmr na zvyšující se řezné rychlosti. U materiálů P355NH a AISI 304L je trend opačný.

5.3 Naměřené hodnoty tl. Plechu 15mm:

mat. S235JR												Vc= 500 mm/min	
Vzorek č. 9	Místo	Ra [μm]	\bar{Ra} [μm]	s [μm]	v [%]	rz [μm]	\bar{Rz} [μm]	s [μm]	v [%]	rmr [%]	\bar{rmr} [%]	s [μm]	
	kraj	1,10	1,08	0,011	1,014	7,95	7,77	1,136	14,607	66,00	68,4	1,356	
		1,08				8,39				70,00			
		1,08				8,44				69,00			
		1,07				5,54				69,00			
		1,07				8,55				68,00			
	střed	1,63	1,63	0,012	0,716	12,55	12,67	0,312	2,458	49,00	51,4	1,356	
		1,62				12,45				51,00			
		1,62				12,42				52,00			
		1,62				12,68				53,00			
		1,65				13,27				52,00			
	konec	2,30	2,33	0,015	0,631	14,00	14,08	0,155	1,098	46,00	45,4	3,774	
		2,33				13,88				48,00			
		2,33				14,25				48,00			
		2,34				13,99				47,00			
2,34		14,27				38,00							

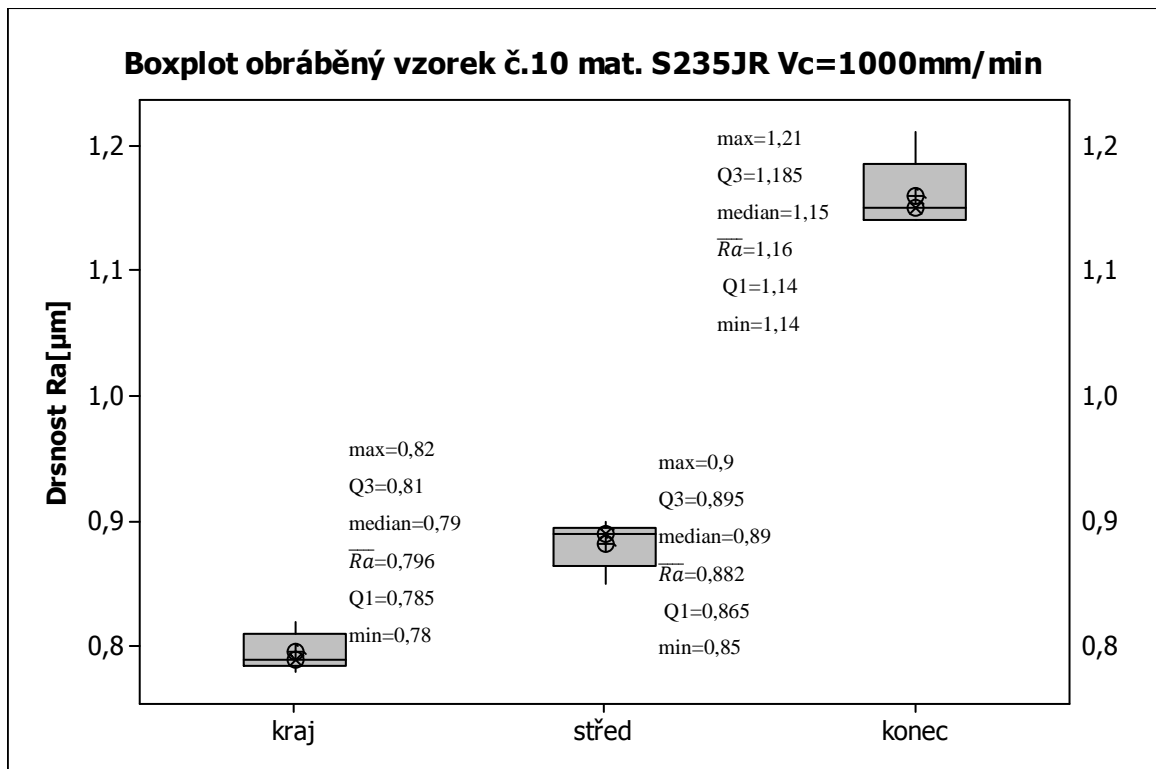
Tab. 27. Naměřené hodnoty jakosti povrchu vzorku č. 9



Graf. 37. Jakost povrchu (boxplot) vzorek č. 9

mat. S235JR												
Vc= 1000 mm/min												
Vzorek č. 10	Místo	Ra [μm]	\bar{Ra} [μm]	s [μm]	v [%]	rz [μm]	\bar{Rz} [μm]	s [μm]	v [%]	rmr [%]	\bar{rmr} [%]	s [μm]
	kraj	0,82	0,80	0,014	1,704	5,98	5,95	0,140	2,351	38,00	39,2	5,115
		0,80				5,85				41,00		
		0,79				5,78				30,00		
		0,78				5,93				42,00		
		0,79				6,19				45,00		
	střed	0,85	0,88	0,017	1,951	6,74	6,65	0,063	0,948	79,00	51,2	13,934
		0,89				6,62				43,00		
		0,88				6,57				44,00		
		0,90				6,71				44,00		
		0,89				6,62				46,00		
	konec	1,21	1,16	0,026	2,248	7,82	7,64	0,119	1,553	30,00	33,0	3,162
		1,15				7,53				29,00		
1,16		7,73				37,00						
1,14		7,51				36,00						
1,14		7,61				33,00						

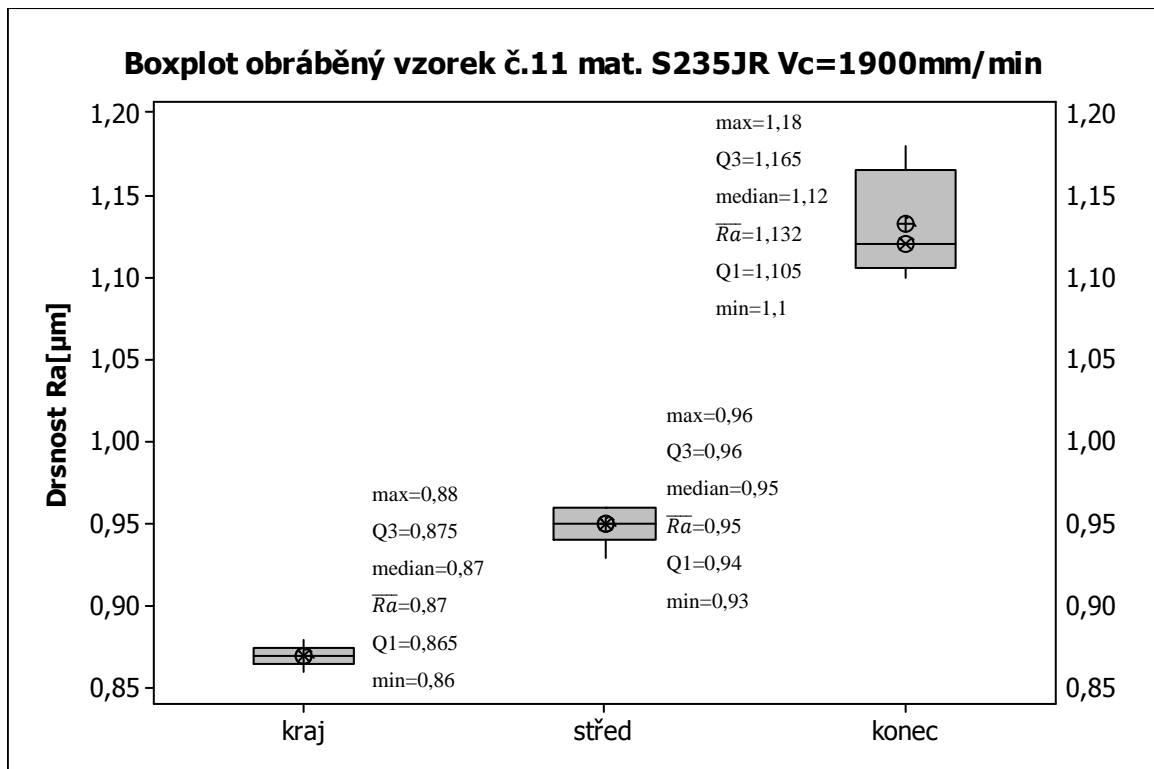
Tab. 28. Naměřené hodnoty jakosti povrchu vzorku č. 10



Graf. 38. Jakost povrchu (boxplot) vzorek č. 10

mat. S235JR												
Vc= 1900 mm/min												
Vzorek č. 11	Místo	Ra [μm]	\bar{Ra} [μm]	s [μm]	v [%]	rz [μm]	\bar{Rz} [μm]	s [μm]	v [%]	rmr [%]	\bar{rmr} [%]	s [μm]
	kraj	0,87	0,87	0,006	0,727	5,77	5,79	0,250	4,311	48,00	50,4	7,915
		0,87				5,46				61,00		
		0,87				5,64				58,00		
		0,86				5,90				40,00		
		0,88				6,20				45,00		
střed	0,93	0,95	0,011	1,153	6,36	6,44	0,046	0,713	51,00	59,2	5,636	
	0,96				6,43				54,00			
	0,95				6,43				62,00			
	0,95				6,46				65,00			
	0,96				6,50				64,00			
konec	1,10	1,13	0,029	2,585	6,66	6,71	0,135	2,006	39,00	34,2	6,369	
	1,11				6,64				36,00			
	1,15				6,55				41,00			
	1,18				6,78				23,00			
	1,12				6,94				32,00			

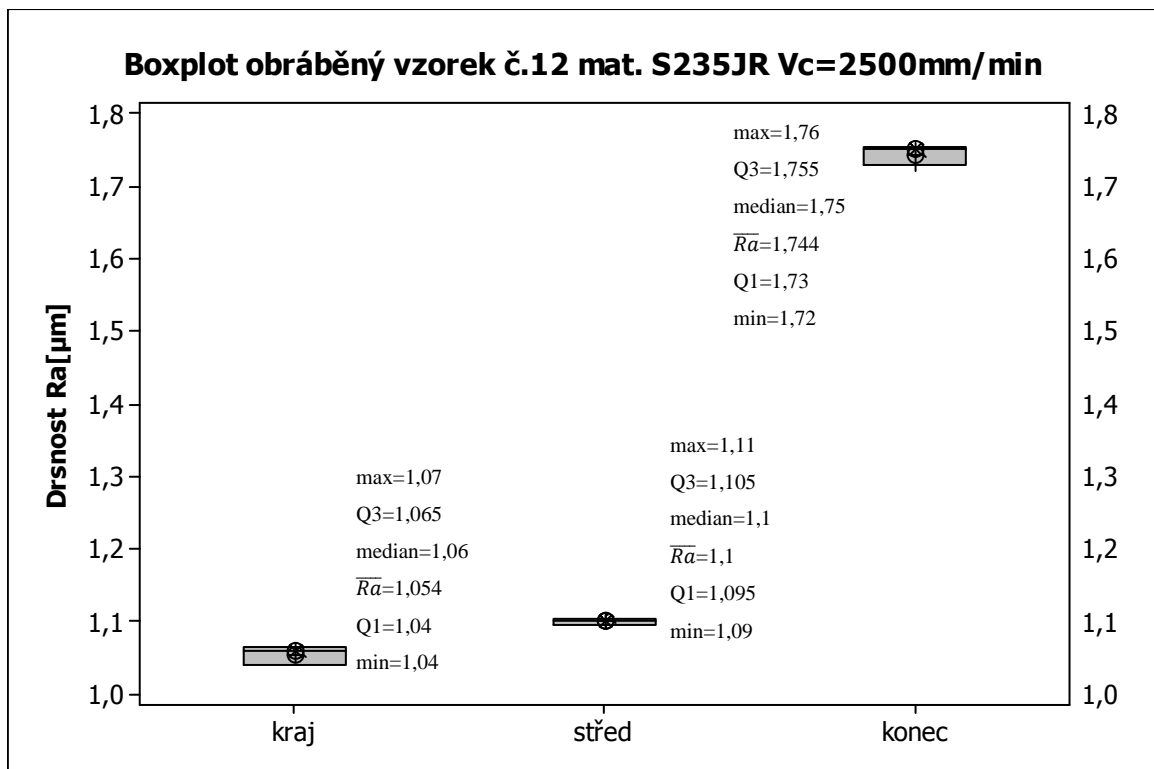
Tab. 29. Naměřené hodnoty jakosti povrchu vzorku č. 11



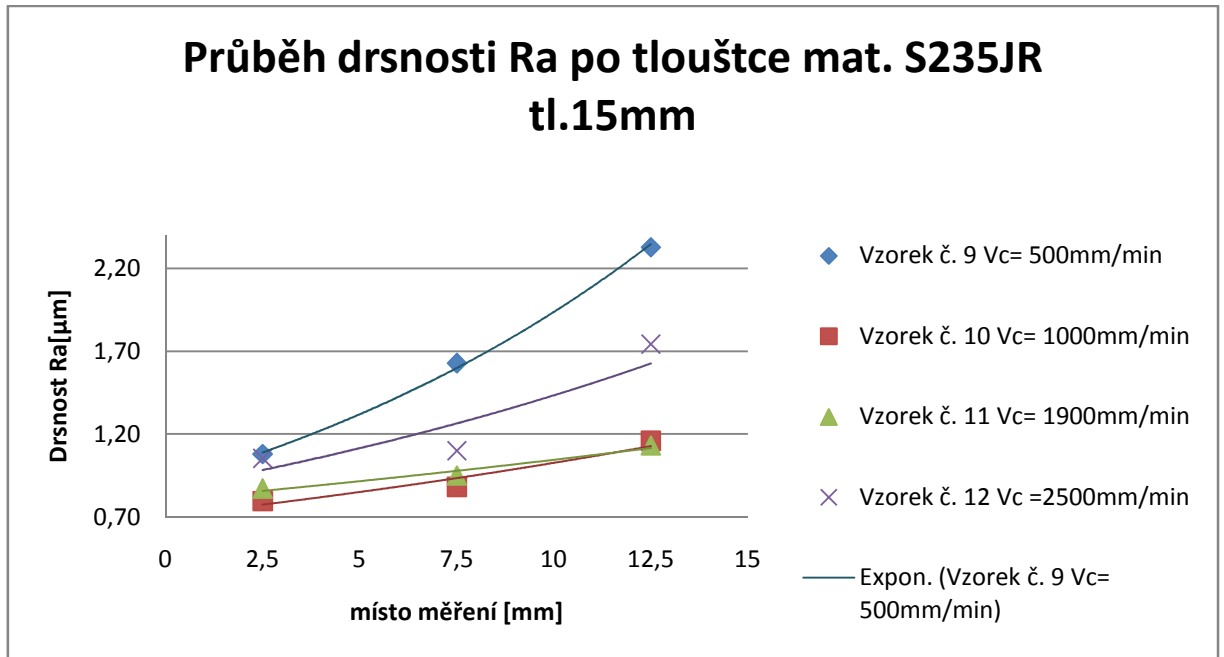
Graf. 39. Jakost povrchu (boxplot) vzorek č. 11

mat. S235JR											
Vc= 2500 mm/min											
Místo	Ra	\bar{Ra}	s	v	rz	\bar{Rz}	s	v	rmr	\overline{rmr}	s
	[μm]	[μm]	[μm]	[%]	[μm]	[μm]	[μm]	[%]	[%]	[%]	[μm]
kraj	1,04	1,05	0,012	1,139	5,60	5,70	0,077	1,358	62,00	65,0	2,191
	1,04				5,62				66,00		
	1,06				5,76				63,00		
	1,07				5,80				68,00		
	1,06				5,70				66,00		
střed	1,11	1,10	0,006	0,575	7,08	7,02	0,070	0,997	30,00	28,6	1,020
	1,10				7,12				27,00		
	1,10				6,99				28,00		
	1,10				6,96				29,00		
	1,09				6,94				29,00		
konec	1,75	1,74	0,014	0,778	12,00	12,55	0,363	2,893	64,00	65,4	1,356
	1,72				12,90				68,00		
	1,76				12,33				65,00		
	1,74				12,53				65,00		
	1,75				12,98				65,00		

Tab. 30. Naměřené hodnoty jakosti povrchu vzorku č. 12



Graf. 40. Jakost povrchu (boxplot) vzorek č. 12

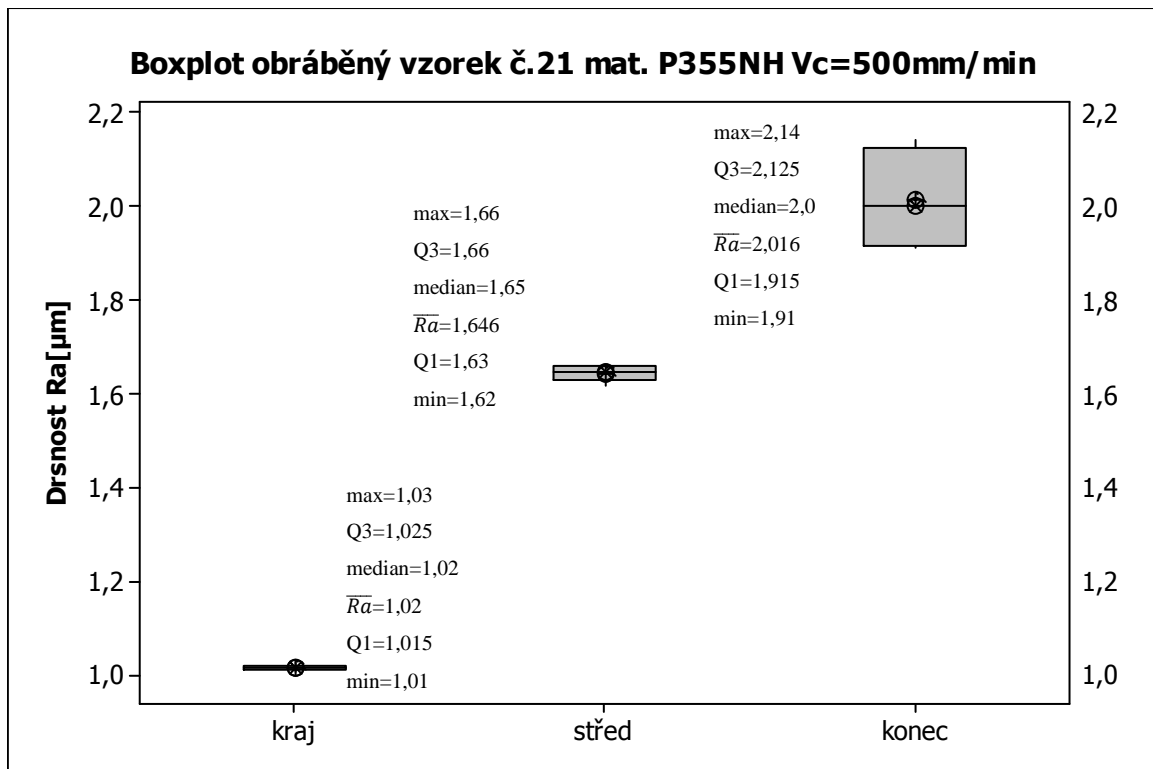


Graf. 41. Trend drsnosti R_a po tloušťce mat. S235JR tl. 15mm

Graf trendu průběhu drsnosti po tloušťce materiálu ukazuje, že se drsnost po tloušťce postupně zvyšuje. Nejvyšší drsnost R_a byla naměřena při řezné rychlosti 500mm/m. Nejmenší rozpětí drsností je u řezné rychlosti 1900mm/min a proto je i nejvhodnější.

mat. P355NH												Vc= 500 mm/min	
Vzorek č. 21	Místo	Ra [μm]	\bar{Ra} [μm]	s [μm]	v [%]	rz [μm]	\bar{Rz} [μm]	s [μm]	v [%]	rmr [%]	\bar{rmr} [%]	s [μm]	
	kraj	1,02	1,02	0,006	0,620	7,1	7,04	0,110	1,564	73,00	73,0	5,367	
		1,02				6,96				75,00			
		1,02				6,96				75,00			
		1,03				7,23				79,00			
		1,01				6,95				63,00			
	střed	1,62	1,65	0,015	0,909	10,14	10,05	0,113	1,122	80,00	80,8	1,470	
		1,64				9,96				83,00			
		1,66				10,01				79,00			
		1,65				10,22				82,00			
		1,66				9,92				80,00			
	konec	1,91	2,02	0,095	4,702	12,94	12,83	0,267	2,077	61,00	53,4	4,317	
1,92		12,74				49,00							
2,00		12,48				52,00							
2,11		12,73				55,00							
2,14		13,28				50,00							

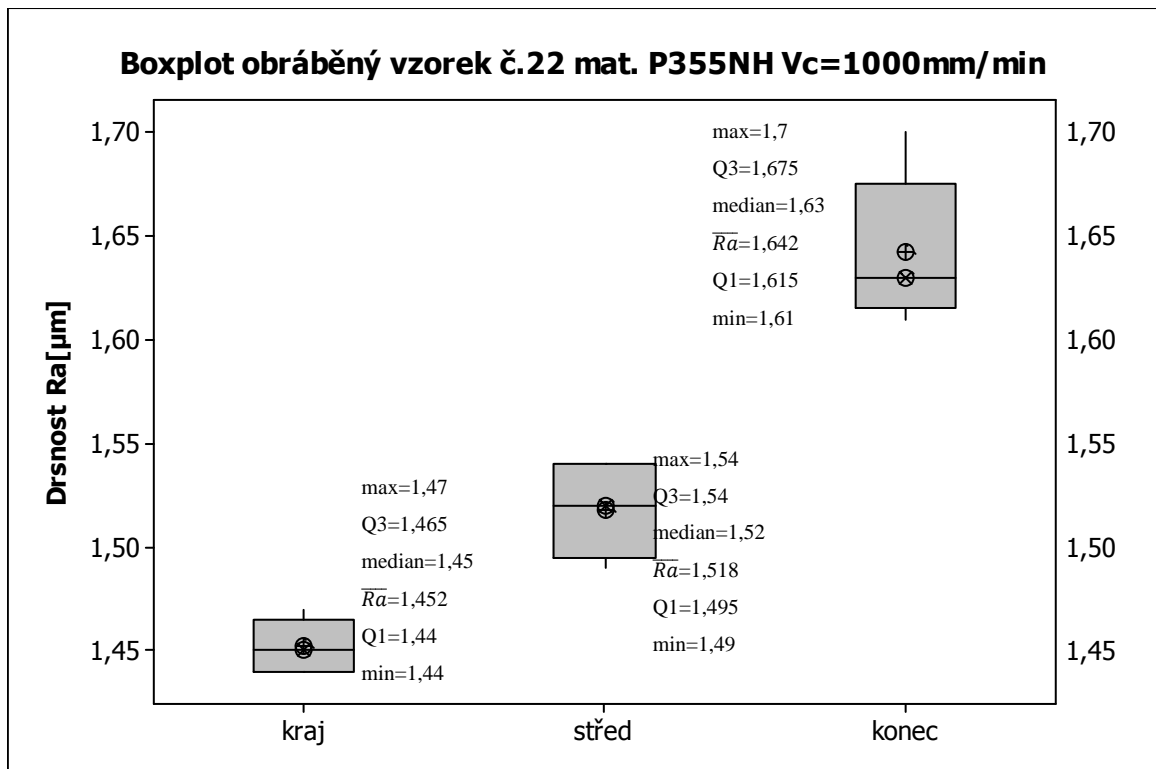
Tab. 31. Naměřené hodnoty jakosti povrchu vzorku č. 21



Graf. 42. Jakost povrchu (boxplot) vzorek č. 21

mat. P355NH												Vc= 1000 mm/min	
Vzorek č. 22	Místo	Ra [μm]	\bar{Ra} [μm]	s [μm]	v [%]	rz [μm]	\bar{Rz} [μm]	s [μm]	v [%]	rmr [%]	\bar{rmr} [%]	s [μm]	
	kraj	1,45	1,45	0,012	0,803	10,52	10,95	0,366	3,346	74,00	76,6	2,059	
		1,44				10,74				75,00			
		1,44				10,74				80,00			
		1,46				11,22				77,00			
		1,47				11,52				77,00			
	střed	1,54	1,52	0,020	1,344	11,50	11,66	0,121	1,041	60,00	62,0	2,280	
		1,49				11,60				63,00			
		1,50				11,68				60,00			
		1,52				11,67				66,00			
		1,54				11,87				61,00			
	konec	1,70	1,64	0,032	1,941	12,31	11,47	0,445	3,877	91,00	90,0	2,966	
		1,65				11,43				93,00			
1,63		11,36				93,00							
1,62		11,25				87,00							
1,61		11,00				86,00							

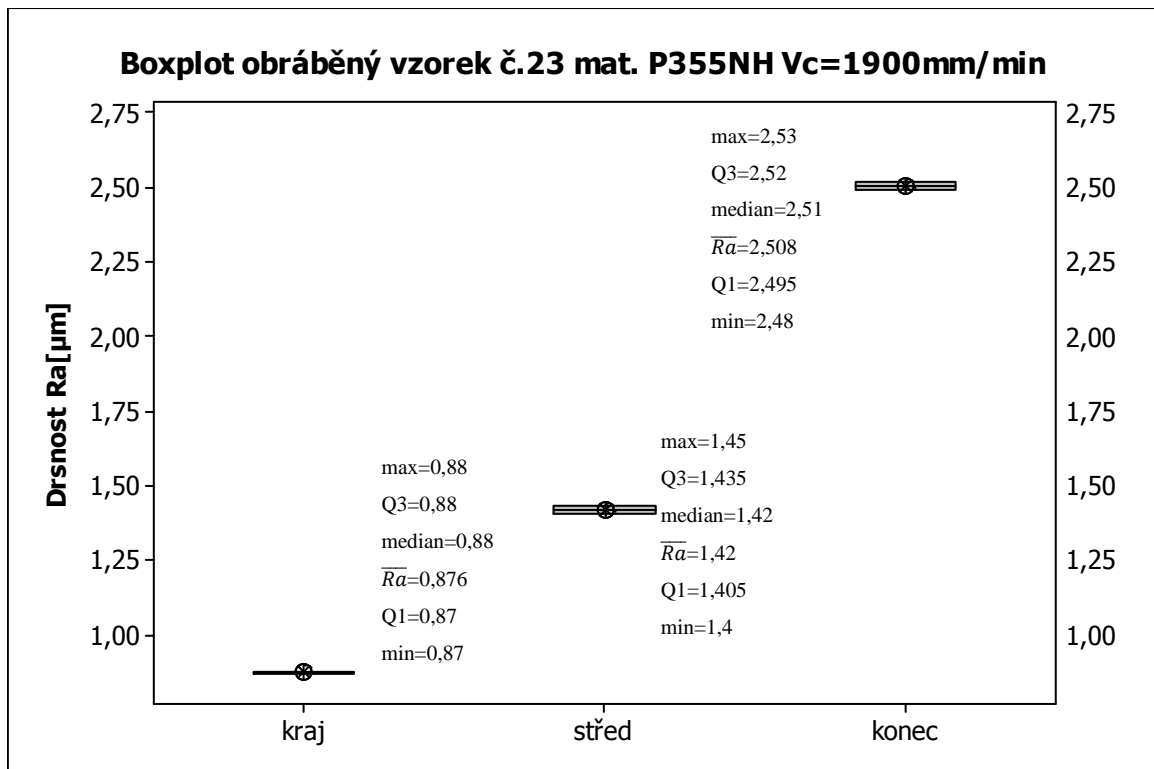
Tab. 32. Naměřené hodnoty jakosti povrchu vzorku č. 22



Graf. 43. Jakost povrchu (boxplot) vzorek č. 22

mat. P355NH												Vc= 1900 mm/min	
Vzorek č. 23	Místo	Ra [μm]	\bar{Ra} [μm]	s [μm]	v [%]	rz [μm]	\bar{Rz} [μm]	s [μm]	v [%]	rmr [%]	\bar{rmr} [%]	s [μm]	
	kraj	0,88	0,88	0,005	0,559	4,54	4,56	0,043	0,951	50,00	47,2	2,482	
		0,87				4,57				48,00			
		0,88				4,64				46,00			
		0,88				4,52				49,00			
		0,87				4,53				43,00			
	střed	1,40	1,42	0,017	1,178	9,04	8,82	0,137	1,550	59,00	59,8	1,327	
		1,41				8,64				62,00			
		1,42				8,72				60,00			
		1,42				8,83				60,00			
		1,45				8,87				58,00			
	konec	2,48	2,51	0,016	0,638	16,59	16,23	0,193	1,188	52,00	59,8	8,588	
		2,51				16,13				47,00			
2,53		16,24				66,00							
2,51		16,13				66,00							
2,51		16,04				68,00							

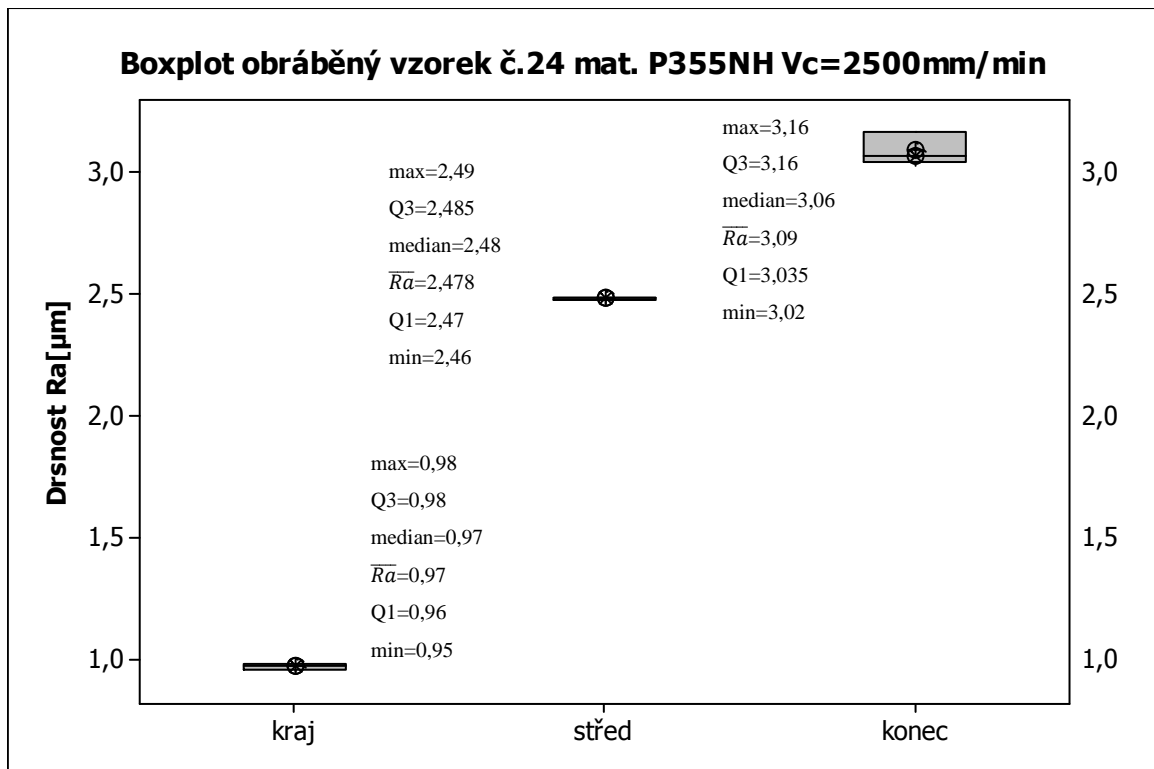
Tab. 33. Naměřené hodnoty jakosti povrchu vzorku č. 23



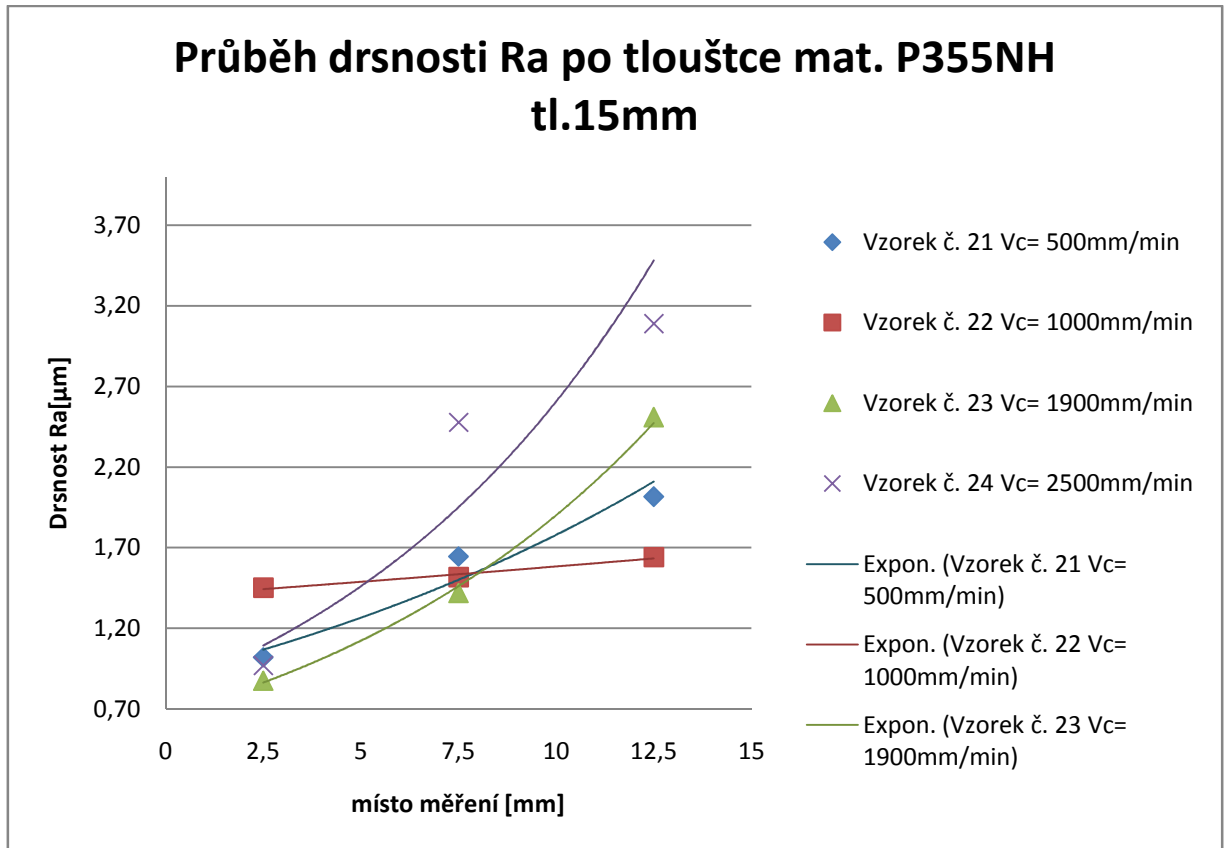
Graf. 44. Jakost povrchu (boxplot) vzorek č. 23

mat. P355NH											
Vc= 2500 mm/min											
Místo	Ra	\bar{Ra}	s	v	rz	\bar{Rz}	s	v	rmr	\bar{rmr}	s
	[μm]	[μm]	[μm]	[%]	[μm]	[μm]	[μm]	[%]	[%]	[%]	[μm]
kraj	0,95	0,97	0,011	1,129	5,56	5,91	0,188	3,178	73,00	62,0	5,762
	0,97				5,95				62,00		
	0,97				5,90				60,00		
	0,98				6,02				58,00		
	0,98				6,11				57,00		
střed	2,49	2,48	0,010	0,395	18,47	18,50	0,130	0,702	11,00	13,8	1,470
	2,46				18,73				14,00		
	2,48				18,54				14,00		
	2,48				18,42				15,00		
	2,48				18,35				15,00		
konec	3,06	3,09	0,059	1,898	21,08	20,70	0,810	3,914	60,00	63,6	3,007
	3,02				19,68				65,00		
	3,05				19,82				66,00		
	3,16				21,17				60,00		
	3,16				21,75				67,00		

Tab. 34. Naměřené hodnoty jakosti povrchu vzorku č.24



Graf. 45. Jakost povrchu (boxplot) vzorek č. 24

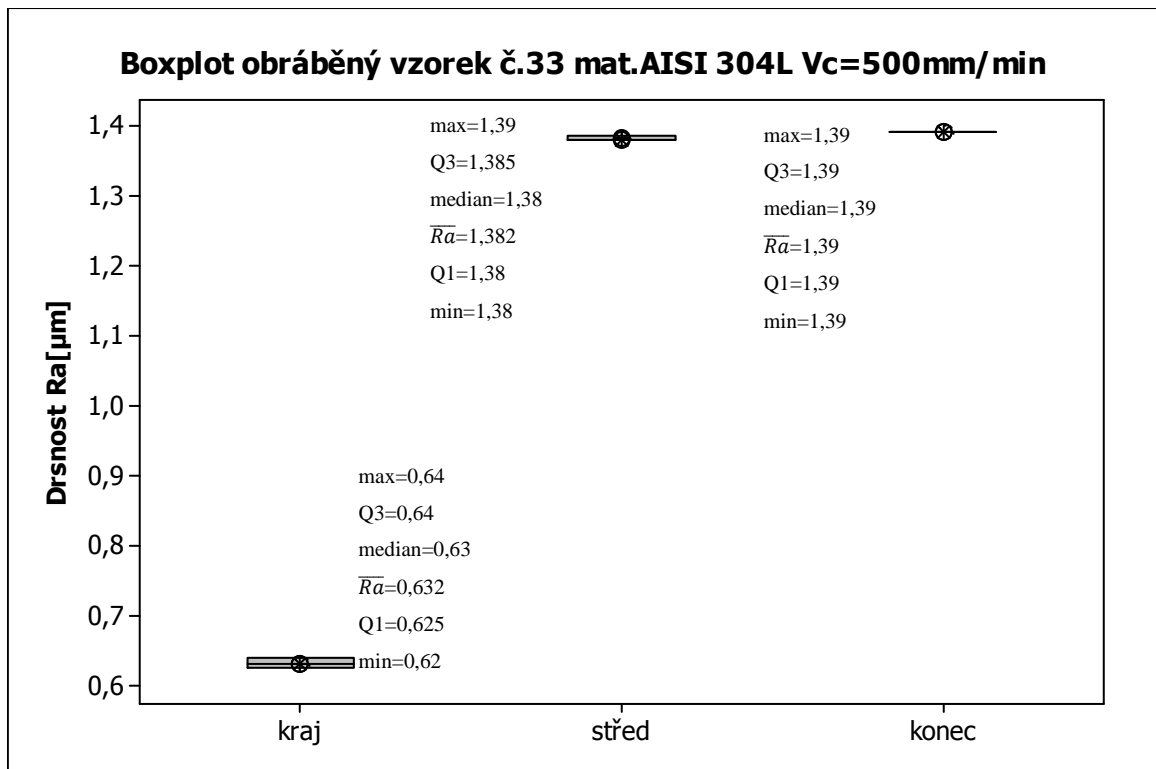


Graf. 46. Trend drsnosti Ra po tloušťce mat. P355NH tl. 15mm

Graf trendu průběhu drsnosti po tloušťce materiálu ukazuje, že se drsnost po tloušťce postupně zvyšuje. Nejvyšší drsnost R_a byla naměřena při řezné rychlosti 2500mm/m. Nejvhodnější řezná rychlost je 1900mm/min.

mat. 304L												
Vc= 500 mm/min												
Vzorek č. 33	Místo	Ra [μm]	\bar{Ra} [μm]	s [μm]	v [%]	rz [μm]	\bar{Rz} [μm]	s [μm]	v [%]	rmr [%]	\bar{rmr} [%]	s [μm]
	kraj	0,62	0,63	0,007	1,184	4,06	4,08	0,082	2,015	62,00	61,0	2,608
		0,63				4,06				65,00		
		0,64				4,01				60,00		
		0,64				4,03				57,00		
		0,63				4,24				61,00		
	střed	1,38	1,38	0,004	0,289	7,46	7,45	0,115	1,540	45,00	44,2	3,709
		1,39				7,50				41,00		
		1,38				7,52				49,00		
		1,38				7,55				39,00		
		1,38				7,23				47,00		
	konec	1,39	1,39	0,000	0,000	6,25	6,24	0,023	0,371	37,00	37,0	0,000
1,39		6,26				37,00						
1,39		6,22				37,00						
1,39		6,21				37,00						
1,39		6,27				37,00						

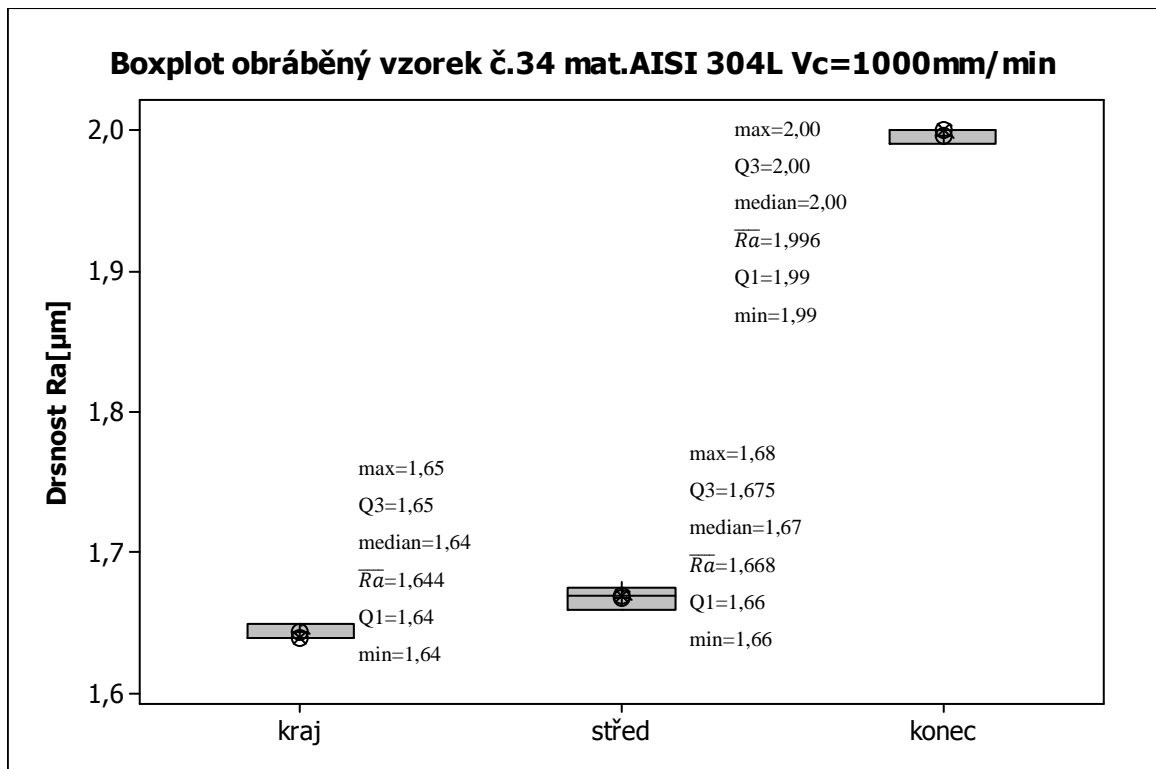
Tab. 35. Naměřené hodnoty jakosti povrchu vzorku č. 33



Graf. 47. Jakost povrchu (boxplot) vzorek č. 33

mat. 304L												
Vc= 1000 mm/min												
Vzorek č. 34	Místo	Ra [μm]	\bar{Ra} [μm]	s [μm]	v [%]	rz [μm]	\bar{Rz} [μm]	s [μm]	v [%]	rmr [%]	\bar{rmr} [%]	s [μm]
	kraj	1,64	1,64	0,005	0,298	7,74	7,48	0,212	2,835	57,00	59,0	1,095
		1,64				7,27				60,00		
		1,64				7,19				60,00		
		1,65				7,61				59,00		
		1,65				7,59				59,00		
střed	1,68	1,67	0,007	0,449	9,58	9,66	0,051	0,526	74,00	74,0	0,632	
	1,66				9,69				74,00			
	1,66				9,68				74,00			
	1,67				9,73				75,00			
	1,67				9,64				73,00			
konec	1,99	2,00	0,005	0,245	9,01	9,10	0,049	0,536	32,00	31,4	0,800	
	2,00				9,10				32,00			
	2,00				9,13				32,00			
	1,99				9,12				31,00			
	2,00				9,15				30,00			

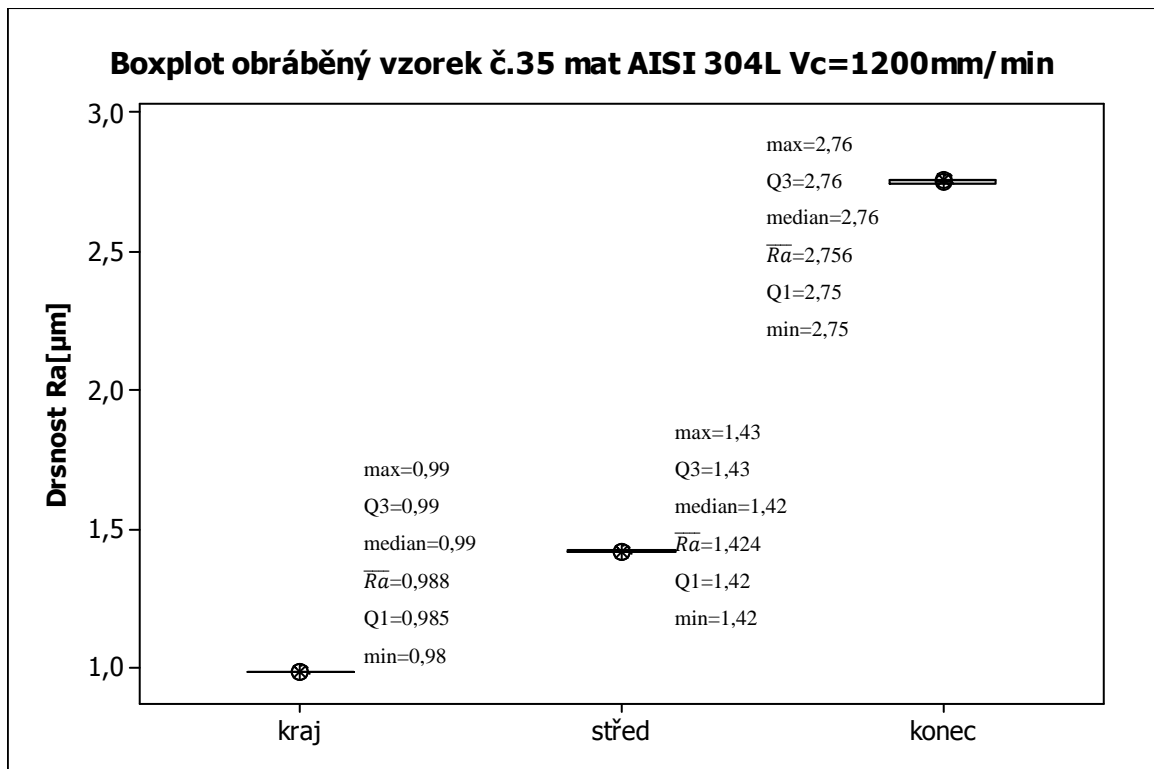
Tab. 36. Naměřené hodnoty jakosti povrchu vzorku č. 34



Graf. 48. Jakost povrchu (boxplot) vzorek č. 34

mat. 304L												Vc= 1200 mm/min		
Vzorek č. 35	Místo	Ra [μm]	\bar{Ra} [μm]	s [μm]	v [%]	rz [μm]	\bar{Rz} [μm]	s [μm]	v [%]	rmr [%]	\bar{rmr} [%]	s [μm]		
	kraj	0,99	0,99	0,004	0,405	4,95	4,94	0,019	0,392	32,00	32,0	0,632		
		0,98				4,96				33,00				
		0,99				4,93				32,00				
		0,99				4,96				32,00				
		0,99				4,91				31,00				
	střed	1,42	1,42	0,005	0,344	7,64	7,61	0,064	0,846	48,00	47,8	2,713		
		1,43				7,58				52,00				
		1,43				7,71				46,00				
		1,42				7,52				49,00				
		1,42				7,58				44,00				
	konec	2,75	2,76	0,005	0,178	13,40	13,45	0,048	0,360	51,00	51,6	0,490		
		2,76				13,38				52,00				
2,75		13,51				51,00								
2,76		13,47				52,00								
2,76		13,47				52,00								

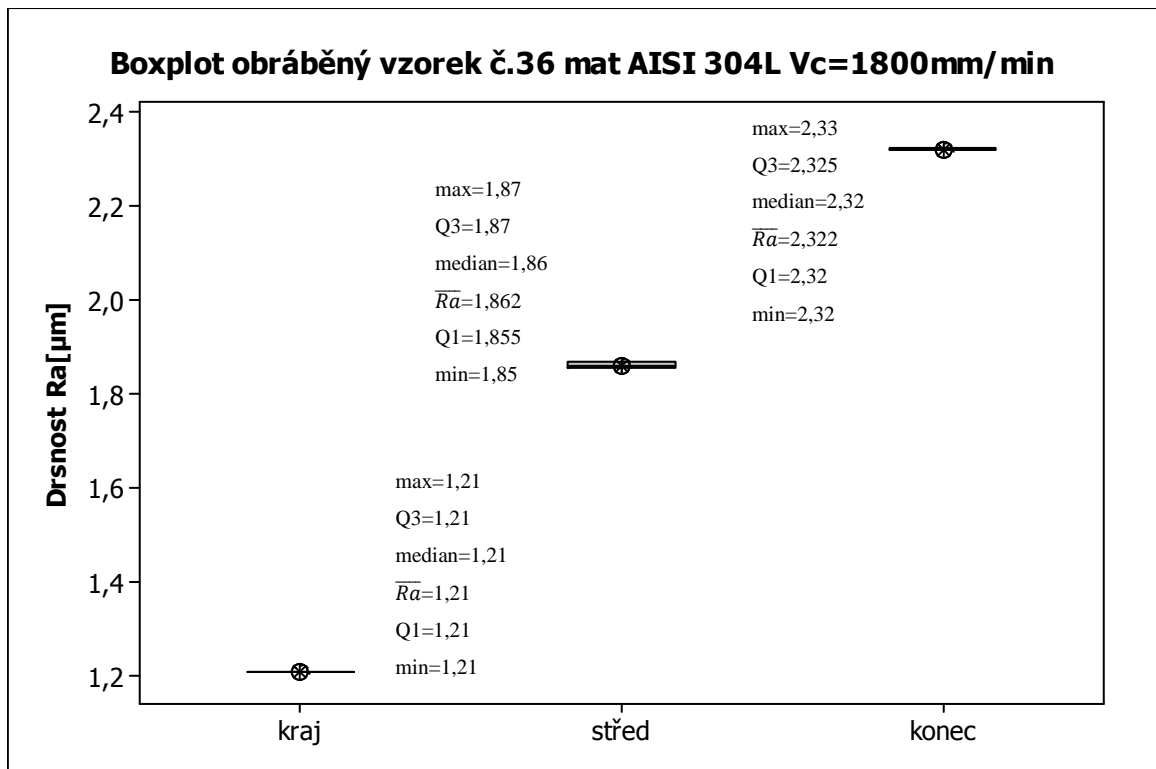
Tab. 37. Naměřené hodnoty jakosti povrchu vzorku č. 35



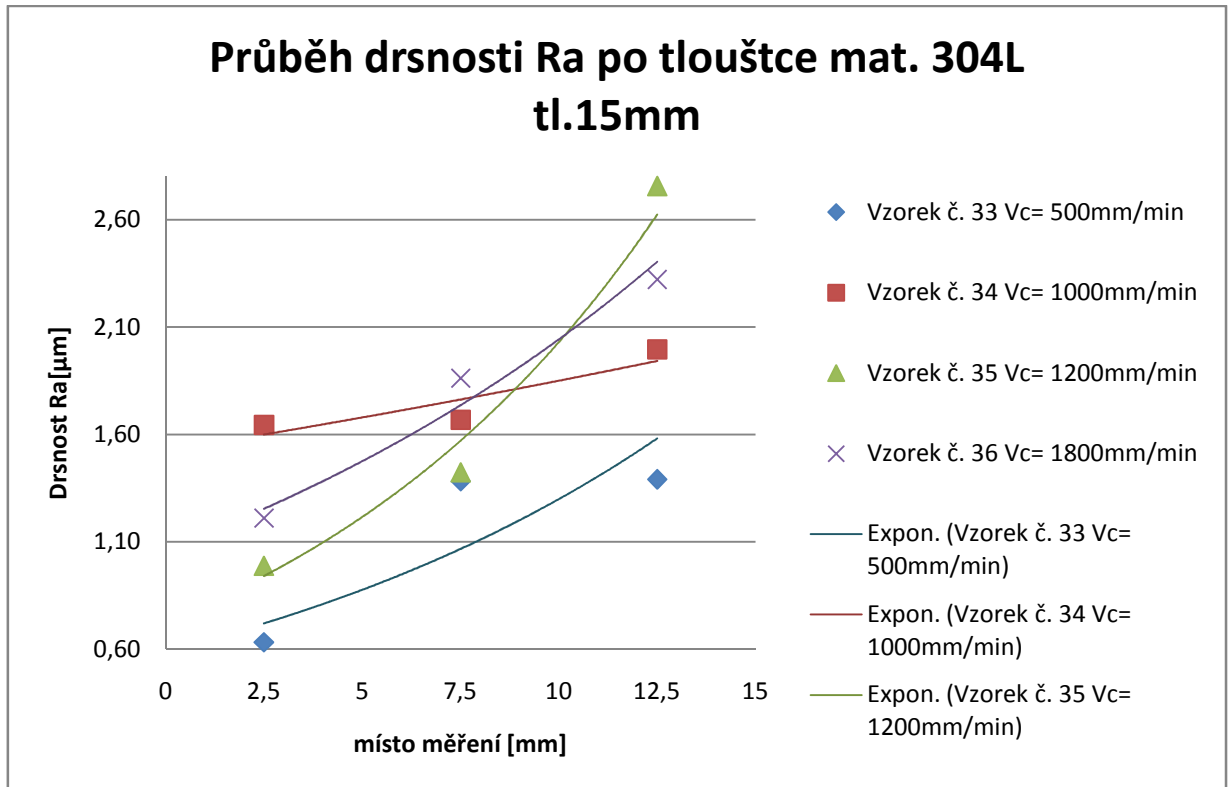
Graf. 49. Jakost povrchu (boxplot) vzorek č. 35

mat. 304L												
Vc= 1800 mm/min												
Vzorek č. 36	Místo	Ra [μm]	\bar{Ra} [μm]	s [μm]	v [%]	rz [μm]	\bar{Rz} [μm]	s [μm]	v [%]	r _{mr} [%]	\bar{r}_{mr} [%]	s [μm]
	kraj	1,21	1,21	0,000	0,000	6,21	6,17	0,047	0,763	39,00	41,6	1,497
		1,21				6,23				42,00		
		1,21				6,14				41,00		
		1,21				6,18				43,00		
		1,21				6,10				43,00		
	střed	1,85	1,86	0,007	0,402	9,44	9,37	0,079	0,845	44,00	45,8	0,980
		1,86				9,48				47,00		
		1,86				9,33				46,00		
		1,87				9,29				46,00		
		1,87				9,29				46,00		
	konec	2,33	2,32	0,004	0,172	10,55	10,40	0,083	0,800	45,00	44,4	0,490
2,32		10,42				45,00						
2,32		10,38				44,00						
2,32		10,33				44,00						
2,32		10,32				44,00						

Tab. 38. Naměřené hodnoty jakosti povrchu vzorku č. 36

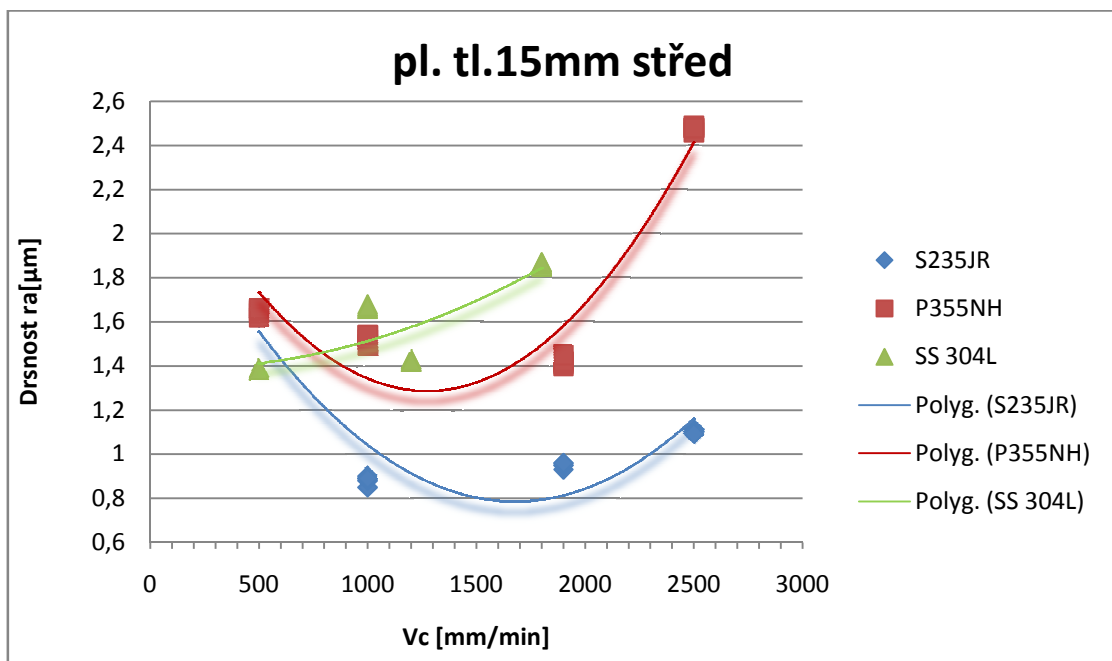


Graf. 50. Jakost povrchu (boxplot) vzorek č. 36



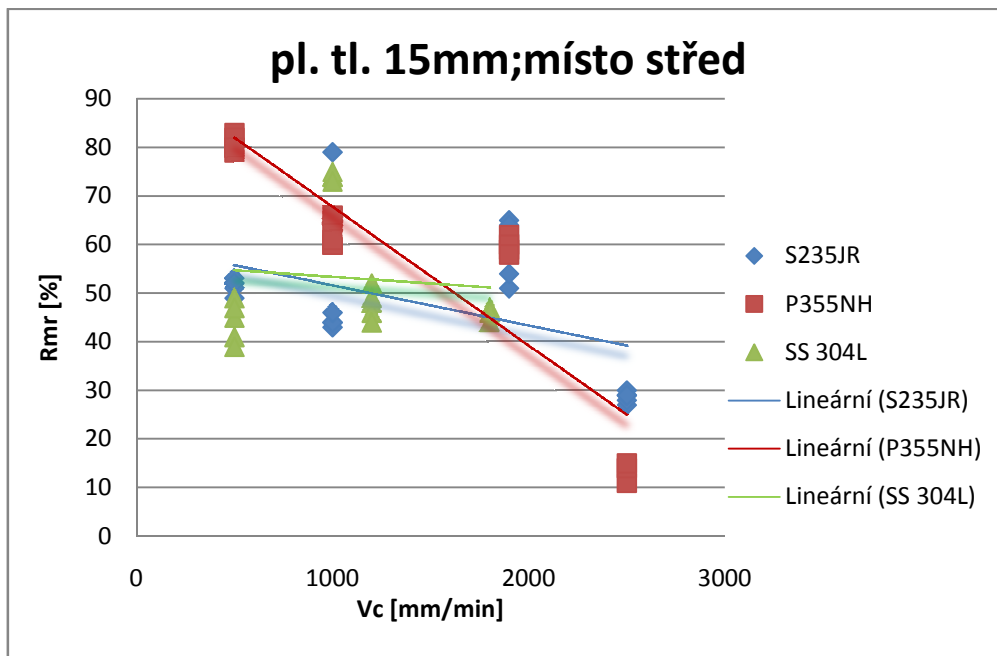
Graf. 51. Trend drsnosti Ra po tloušťce mat. AISI 304L tl. 15mm

Graf trendu průběhu drsnosti po tloušťce materiálu ukazuje, že se drsnost po tloušťce postupně zvyšuje. Nejvyšší drsnost Ra byla naměřena při řezné rychlosti 1200mm/m. Nejmenší rozpětí drsností je u řezné rychlosti 1000mm/min.



Graf. 52. Trend drsnosti Ra na řezné rychlosti Vc pro vzorky tl. 15mm

U materiálu S235JR a P355NH drsnost Ra se zvyšující řeznou rychlostí nejprve klesala a následně rostla. U materiálu AISI 304L pouze vzrůstala. V místě nejnižší drsnosti pro materiál S235JR odpovídá hodnota řezné rychlosti přibližně 1700mm/min. Pro materiál P355NH odpovídá 1300mm/min.



Graf. 53. Závislost Rmr na řezné rychlosti pro pl. tl. 15mm

U všech měřených materiálů je snižující trend hodnot Rmr v závislosti na řezné rychlosti.

5.4 Vyhodnocení drsnosti:

Pro všechny měřené vzorky je společná charakteristika zvyšujícího trendu drsnosti po tloušťce materiálu, která lze vidět i pouhým okem viz. obrázek níž. Velký vliv na tuhle charakteristiku má použitá řezná rychlost.



Obr. 43. Vzorek č. 9 $V_c = 500 \text{ mm/min}$

Doporučené řezné rychlosti:

Mat.	tl. [mm]	V_c dle nejmenšího rozpětí drsnosti [mm/min]	V_c místě střed, dle trendu drsnosti na v_c [mm/min]
S235JR	5	3600	2250
P355NH	5	3600	4000
AISI 304L	5	1700	1100
S235JR	10	2800	2900
P355NH	10	2800	2400
AISI 304L	10	1800	1300
S235JR	15	1900	1700
P355NH	15	1900	1300
AISI 304L	15	1000	500

Tab. 39. Doporučené řezné rychlosti

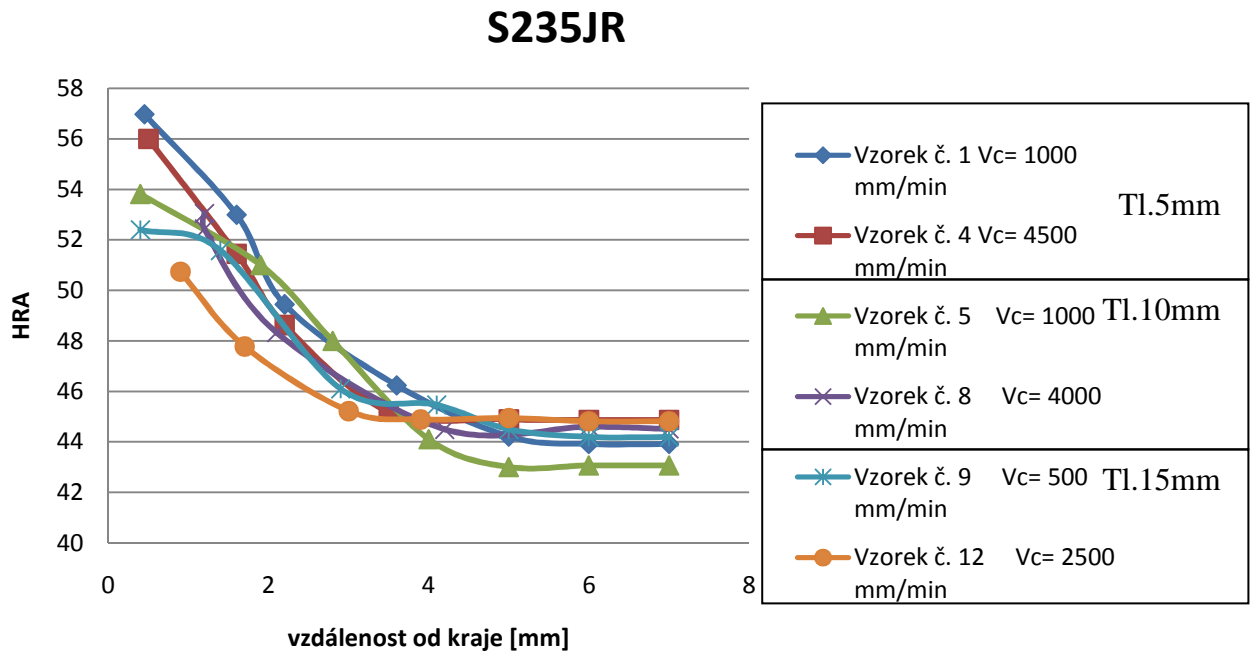
Optimalizace ideální řezné rychlosti pro obrábění plasmou je složitá hned z několika důvodů. Ekonomická stránka věci požaduje co nejvyšší řeznou rychlost => větší produktivitu práce ve stejném časovém intervalu. Nejvhodnější povrch po obrábění by měl mít co nejmenší rozpětí drsností. Příliš velká řezná rychlost, jak je vidět z grafů drsnosti R_a na řezné rychlosti (měřeném v místě u prostřed vzorků) neposkytuje jakostní povrch obrobku. Při nízké řezné rychlosti však povrch obrobku taky nedosahuje ideálních parametrů. Materiál „teče“ a v místě měření u konce vzorku je drsnost o poznání vyšší, než na kraji a uprostřed.

VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ TVRDOSTI

5.5 Naměřené hodnoty:

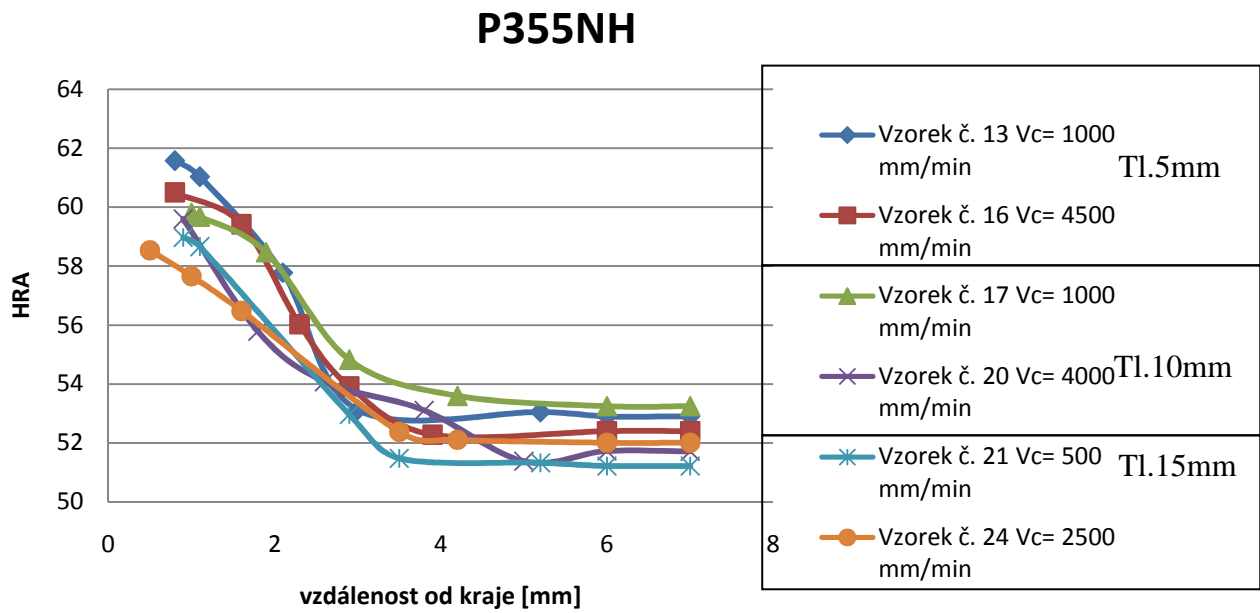
	tl. 5				tl. 10				tl. 15			
	S235JR	Vzorek č. 1 Vc= 1000 mm/min		Vzorek č. 4 Vc= 4500 mm/min		Vzorek č. 5 Vc= 1000 mm/min		Vzorek č. 8 Vc= 4000 mm/min		Vzorek č. 9 Vc= 500 mm/min		Vzorek č. 12 Vc= 2500 mm/min
x[mm]		hra	x[mm]	hra	x[mm]	hra	x[mm]	hra	x[mm]	hra	x[mm]	hra
0,45		56,97	0,5	56,00	0,4	53,82	0,9	53,04	0,4	52,40	0,9	50,74
1,6		52,99	1,6	51,45	1,9	51,00	1,2	52,43	1,4	51,58	1,7	47,78
2,2		49,44	2,2	48,63	2,8	48,00	1,2	48,33	2,9	46,10	3	45,22
3,6		46,24	3,5	45,20	4	44,11	2,1	44,5	4,1	45,47	3,9	44,89
5		44,22	5	44,90	5	43,01	4,2	44,6	5	44,50	5	44,95
6		43,92	6	44,87	6	43,07	6	44,52	6	44,20	6	44,82
7		43,92	7	44,87	7	43,07	7	44,52	7	44,20	7	44,82
P355NH	Vzorek č. 13 Vc= 1000 mm/min		Vzorek č. 16 Vc= 4500 mm/min		Vzorek č. 17 Vc= 1000 mm/min		Vzorek č. 20 Vc= 4000 mm/min		Vzorek č. 21 Vc= 500 mm/min		Vzorek č. 24 Vc= 2500 mm/min	
	x[mm]	hra	x[mm]	hra	x[mm]	hra	x[mm]	hra	x[mm]	hra	x[mm]	hra
	0,8	61,57	0,8	60,50	1	59,79	0,9	59,60	0,9	58,97	0,5	58,54
	1,1	61,03	1,6	59,42	1,1	59,67	1,8	55,79	1,1	58,66	1	57,66
	2,1	57,78	2,3	56,03	1,9	58,47	2,6	54,08	2,9	52,97	1,6	56,48
	3	53,12	2,9	53,92	2,9	54,82	3,8	53,11	3,5	51,48	3,5	52,38
	5,2	53,05	3,9	52,28	4,2	53,60	5	51,38	5,2	51,33	4,2	52,11
	6	52,90	6	52,40	6	53,25	6	51,73	6	51,22	6	52,01
	7	52,90	7	52,40	7	53,25	7	51,72	7	51,22	7	52,01
AISI 304L	Vzorek č. 25 Vc= 500 mm/min		Vzorek č. 28 Vc=2 500 mm/min		Vzorek č. 29 Vc= 500 mm/min		Vzorek č. 32 Vc= 1800 mm/min		Vzorek č. 33 Vc= 500 mm/min		Vzorek č. 36 Vc= 1800 mm/min	
	x[mm]	hra	x[mm]	hra	x[mm]	hra	x[mm]	hra	x[mm]	hra	x[mm]	hra
	0,8	57,81	0,6	57,45	0,8	57,40	0,4	57,22	0,4	55,980	0,6	56,20
	1,5	57,65	1,4	57,92	1,6	57,38	0,6	57,01	0,6	55,900	1,1	56,10
	2,1	57,65	2,3	57,40	2,1	57,85	1,6	57,06	1,9	56,340	2,1	55,96
	2,6	57,8	3,3	57,21	3,2	58,02	3,3	57,24	3,8	56,190	2,5	55,97
	4	57,92	4,8	57,54	4	57,89	4,4	57,17	5	55,700	3,7	56,81
	5	57,62	6	57,60	5	57,66	5,1	57,23	6	56,250	4,2	56,47
	7	58,11	7	58,00	7	58,30	7	57,20	7	56,100	7	56,30

Tab. 40. Naměřené hodnoty tvrdosti



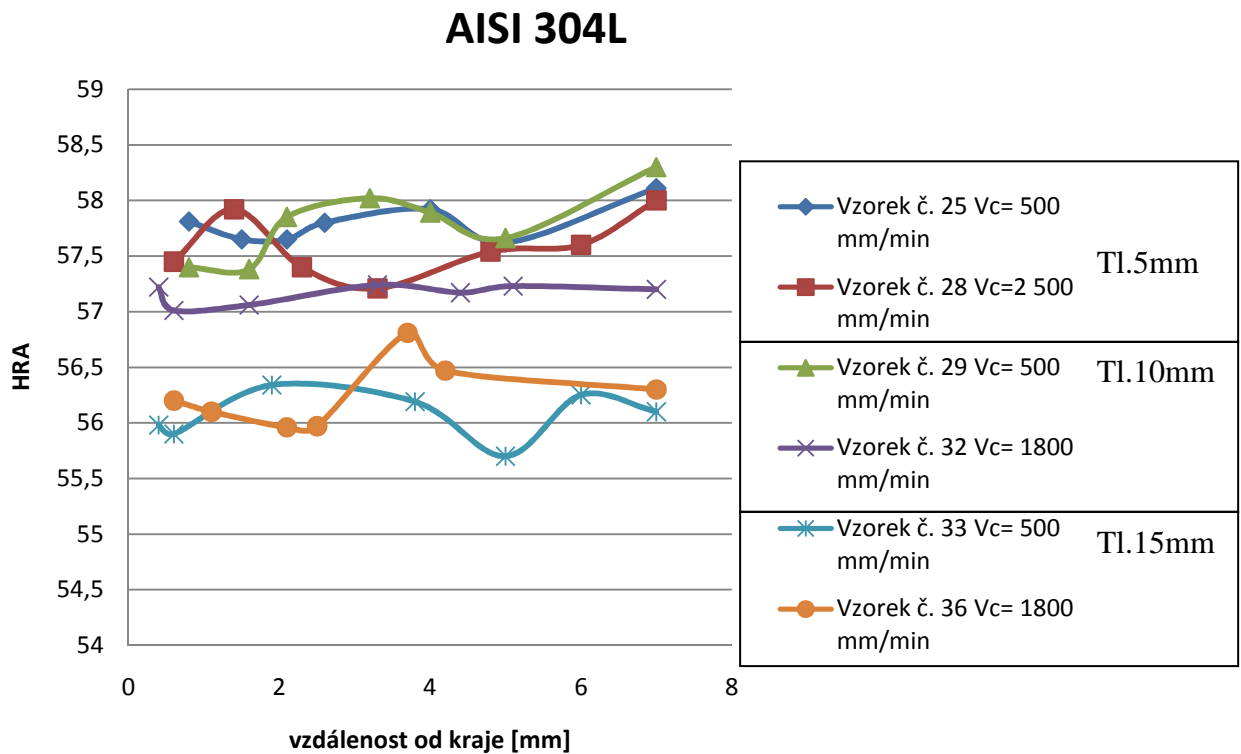
Graf. 54. Závislost tvrdosti od vzdálenosti od řezné hrany u mat. S235JR

Obráběný materiál S235JR byl v místě řezu tepelně ovlivněn a došlo ke změně struktury. Tepelně ovlivněná vzdálenost od kraje je kolem 2,5mm. Došlo k zakalení struktury v tepelně ovlivněné zóně díky obrovské teplotě při řezání. Při zvyšující se řezné rychlosti byly vzorky tepelně ovlivněny na nižší hodnoty tvrdosti. Je to způsobeno kratší interakcí vzorku s plasmou. Jsou vidět i rozdíly u obrábění plasmou u rozdílných tloušťek materiálu. Větší tloušťka znamená i větší plochu, která může odvádět teplo z místa řezu.



Graf. 55. Závislost tvrdosti od vzdálenosti od řezné hrany u mat. P355NH

Obráběný materiál P355NH byl v místě řezu tepelně ovlivněn a došlo ke změně struktury. Tepelně ovlivněná vzdálenost od kraje je kolem 2,5mm. Došlo k zakalení struktury v tepelně ovlivněné zóně díky obrovské teplotě při řezání. Při zvyšující se řezné rychlosti byly vzorky tepelně ovlivněny na nižší hodnoty tvrdosti. Je to způsobeno kratší interakcí vzorku s plasmou. Jsou vidět i rozdíly u obrábění plasmou u rozdílných tloušťek materiálu. Větší tloušťka znamená i větší plochu, která může odvádět teplo z místa řezu.



Graf. 56. Závislost tvrdosti od vzdálenosti od řezné hrany u mat. AISI 304L

Při obrábění nedošlo k žádnému tepelnému ovlivnění povrchu vzorku, který by měl větší tvrdost než samotný materiál. Obráběný povrch pouze změnil barvu. Barva po obrábění je žlutá-červená (viz. Obrázek níž). Díky nízkému obsahu uhlíku (o jeden řád než v případě S235JR a P355NH) v materiálu nedošlo k zakalení vzorku (nevznikl bainit ani martenzit). Tvrdost materiálu AISI 304L je pro tl. 5 a 10 57,5 HRA. U vzorku tl. 15 je tvrdost spíše 56 HRA.



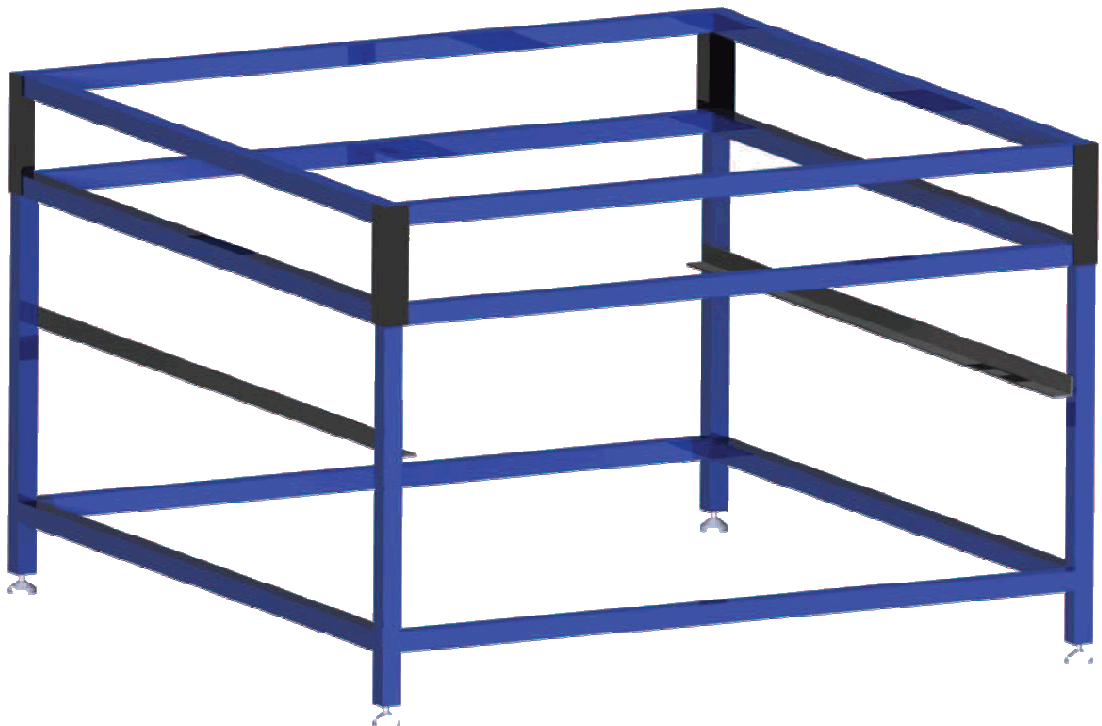
Obr. 44. Zbarvení nerezového vzorku č. 36

5.6 Konstrukce CNC plazmové řezačky:

Návrh konstrukce plazmové řezačky vycházel z požadavku na rozměry pracovního stolu (cca 1200 x 1200 mm) a na dostupnosti konstrukčního materiálu určeném pro stavbu rámu stroje. Dalšími faktory ovlivňujícími konstrukční návrh stroje bylo rozhodnutí použít kulčkové šrouby v ose X a Y pro jejich vysokou účinnost a vysokou přesnost. Pro zajištění dostatečné tuhosti stroje a principu fungování plazmového řezání (pracovní stůl nesmí vyjíždět mimo rám pracovního stolu, aby případné opaly neunikaly do okolí stroje, byla navržena portálová konstrukce.

Rám:

Konstrukční materiál určený pro stavbu rámu byla čtvercová trubka o vnějších rozměrech 30 x 30 mm a tloušťce stěny 2 mm a L profil 40x40x3. Materiály profilů je konstrukční ocel 11 373 s velmi dobrou svařitelností.



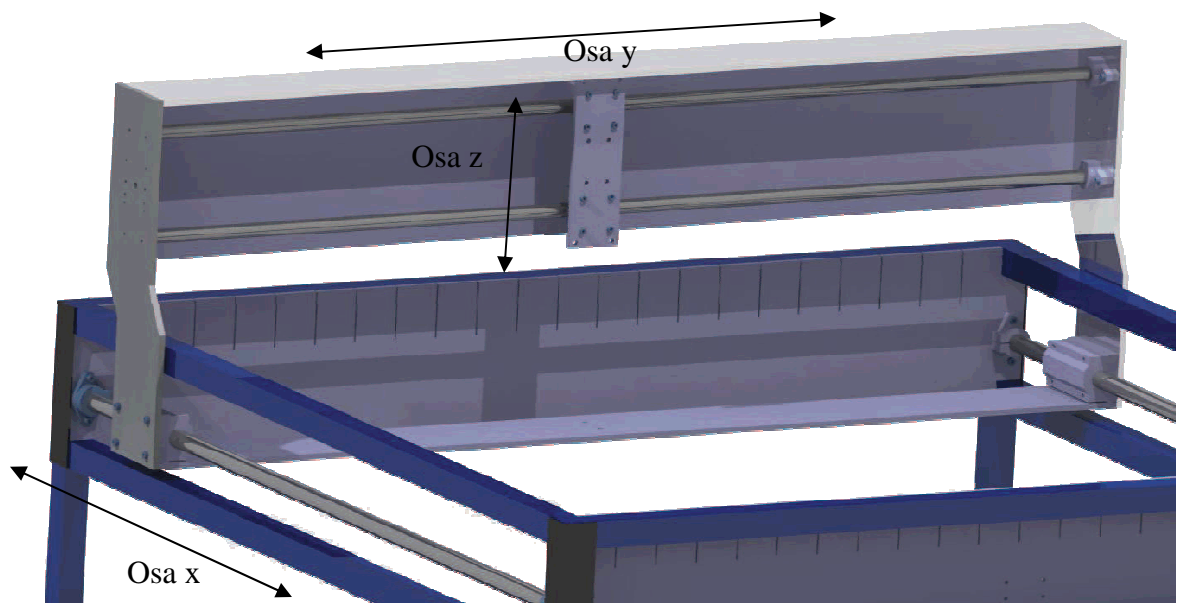
Vedení:

Na ose X bylo navrženo vedení sestávající se z vodících tyčí W20 o průměru 20 mm. Tyto tyče jsou indukčně kalené (62HRC) do hloubky 1,2 – 1,6 mm a broušené na toleranci průměru h6, což zabezpečuje vyhovující přesnost a vysokou životnost těchto vodících prvků. Na ose Y bylo použito podobné vedení, pouze menšího průměru (16mm).

Pro zaručení nízkého tření a spolehlivého chodu vedení byly vodící tyče osazeny uzavřenými linearsety SMA20L (SMA16 pro osu Y). Nízké valivé tření mezi vodící tyčí a pouzdem je zde zaručeno díky užití kuličkových pouzder. Uzavřený typ byl zvolen pro svou odolnost vůči vnikání prachových a opalových částic, které by zkracovaly životnost vodícího systému.

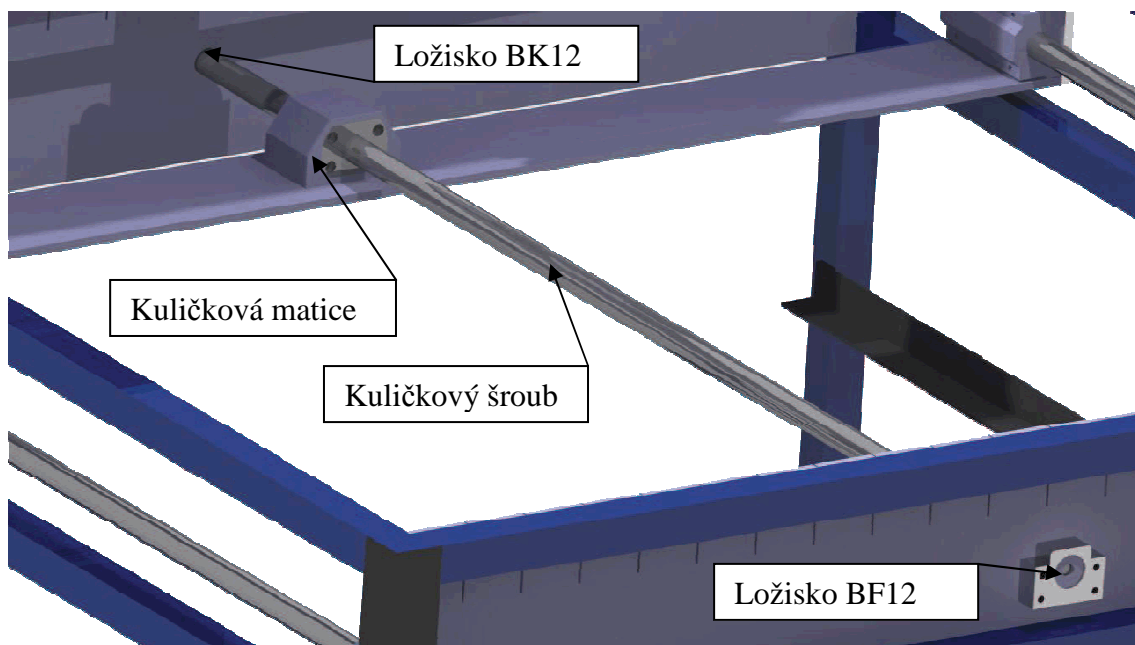
Vedení osy X je ukotveno přes dvě kotevní desky přimontované v rámu CNC plazmové řezačky. Desky jsou vyrobeny z Duralového plechu o tloušťce 6 mm pro zaručení tuhosti desky a dostatečné šířky pro vyřezání závitů. Dural byl zvolen z důvodů nízké hmotnosti, tak aby hmotnost stroje byla co nejmenší.

Vedení osy Z je z důvodu velikosti využito lineární modul AUROL. Tento modul se sestává z hliníkového profilu, ve kterém jsou upnuty tvrdě chromované vodící tyče s přesností h7, po kterých se odvalují rolny. Rolny jsou ukotveny v kotevní desce a díky excentrickým čepům je možné provést vystředění kotevní desky vůči vodícím tyčím. Stejně tak lze díky excentrickým čepům systém předepínat, a eliminovat tak jakékoliv vůle ve vedení. Úhel drážky rolen je 120°.

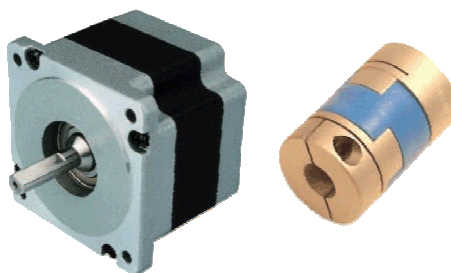


Posuv:

Jelikož jde o zařízení spadající do kategorie CNC s požadavkem na patřičnou přesnost polohování posuvů, jsou na ose X a ose Y použity kuličkové šrouby s kuličkovou maticí, i když pořizovací náklady jsou ve srovnání s trapézovými šrouby relativně vysoké. Kuličkové šrouby jsou konstrukční prvky pohybových ústrojí převádějící s vysokou účinností rotační pohyb na přímočarý. Vyznačují se vysokou tuhostí, přesností a trvanlivostí. Kuličkové šrouby vyžadují přesné a tuhé uložení s rovnoběžností kuličkového šroubu a vodících ploch do 0,02 mm/1000 mm. Také uložení maticové jednotky musí zajišťovat její kolmost k podélné ose šroubu do 0,02 mm/1000 mm. Maticové jednotky mohou být zatěžovány pouze v axiálním směru. Vzhledem k prostorové dispozici není na ose Z rovněž použit kuličkový šroub, ale je zde použit posuvový šroub KERK. Pro cenovou dostupnost, široký sortiment a zkušenosti s řízením, byly k pohonu všech os navrženy krokové motory.



K pohonu této osy byl zvolen 2 – fázový krokový motor s krouticím momentem 4,5 Nm 86HS45. Úhel kroku motoru činí 1,8°. Krokový motor vyhovoval po stránce krouticího momentu, úhlu natočení na krok a možností řízení v unipolárním i bipolárním systému. Krouticí moment z krokového motoru je přenášen na kuličkový šroub pomocí pružné bezvůlové spojky LK25C skládající se ze dvou hlavic a plastového středu. Je určena pro kompenzaci nesouososti a radiální vůle mezi hřídelí motoru a pohybového šroubu. Výrazně také omezuje rezonance a tlumí přenos vibrací mezi motorem a šroubem.



Plasmový hořák:

Konstrukce plazmové řezačky je koncipována tak, že zdroj plazmového řezání je umístěn mimo samotný CNC stroj. V CNC stroji je pouze umístěn hořák plazmového zdroje a to v ose Z. Jako plazmový zdroj byla zvolena Telwin plazmová řezačka Tecnica plazma 41. Při výběru plazmového zdroje byl brán velký zřetel na pořizovací náklady, proto tento zdroj neobsahuje zdroj stlačeného vzduchu. Stlačený vzduch se bude odebírat ze školní kompresorovny, která je schopna dodat požadované objemové množství stlačeného vzduchu nutné pro chod plazmové řezačky. Plazmová řezačka Tecnica plazma 41 je schopna dělit kovy jako ocel, nerez ocel, pozinkovanou ocel, hliník, měď, mosaz a další s maximálním prořezem 12 mm, což je pro účely výuky dostačující. Řezačka je navíc dodávána s kompletním hořákem. Nevýhodou tohoto levnějšího typu plazmové řezačky je kontaktní invertorové zapalování s pilotním startem. To znamená, že při každém startu plazmové řezačky je potřeba dotknout se hořákem zemnění, tak aby došlo k zapálení plazmového oblouku.



Řídicí elektronika:

Řídicí elektronika CNC plazmové řezačky má za úkol zpracovat signály z řídicího PC, a provádět tak požadované úkony, jako pohyb posuvů nebo sepnutí plazmového zdroje. Elektronika také musí zvládat zpětnou komunikaci s PC, např. pro možnost použití bezpečnostního okruhu s tlačítkem E - Stop, koncových spínačů, spínačů nulových souřadnic, odměřování polohy posuvů atd. Z důvodu použití řídicího softwaru Mach3, který primárně komunikuje přes LPT (*Line Print Terminal*) port PC, bylo vyžadováno, aby řídicí elektronika uměla informace z tohoto portu zpracovat.

Řídicí systém:

Pro řízení CNC plazmové řezačky byl zvolen software Mach3 vytvořený firmou ArtSoft USA pracujícím se standardním ISO (*International Organization for Standardization*) kódem. Software splňoval požadovaná kritéria jako možnost konfigurace pinů LPT portu PC, přes který probíhá komunikace s řídicí elektronikou. Jde o 20 výstupních a 20 vstupních pinů. Systém řízení krokových motorů STEP/DIR s možností řízení až 6 - ti osého stroje. Dále umožňuje programové vymezení vůle v uloženíh posuvů. K dispozici jsou i funkce jako spínání zdroje plazmy, chlazení, odsávání, nastavení limitů posuvů včetně referenčního bodu. V tomto software je přímo implementován modul Plasma, který je speciálně navržen pro CNC stroje pracující s plazmovou řezačkou.

5.7 Ekonomické zhodnocení:

Celá sestava dílů a normalizovaných komponentů vyšla bez práce přibližně na 42 tisíc Kč. Obdobné produkty celosvětových výrobců se na tuhle cenu nedokáží ani přiblížit. Např. americká fy. Torchmate ve svém produktu (Torchmate Deluxe 4x4 CNC Plasma Table) dodává stůl o podobné řezné ploše bez plasmy za 156530 Kč. Další americký výrobce fy. BurnTables prodává svůj nejlevnější produkt podobné specifikace již od 136 tisíc bez plasmy. Z českých výrobců podobné zařízení vyrábí např. fy. Cybertronic Unlimited, která nabízí řešení za 128900 Kč. Bazarová CNC plazmová řezací souprava domácí výroby se stejnými rozměry pracovního stolu se nabízela na aukčním portálu bazos.cz za 97 tisíc Kč.

ZÁVĚR

- hodnotit vliv technologických podmínek na vlastnosti řezných ploch;

Pro všechny měřené vzorky je společná charakteristika zvyšujícího trendu drsnosti po tloušťce materiálu. Optimalizace ideální řezné rychlosti pro obrábění plasmou je složitá hned z několika důvodů. Ekonomická stránka věci požaduje co nejvyšší řeznou rychlost a tím větší produktivitu práce ve stejném časovém intervalu. Nejvhodnější povrch po obrábění by měl mít co nejmenší rozpětí drsností. Příliš velká řezná rychlost, jak je vidět z grafů drsnosti R_a na řezné rychlosti (měřeném v místě u prostřed vzorků) neposkytuje jakostní povrch obrobku. Při nízké řezné rychlosti však povrch obrobku taky nedosahuje ideálních parametrů. Materiál „teče“ a v místě měření u konce vzorku je drsnost o poznání vyšší, než na kraji a uprostřed. Výrobky obráběné plasmou mají úkosy, a proto drsnost není nejdůležitější jakostní parametr. Nejvhodnější a nejrozšířenější aplikace výpalků je pro svařování, kde úkosy vzniklé řezáním můžou šetřit čas a mohou být produktivnější v porovnání použití jiných technologií pro přípravu svaru (úkosovací zařízení apod.).

- hodnotit vliv různých materiálů a strukturální změny po obrábění plasmou;

U obráběných materiálů S235JR a P355NH došlo v místě řezu k tepelně ovlivněné zóně a ke změně struktury. Tepelně ovlivněná vzdálenost od kraje je kolem 2,5mm. Došlo k zakalení struktury díky obrovské teplotě při řezání. Při zvyšující se řezné rychlosti byly vzorky tepelně ovlivněny na nižší hodnoty tvrdosti. Je to způsobeno kratší interakcí vzorku s plasmou. Jsou vidět i rozdíly u obrábění plasmou u rozdílných tloušťek materiálu. Větší tloušťka znamená i větší plochu, která může odvádět teplo z místa řezu. Zakalená oblast vzorku činí v praxi největší potíže při dodatečných obráběcích operacích, jako jsou vrtání, frézování. Při měření tvrdosti je vidět, že austenitická nerezová ocel AISI 304L není možná zakalit. Při obrábění nedošlo k žádnému tepelnému ovlivnění povrchu vzorku, který by měl větší tvrdost než samotný materiál. Obráběný povrch pouze změnil barvu. Barva po obrábění je žlutá-červená. Díky nízkému obsahu uhlíku (o jeden řád než v případě S235JR a P355NH) v materiálu nedošlo k zakalení vzorku (nevznikl bainit ani martenzit). Tvrdost materiálu AISI 304L je pro tl. 5 a 10mm 57,5 HRA. U vzorku tl. 15 je tvrdost spíše 56 HRA. Tvrdší povrch, který se objevil u mat. S235JR a P355NH může činit obtíže u dodatečných obráběcích operací jako vrtání (převrtávání otvorů v přírubách) nebo frézování.

- Vývoj zařízení a technologie obrábění materiálů plazmovým obloukem v laboratoři Ústavu Výrobního Inženýrství;

Návrh konstrukce plazmové řezačky vycházel z požadavku na rozměry pracovního stolu (cca 1200 x 1200 mm) a na dostupnosti konstrukčního materiálu určeném pro stavbu rámu stroje. Dalšími faktory ovlivňujícími konstrukční návrh stroje bylo rozhodnutí použít kulíčkové šrouby v ose X a Y pro jejich vysokou účinnost a vysokou přesnost. Pro zajištění dostatečné tuhosti stroje a principu fungování plazmového řezání (pracovní stůl nesmí vyjíždět mimo rám pracovního stolu, aby případné opaly neunikaly do okolí stroje, byla navržena portálová konstrukce.

Zvolená plazma Tecnica plazma 41 je schopna dělit kovy jako ocel, nerez ocel, pozinkovanou ocel, hliník, měď, mosaz a další s maximálním prořezem 12 mm, což je pro účely výuky dostačující. Řezačka je navíc dodávána s kompletním hořákem. Nevýhodou tohoto levnějšího typu plazmové řezačky je kontaktní invertorové zapalování s pilotním startem. To znamená, že při každém startu plazmové řezačky je potřeba dotknout se hořákem země, tak aby došlo k zapálení plazmového oblouku. Navrhnutá konstrukce otevírá nové možnosti ve využití stroje. Výměnou nástroje v ose Z může vzniknout souřadnicová vrtačka, frézka nebo popisovací zařízení.

- hodnotit ekonomický přínos řešení.

Sestrojení menší plazmového CNC řezacího stroje vyjde v materiálu přibližně na 42 tisíc Kč. Relativně nízké pořizovací náklady na zařízení (s porovnáním jiných technologií jako je Laser) jsou peníze touto cestou vhodně vynaložené. Konkurenční prostředí na trhu však cenu zařízení zlevňuje a tím se stává v praxi dostupnou technologií.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Lukovics, I.: *Konstrukční materiály a technologie*. VUT Brno. 1990. ISBN 80-214-0399-3
- [2] Dillinger, J.: *Moderní strojírenství pro školu i praxi*. Vyd. 1. Praha: Europa-Sobotáles, 2007, 612 s. ISBN 978-80-86706-19-1.
- [3] Neslušan, M. aj.: *Experimentálne metódy v trieskovom obrábaní*. EDIS Žilina. 2007. ISBN 978-8070-711-8
- [4] Ptáček, L. aj.: *Nauka o materiálu*. CERM Brno. 2009. ISBN 80-7204-193-2
- [5] Hluchý, M., Kolouch, J. *Strojírenská technologie 1 – Nauka o materiálu 1. Díl* 1 vyd. Praha 2002 ISBN 80-7183-262-6
- [6] *Trendy tepelného dělení materiálů* [online]. [cit.2012-05-05]. Dostupný z WWW: <http://www.airliquide.cz/file/otherelement/pj/roubicek49122.pdf>
- [7] *Abrazivum* [online]. [cit.2012-05-05]. Dostupný z WWW: http://eshop.abrasiv.cz/editor/image/eshop_products/LMGRANAT80_1.jpg
- [8] *Vodní paprsek* [online]. [cit.2012-05-05]. Dostupný z WWW: http://www.flowcorp.cz/upload/Image/News/rezani-vodnim-paprskem_big.jpg
- [9] *Vodní paprsek* [online]. [cit.2012-05-05]. Dostupný z WWW: <http://www.pkit.cz/img/rezani-vodnim-paprskem/rezani-vodnim-paprskem.jpg>
- [10] Manková, Ildikó.: *Progresívne technológie*. 1. vyd. Košice: Viena, 2000, 275 s. ISBN 80-7099-430-4
- [11] *Plasma* [online]. [cit.2012-05-05]. Dostupný z WWW: <http://www.cimindustry.com/article/welding/you-can-plasma-cut-it-but-can-you-weld-it>
- [12] *Nekonvenční metody obrábění* [online]. [cit.2012-05-05]. Dostupný z WWW: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonevncni-metody-obrabeni-4-dil.html>
- [13] *Laser* [online]. [cit.2012-05-05]. Dostupný z WWW: http://www.lao.cz/laoinfo/serial2011/hlavni_prumyslove_lasery.php
- [14] Šesták, J. Strnad, Z. - Tříška, A. a kol.: *Speciální technologie a materiály*. 1. vyd. Praha: Academia, 1993, 688 s. ISBN 80-200-0148-4.

- [15] *kyslík-Acetylen* [online]. [cit.2012-05-05]. Dostupný z WWW:
<http://www.newport.cz/techinfo/Vanzetti/PDF/a-02.pdf>
- [16] *Plasma* [online]. [cit.2012-05-05]. Dostupný z WWW:
http://www.vanad.cz/editor/image/stranky3_galerie/tn_zoom_obrazek_40.jpg
- [17] Kocman, K.: *Technologické procesy obrábění*. 1. Vyd. Brno:2011 ISBN 978-80-7204-722-2
- [18] Whitehouse, D. J.: *Comparison between stylus and optical methods for measuring surfaces*. Annals of CIRP, Vol. 37/2, 1988, s. 649 – 653
- [19] Leonardo, P. M. – Trumpold, H. – De Chiffre, L.: *Progress in 3D surface microtopography characterization*. Annals of CIRP, Vol. 45/2, 1996, s. 589 -598
- [20] Bumbálek, L.: *Vlastnosti povrchové vrstvy a jejich vliv na únavu*, CERM Brno, 2004
- [21] Bumbálek, B., Obvody, V., Ošťádal, B. : *Drsnost povrchu*, SNTL Praha, 1989
- [22] Přednášky doc. Paty z předmětu Technická měření
- [23] *Chemické složení* [online]. [cit.2012-05-05]. Dostupný z WWW:
http://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=456
- [24] Mytutoyo SJ – 301, *Přístroj na měření drsnosti povrchu*. Návod k použití.
- [25] *Plasma* [online]. [cit.2012-05-05]. Dostupný z WWW: <http://www.mgm-tabor.eu/>
- [26] *SAPSProw* [online]. [cit.2012-05-05]. Dostupný z WWW:
<http://www.antalsoftware.sk>
- [27] Charvátová, H.Janáčová, D. Kolomazník, K. Dvořák, Z. *Termofyzikální vlastnosti vybraných látek*. Zlín 2009 ISBN: 9788073187873
- [28] *Tvrdoměr* [online]. [cit.2012-05-05]. Dostupný z WWW:
<http://www.testsysteme.cz/pages/jd/img/zbozi/229.jpg>
- [29] *Tvrdoměr* [online]. [cit.2012-05-05]. Dostupný z WWW:
<http://www.igitur.cz/pdf/Reicherter/BriroR.pdf>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Ra	Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu [μm]
\overline{Ra}	Odhad Průměru aritmetické úchylky posuzovaného profilu [μm]
IT	Stupeň přesnosti
Rz	Největší výška profilu [μm]
\overline{Rz}	Odhad největší výška profilu [μm]
Rmr	Materiálový poměr délek [%]
\overline{Rmr}	Odhad aritmetického průměru materiálový poměru délek [%]
max	Nejvyšší hodnota [μm]
Q3	Třetí kvartil [μm]
Q1	První kvartil [μm]
min	Nejmenší naměřená hodnota [μm]
boxplot	Krabicový graf
λ	Tepelná vodivost $\left[\frac{W}{m \cdot K}\right]$
V_c	Řezná rychlost [mm/min]
NC	Numeric control (číslicově řízený stroj)
CNC	Computer numeric control (Počítačem řízený stroj)
s	Směrodatná odchylka [μm]
v	Variační koeficient [%]
tl.	Tloušťka [mm]
x	Vzdálenost od kraje vzorku po řezání [mm]
PC	Personal computer (osobní počítač)

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Dělení obrábění dle geometrie nástroje. [10]</i>	12
<i>Obr. 2. Dělení nekonvenčních technologií. [10]</i>	14
<i>Obr. 3. Schéma řezání vodním paprskem [9]</i>	16
<i>Obr. 4. Kvalita povrchu v závislosti na rychlosti řezání. [8]</i>	17
<i>Obr. 5. Rozdělení vodního paprsku z hlediska použitého pracovního media. [10]</i>	17
<i>Obr. 6. Abrazivo - hnědý korund F36 a přírodní granát [7]</i>	18
<i>Obr. 7. Řezání kyslíko-acetylenovým plamenem [15]</i>	19
<i>Obr. 8. Vliv parametrů na jakost povrchu. [2]</i>	20
<i>Obr. 9. Nd-YAG laser [13]</i>	22
<i>Obr. 10. CO₂ laser. [13]</i>	23
<i>Obr. 11. Schéma řezání plasmou. [2]</i>	23
<i>Obr. 12. Transferovaný oblouk. [10]</i>	25
<i>Obr. 13. Netransferovaný oblouk. [10]</i>	25
<i>Obr. 14. CNC plazmový řezací stroj Vanad KOMPAKT. [16]</i>	27
<i>Obr. 15. Stabilizace plazmového oblouku pro neferitické materiály. [11]</i>	30
<i>Obr. 16. Závislost řezné rychlosti na tloušťce řezaného plechu. [6]</i>	31
<i>Obr. 17. Rozdělení zkoušek tvrdosti</i>	32
<i>Obr. 18. Rozdělení zkoušek tvrdosti</i>	33
<i>Obr. 19. Zkouška tvrdosti odrazem. [2]</i>	34
<i>Obr. 20. Zkouška tvrdosti podle Vickerse. [2]</i>	35
<i>Obr. 21. Tvrdoměr NEXUS 4500. [28]</i>	36
<i>Obr. 22. Označení zkoušky podle Vickerse. [2]</i>	36
<i>Obr. 23. Zkouška tvrdosti podle Rockwella. [2]</i>	37
<i>Obr. 24. Označení zkoušky podle Rockwella. [2]</i>	38
<i>Obr. 25. Tvrdoměr Rockwell Briro R. [29]</i>	38
<i>Obr. 26. Označení zkoušky podle Brinella. [2]</i>	39
<i>Obr. 27. Univerzální zkouška tvrdosti. [2]</i>	40
<i>Obr. 28. Označování univerzální zkoušky tvrdosti. [2]</i>	41
<i>Obr. 29. Rozsah jednotlivých zkoušek tvrdosti. [2]</i>	41
<i>Obr. 30. Jakost povrchu vybraných technologií</i>	44
<i>Obr. 31 Kolmá a podélná drsnost</i>	44
<i>Obr. 32 Největší výška profilu Rz [22]</i>	45

<i>Obr. 33. Průměrná aritmetická úchylka profilu Ra [22].....</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 34. Materiálový poměr Rmr [22]</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 35. Schéma měření</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 36. MGM OMNICUT 4000 – plasma.....</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 37. Kjellberg HiFocus 360i.....</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 38. Složení plasmové hlavy.....</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 39. Software SAPSproW [26]</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 40. Schéma snímání jakosti povrchu</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 41. Postup měření tvrdosti.....</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 42. Měření tvrdosti HRA</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 43. Vzorek č. 9 Vc= 500mm/min</i>	<i>105</i>
<i>Obr. 44. Zbarvení nerezového vzorku č. 36</i>	<i>109</i>

SEZNAM GRAFŮ

<i>Graf. 1. Tepelně ovlivněná vrstva materiálu. [1]</i>	31
<i>Graf. 2. Univerzální zkouška tvrdosti. [2]</i>	40
<i>Graf. 3. Jakost povrchu (boxplot) vzorek č. 1</i>	57
<i>Graf. 4. Jakost povrchu (boxplot) vzorek č. 2</i>	58
<i>Graf. 5. Jakost povrchu (boxplot) vzorek č. 3</i>	59
<i>Graf. 6. Jakost povrchu (boxplot) vzorek č. 4</i>	60
<i>Graf. 7. Trend drsnosti Ra po tloušťce mat. S235JR tl. 5mm</i>	61
<i>Graf. 8. Jakost povrchu (boxplot) vzorek č. 13</i>	62
<i>Graf. 9. Jakost povrchu (boxplot) vzorek č. 14</i>	63
<i>Graf. 10. Jakost povrchu (boxplot) vzorek č. 15</i>	64
<i>Graf. 11. Jakost povrchu (boxplot) vzorek č. 16</i>	65
<i>Graf. 12. Trend drsnosti Ra po tloušťce mat. P355NH tl. 5mm</i>	66
<i>Graf. 13. Jakost povrchu (boxplot) vzorek č. 25</i>	67
<i>Graf. 14. Jakost povrchu (boxplot) vzorek č. 26</i>	68
<i>Graf. 15. Jakost povrchu (boxplot) vzorek č. 27</i>	69
<i>Graf. 16. Jakost povrchu (boxplot) vzorek č. 28</i>	70
<i>Graf. 17. Trend drsnosti Ra po tloušťce mat. AISI 304L tl. 5mm</i>	71
<i>Graf. 18. Trend drsnosti Ra na řezné rychlosti Vc pro vzorky tl. 5mm</i>	71
<i>Graf. 19. Závislost Rmr na řezné rychlosti pro pl. tl. 5mm</i>	72
<i>Graf. 20. Jakost povrchu (boxplot) vzorek č. 5</i>	73
<i>Graf. 21. Jakost povrchu (boxplot) vzorek č. 6</i>	74
<i>Graf. 22. Jakost povrchu (boxplot) vzorek č. 7</i>	75
<i>Graf. 23. Jakost povrchu (boxplot) vzorek č. 8</i>	76
<i>Graf. 24. Trend drsnosti Ra po tloušťce mat. S235JR tl. 10mm</i>	77
<i>Graf. 25. Jakost povrchu (boxplot) vzorek č. 17</i>	78
<i>Graf. 26. Jakost povrchu (boxplot) vzorek č. 18</i>	79
<i>Graf. 27. Jakost povrchu (boxplot) vzorek č. 19</i>	80
<i>Graf. 28. Jakost povrchu (boxplot) vzorek č. 20</i>	81
<i>Graf. 29. Trend drsnosti Ra po tloušťce mat. P355NH tl. 10mm</i>	82
<i>Graf. 30. Jakost povrchu (boxplot) vzorek č. 29</i>	83
<i>Graf. 31. Jakost povrchu (boxplot) vzorek č. 30</i>	84

Graf. 32. Jakost povrchu (boxplot) vzorek č. 31.....	85
Graf. 33. Jakost povrchu (boxplot) vzorek č. 32.....	86
Graf. 34. Trend drsnosti Ra po tloušťce mat. AISI 304L tl. 10mm.....	87
Graf. 35. Trend drsnosti Ra na řezné rychlosti Vc pro vzorky tl. 10mm.....	87
Graf. 36. Závislost Rmr na řezné rychlosti pro pl. tl. 10mm.....	88
Graf. 37. Jakost povrchu (boxplot) vzorek č. 9.....	89
Graf. 38. Jakost povrchu (boxplot) vzorek č. 10.....	90
Graf. 39. Jakost povrchu (boxplot) vzorek č. 11.....	91
Graf. 40. Jakost povrchu (boxplot) vzorek č. 12.....	92
Graf. 41. Trend drsnosti Ra po tloušťce mat. S235JR tl. 15mm.....	93
Graf. 42. Jakost povrchu (boxplot) vzorek č. 21.....	94
Graf. 43. Jakost povrchu (boxplot) vzorek č. 22.....	95
Graf. 44. Jakost povrchu (boxplot) vzorek č. 23.....	96
Graf. 45. Jakost povrchu (boxplot) vzorek č. 24.....	97
Graf. 46. Trend drsnosti Ra po tloušťce mat. P355NH tl. 15mm.....	98
Graf. 47. Jakost povrchu (boxplot) vzorek č. 33.....	99
Graf. 48. Jakost povrchu (boxplot) vzorek č. 34.....	100
Graf. 49. Jakost povrchu (boxplot) vzorek č. 35.....	101
Graf. 50. Jakost povrchu (boxplot) vzorek č. 36.....	102
Graf. 51. Trend drsnosti Ra po tloušťce mat. AISI 304L tl. 15mm.....	103
Graf. 52. Trend drsnosti Ra na řezné rychlosti Vc pro vzorky tl. 15mm.....	103
Graf. 53. Závislost Rmr na řezné rychlosti pro pl. tl. 15mm.....	104
Graf. 54. Závislost tvrdosti od vzdálenosti od řezné hrany u mat. S235JR.....	107
Graf. 55. Závislost tvrdosti od vzdálenosti od řezné hrany u mat. P355NH.....	108
Graf. 56. Závislost tvrdosti od vzdálenosti od řezné hrany u mat. AISI 304L.....	109

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1. Technologické parametry vybraných nekonvenčních technologií. [17].....</i>	<i>15</i>
<i>Tab. 2. Chemické složení [23]</i>	<i>51</i>
<i>Tab. 3. Naměřené hodnoty jakosti povrchu vzorku č. 1</i>	<i>57</i>
<i>Tab. 4. Naměřené hodnoty jakosti povrchu vzorku č. 2.....</i>	<i>58</i>
<i>Tab. 5. Naměřené hodnoty jakosti povrchu vzorku č. 3.....</i>	<i>59</i>
<i>Tab. 6. Naměřené hodnoty jakosti povrchu vzorku č. 4.....</i>	<i>60</i>
<i>Tab. 7. Naměřené hodnoty jakosti povrchu vzorku č. 13.....</i>	<i>62</i>
<i>Tab. 8. Naměřené hodnoty jakosti povrchu vzorku č. 14.....</i>	<i>63</i>
<i>Tab. 9. Naměřené hodnoty jakosti povrchu vzorku č. 15.....</i>	<i>64</i>
<i>Tab. 10. Naměřené hodnoty jakosti povrchu vzorku č. 16.....</i>	<i>65</i>
<i>Tab. 11. Naměřené hodnoty jakosti povrchu vzorku č. 25.....</i>	<i>67</i>
<i>Tab. 12. Naměřené hodnoty jakosti povrchu vzorku č. 26.....</i>	<i>68</i>
<i>Tab. 13. Naměřené hodnoty jakosti povrchu vzorku č. 27.....</i>	<i>69</i>
<i>Tab. 14. Naměřené hodnoty jakosti povrchu vzorku č. 28.....</i>	<i>70</i>
<i>Tab. 15. Naměřené hodnoty jakosti povrchu vzorku č. 5.....</i>	<i>73</i>
<i>Tab. 16. Naměřené hodnoty jakosti povrchu vzorku č. 6.....</i>	<i>74</i>
<i>Tab. 17. Naměřené hodnoty jakosti povrchu vzorku č. 7.....</i>	<i>75</i>
<i>Tab. 18. Naměřené hodnoty jakosti povrchu vzorku č. 8.....</i>	<i>76</i>
<i>Tab. 19. Naměřené hodnoty jakosti povrchu vzorku č. 17</i>	<i>78</i>
<i>Tab. 20. Naměřené hodnoty jakosti povrchu vzorku č. 18.....</i>	<i>79</i>
<i>Tab. 21. Naměřené hodnoty jakosti povrchu vzorku č. 19.....</i>	<i>80</i>
<i>Tab. 22. Naměřené hodnoty jakosti povrchu vzorku č. 20.....</i>	<i>81</i>
<i>Tab. 23. Naměřené hodnoty jakosti povrchu vzorku č. 29.....</i>	<i>83</i>
<i>Tab. 24. Naměřené hodnoty jakosti povrchu vzorku č. 30.....</i>	<i>84</i>
<i>Tab. 25. Naměřené hodnoty jakosti povrchu vzorku č. 31.....</i>	<i>85</i>
<i>Tab. 26. Naměřené hodnoty jakosti povrchu vzorku č. 32.....</i>	<i>86</i>
<i>Tab. 27. Naměřené hodnoty jakosti povrchu vzorku č. 9.....</i>	<i>89</i>
<i>Tab. 28. Naměřené hodnoty jakosti povrchu vzorku č. 10.....</i>	<i>90</i>
<i>Tab. 29. Naměřené hodnoty jakosti povrchu vzorku č. 11.....</i>	<i>91</i>
<i>Tab. 30. Naměřené hodnoty jakosti povrchu vzorku č. 12.....</i>	<i>92</i>
<i>Tab. 31. Naměřené hodnoty jakosti povrchu vzorku č. 21.....</i>	<i>94</i>
<i>Tab. 32. Naměřené hodnoty jakosti povrchu vzorku č. 22.....</i>	<i>95</i>

<i>Tab. 33. Naměřené hodnoty jakosti povrchu vzorku č. 23.....</i>	<i>96</i>
<i>Tab. 34. Naměřené hodnoty jakosti povrchu vzorku č.24.....</i>	<i>97</i>
<i>Tab. 35. Naměřené hodnoty jakosti povrchu vzorku č. 33.....</i>	<i>99</i>
<i>Tab. 36. Naměřené hodnoty jakosti povrchu vzorku č. 34.....</i>	<i>100</i>
<i>Tab. 37. Naměřené hodnoty jakosti povrchu vzorku č. 35.....</i>	<i>101</i>
<i>Tab. 38. Naměřené hodnoty jakosti povrchu vzorku č. 36.....</i>	<i>102</i>
<i>Tab. 39. Doporučené řezné rychlosti</i>	<i>105</i>
<i>Tab. 40. Naměřené hodnoty tvrdosti.....</i>	<i>106</i>