

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav strojírenské technologie

**Ovlivnění řezných hran při tepelném dělení
plazmou**

Bakalářská práce

Autor: Alen Šacírovič

Studijní obor: Výroba a ekonomika ve strojírenství

Vedoucí práce: Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE

Praha 2017

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: „Ovlivnění řezných hran při tepelném dělení plazmou“ zpracoval sám. Veškeré prameny a zdroje informací, které jsem použil k sepsání této práce, byly citovány a jsou uvedeny v seznamu použitých pramenů a literatury. Dále prohlašuji, že tato práce nebyla využita k získání jiného nebo stejného titulu.

V Praze dne 8.8.2017

.....
Alen Šačírovič

Anotace

Název bakalářské práce: Ovlivnění řezných hran při tepelném dělení plazmou

Autor: Alen Šacírovič

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE

Pracoviště: Ústav strojírenské technologie, U12133

Akademický rok: 2016 / 2017

Počet stran: 64

Počet obrázků: 60

Počet tabulek: 16

Anotace:

Bakalářská práce se věnuje problematice ovlivnění řezných hran při tepelném dělení plazmou. Je zde popsána technologie řezání plazmou, historie, používaná zařízení a technické plyny.

Praktická část zkoumá vliv řezné rychlosti na ovlivnění vlastností řezných hran. Pro experiment byly zvoleny tři řezné rychlosti a vyhodnocovány jsou zde zejména požadavky na tvrdost řezných hran a geometrické požadavky.

Klíčová slova: Plazmové řezání, řezná hrana, tvrdost, řezná rychlost

Annotation

Title of thesis: Affected cutting edges at the plasma cutting

Author: Alen Šaćirović

Leader of thesis: Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE

Workplace: Department of Manufacturing Technology, U12133

Academic year: 2016 / 2017

Number of pages: 64

Number of pictures: 60

Number of tables: 16

Annotation:

The bachelor's thesis deals with the issue of affected cutting edges at the plasma cutting. There are written informations about plasma cutting, history, used equipment and technical gasses.

In the main part of the thesis experiment, there are examined influence of cutting speed on the properties of the cutting edges. For experiment are chosen three cutting speeds and there are evaluated demands for hardness and geometrical requirements.

Key words: plasma cutting, cutting edge, hardness, cutting speed

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Šacírovič** Jméno: **Alen** Osobní číslo: **434253**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Ovlivnění řezných hran při tepelném dělení plazmou

Název bakalářské práce anglicky:

Affected cutting edges at the plasma cutting

Pokyny pro vypracování:

- Rozdělení metod tepelného dělení a jejich vzájemné porovnání
- Podrobný popis principu řezání plazmou
- Návrh experimentu pro ověření ovlivnění řezných hran
- Provedení experimentu a jeho vyhodnocení v souladu s ČSN EN 1090-2
- Závěr

Seznam doporučené literatury:

- [1] Kuncipál, J., a kol. Teorie svařování. Praha: SNTL, 1986.
- [2] Turňa, M. Speciálne metódy zvarovania. Alfa. Bratislava 1989.
- [3] Martinec, J., Zmydlený, T., Plihal, A.. Vliv oxidických vrstev a strusky po řezání plazmou na kvalitu svarových spojů VP ocelí, Konstrukce, 11/2010
- [4] ČSN EN ISO 9013. Tepelné dělení - Klasifikace tepelných řezů - Geometrické požadavky na výrobky a úchytky jakosti řezu, UNMZ, Praha, 2003
- [5] ČSN EN 1090-2 + A1. Provádění ocelových konstrukcí a hliníkových konstrukcí - Část 2: Technické požadavky na ocelové konstrukce, UNMZ, Praha, 2012

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:


doc. Ing. Ladislav Kolařík Ph.D., ústav strojírenské technologie FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **21.04.2017** Termín odevzdání bakalářské práce: **10.08.2017**

Platnost zadání bakalářské práce: **10.08.2017**

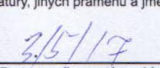

Podpis vedoucí(ho) práce

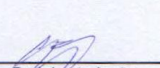

Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.


Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Poděkování

Tímto bych chtěl velmi poděkovat Ing. Ladislavu Kolaříkovi, Ph.D., IWE za cenné rady, připomínky a velkou pomoc při vypracování bakalářské práce.

Dále bych chtěl poděkovat Ing. Marii Kolaříkové, Ph.D., IWE a Ing. Petru Mikešovi za pomoc s praktickou částí a také obsluze pálicího stroje za výrobu vzorků a praktickou ukázkou dělení.

Obsah

Úvod.....	10
1 Tepelné dělení materiálu [10], [19].....	11
1.1 Metody tepelného dělení	11
1.1.1 Tepelné dělení plazmou	11
1.1.2 Tepelné dělení kyslíkem	12
1.1.3 Tepelné dělení laserem.....	12
1.2 Značení metod tepelného dělení [20]	13
2 Historie plazmy [10], [11].....	13
3 Fyzikální podstata plazmy [12], [13], [21], [24]	14
3.1 Elektrický oblouk	15
3.2 Plazmový oblouk.....	15
3.3 Vznik oblouku [11]	16
4 Plazmové řezání [10], [14], [22]	17
4.1 Stabilizační média	17
4.1.1 Plynová plazma	17
4.1.2 Dusíková plazma (plyn + voda)	18
4.1.3 Vzduchová plazma	18
4.1.4 Kyslíková plazma.....	18
4.1.5 HD plazma	19
4.2 Konstrukce plazmového zařízení [15], [23].....	20
4.2.1 Ruční zařízení.....	20
4.2.2 Strojní zařízení	20
4.3 Plazmový hořák [11], [15], [23], [24]	20
4.4 Volba parametrů [11], [15], [17].....	22
4.4.1 Rychlost dělení materiálu.....	22
4.4.2 Proud a napětí.....	23
4.4.3 Opotřebení.....	23
4.4.4 Průměr trysky	23
4.4.5 Vzdálenost hořáku od materiálu.....	23
4.5 Jednotlivé fáze řezání plazmou [15], [18].....	24
4.5.1 Předfuk	24
4.5.2 Pilotní oblouk	24
4.5.3 Řezací oblouk.....	24

4.5.4	Dofuk	25
4.6	Bezpečnost práce [17]	25
5	Kvalita řezu při tepelném dělení	26
5.1	Geometrické požadavky na kvalitu řezu [01]	26
5.1.1	Termíny vztahující se k procesu řezání zpracovávaného kusu	27
5.1.2	Typy řezů	28
5.1.3	Úchylka kolmosti nebo úchylka úhlu u.....	28
5.1.4	Průměrná výška profilu Rz5.....	30
5.1.5	Rozměrové úchylky	32
5.2	Požadavky na tvrdost povrchů volných hran [02].....	33
5.3	Hodnocení kvality řezu při tepelném dělení [02].....	34
6	Vady při řezání kyslíkem, laserem a plazmou [03].....	35
6.1	Vady na hranách řezu.....	36
6.2	Trhlina.....	36
6.3	Vady na plochách řezu	37
6.4	Ulpívající struska	38
6.5	Ostatní vady	38
7	Stanovení tvrdosti podle Vickerse [04].....	39
8	Experimentální část.....	40
8.1	Podmínky vyhotovení řezů	40
8.1.1	Plazmový řezací zdroj ESAB Powercut 875 [05], [06].....	41
8.1.2	Manipulátor Weldycar NV [07]	42
8.1.3	Základní materiál pro experiment [08], [09].....	42
8.1.4	Nastavení.....	43
8.1.5	Popis experimentu	43
8.1.6	Výsledné vzorky.....	44
8.2	Úprava vzorků po řezání	45
9	Geometrické požadavky.....	46
9.1	Měření úchylky kolmosti řezu „u“	46
9.1.1	Vyhodnocení úchylky kolmosti „u“	48
9.2	Měření průměrné výšky profilu „Rz5“	49
9.2.1	Vyhodnocení průměrné výšky prvků profilu „Rz5“	50
9.3	Celkové vyhodnocení geometrických požadavků.....	50
11	Měření tvrdosti.....	52

11.1	Měření v příčném řezu	53
11.1.1	Vyhodnocení tvrdosti na výbrusech	54
11.2	Měření tvrdosti na povrchu	55
11.2.1	Vyhodnocení tvrdosti na povrchu	56
11.3	Celkové vyhodnocení tvrdosti.....	56
12	Tepelně ovlivněná oblast.....	57
12.1	Vyhodnocení tepelně ovlivněné oblasti	58
	Závěr	59
	Použité literární zdroje	60
	Použité zdroje k obrázkům.....	62
	Seznam obrázků a tabulek.....	63
	Seznam obrázků	63
	Seznam tabulek	64

Úvod

Obsahem bakalářské práce je přiblížení metod tepelného dělení, uvedení jejich hlavních předností a důkladně zmapovat metodu řezání plazmou. Popsání fyzikální podstaty plazmy, oblouku, stabilizačních médií, hořáku, volby parametrů, samotného řezání, bezpečnosti práce a hlavně vyhodnocování řezu dle EN norem. Vyhodnocení řezu se zabývá zejména geometrickými požadavky, požadavky na tvrdost povrchů volných hran řezu a tepelně ovlivněné oblasti.

Experimentální část se zabývá vyhodnocením řezů podle normy ČSN EN 1090, která stanovuje požadavky na jakost řezu při tepelném dělení. Hodnotí se řezy provedené plazmou za použití různých řezných rychlostí na materiálu Hardox 450.

1 Tepelné dělení materiálu [10], [19]

Způsob dělení materiálu, který využívá tepelnou energii dodávanou z různých zdrojů, soustředěnou do místa dělení. Hlavní výhodou tepelného dělení oproti konvenčnímu (mechanickému) dělení je rychlost řezání a tím i efektivita výroby. Technologie tepelného dělení umožňuje jak strojní dělení, tak i ruční dělení materiálu.

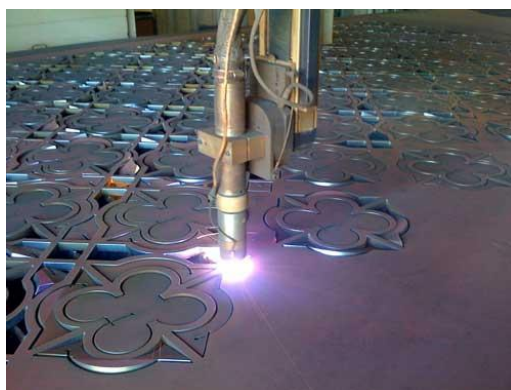
1.1 Metody tepelného dělení

Tepelné dělení patří dnes k nejvyužívanějším metodám přípravy materiálu pro ocelové konstrukce. K nejběžnějším metodám patří řezání kyslíkem, plazmou a laserové řezání.

1.1.1 Tepelné dělení plazmou

Při tepelném dělení plazmou dochází k tavení malé oblasti řezaného materiálu na teplotu tavení pomocí plazmového oblouku a následné vytlačení materiálu kinetickou energií plazmatu, tak se vytváří řezná spára.

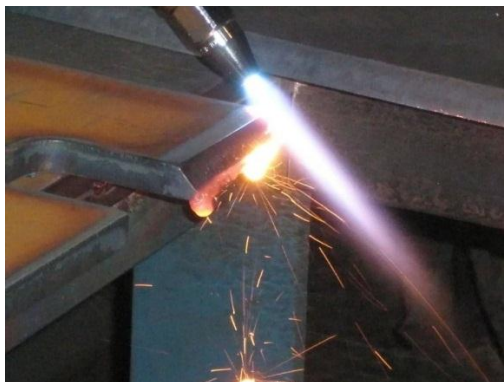
Díky vysokým teplotám (až 30 000 °C) paprsku můžeme řezat všechny kovové materiály, které jsou vodivé bez ohledu na jejich řezatelnost kyslíkem. V běžné praxi do tloušťek cca 50 mm. Hlavní výhodou je vysoká rychlost řezání. Nevýhodou je „podkosení“ řezu, které se dá eliminovat uchycením hořáku, a vyšší drsností řezu.



Obrázek 1 - Ukázka řezání plazmou [01]

1.1.2 Tepelné dělení kyslíkem

Proces spočívá v přehřátí řezaného materiálu na zápalnou teplotu a následném přivedení čistého kyslíku pod tlakem, který zajistí spalování kovu a vytvoření řezné spáry. Mezi výhody patří možnost řezat velké tloušťky (až do 300 mm). Nevýhodou je naopak omezené množství materiálů, které kyslíkem můžeme řezat a velká tepelně ovlivněná oblast. Tepelné dělení kyslíkem se využívá tam, kde nemůžeme použít plazmové nebo laserové řezání.



Obrázek 2 - Ukázka řezání kyslíkem [02]

1.1.3 Tepelné dělení laserem

Dělení pomocí silného monochromatického paprsku světla (fokusu svazku fotonů) o vysoké hustotě, který se po dopadu změní na energii tepelnou a dochází k odtavování a odpařování materiálu. Výhody této metody jsou zejména: tenký řez, vysoká kvalita řezné plochy, přesnost, kolmost řezu a malá tepelně ovlivněná oblast. Nevýhodou je cena této metody a řezy max. do 25 mm.



Obrázek 3 - Ukázka řezání laserem [03]

1.2 Značení metod tepelného dělení [20]

Norma ČSN EN ISO 4063 (Svařování a příbuzné procesy – přehled metod a jejich číslování) uvádí značení jednotlivých metod tepelného dělení.

Tabulka 1 - značení metod tepelného dělení

Metoda	ČSN EN ISO 4063
Řezání kyslíkem (OGC – oxy gas cutting)	81
Řezání plazmou (PBC – plasma beam cutting)	83
Řezání laserem (LBC – laser beam cutting)	84

2 Historie plazmy [10], [11]

L. Langmuir v roce 1932 zavedl pojem plazma pro stav plynů, který je někdy označován jako čtvrtý stav hmoty. První plazmové řezání bylo vyvinuto v 50 letech minulého století. Ze začátku se plazma používala pro řezání neželezných kovů a slitin ocelí, avšak řezání vyžadovalo drahé (čisté) plazmové plyny, výkonné zdroje proudu a vodní chlazení trysky. Dnes se plazmou dá řezat široká škála materiálů. Plazma je nyní na vzestupu a vytlačuje kyslíkové řezání v jistých oblastech řezaných tlouštěk, protože rychlost řezání je větší a tepelně ovlivněná oblast je značně menší.

Plazmatické zpracování materiálu vzniklo s potřebou zpracovat těžkoobrobitelné materiály zejména v kosmickém a leteckém odvětví. Obrábění materiálu nezávisí na mechanických vlastnostech jako tvrdost, houževnatost a pevnost. Obrábět je možné ve třech směrech, tj. obrábět délku, plochu, objem nebo průřez. Díky těmto vlastnostem se plazmatické obrábění používá např.: při obrábění materiálů s vysokou tvrdostí, tvarově složitých součástí a tenkostěnných materiálů, kde by běžné nástroje způsobily deformace. Plazmatické dělení patří do metod tepelného dělení stejně jako laserové řezání a kyslíkové řezání (viz kapitola 2). Úběr materiálu probíhá díky tavení, vypařování a zejména spalování materiálu.

3 Fyzikální podstata plazmy [12], [13], [21], [24]

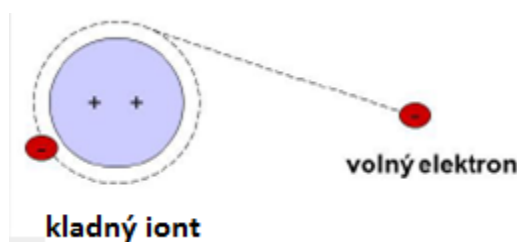
Plazma je ionizovaný plyn, který dosahuje vysokých teplot. Je to stav, kdy se stává elektricky vodivý. Elektrická vodivost je dána výskytem elektronů a aniontů, které vznikají v důsledku termodynamických jevů: Disociace, Ionizace, Excitace a Rekombinace.

Budeme-li dodávat plynu energii (disociační), zvýšíme kinetickou energii jeho částic, které do sebe naráží. Stav, kdy nárazová energie překoná vazební energii, se nazývá *disociace* plynu. Důsledkem je potom rozštěpení molekul na atomy.



Obrázek 4 - Příklad disociace [21]

Zároveň s disociací probíhá také *ionizace*. Při dalším zvyšování energie (např. kinetické nebo tepelné) atomu a dalších srážkách, dojde k vymrštění valenčního elektronu z obalu atomu. Vznikají zbytkové kladné ionty a volné elektrony (záporně nabitě částice). Ionizace je závislá na teplotě a typu plynu. Rozpad na elektricky nabitě nosiče je provázen spotřebou tepla.



Obrázek 5 - Vymrštění valenčního elektronu [21]

Excitace je jev, při kterém je elektron urychlen a přesunut na vyšší orbit (tzv. energetickou hladinu) v důsledku dodávané energie. Při tom elektron vyzáří kvantum energie a stoupá podíl UV záření. Jev je nestabilní, po přerušení dodávky energie elektron přejde zpět na původní energetickou hladinu (tzv. spontánní emise).

Plazma se tedy skládá z elektronů, iontů a neutrálních atomů. Na venek se plazma jeví jako elektromagneticky neutrální – „kvazineutrální“. Předpokládáme stejný počet kladně a záporně nabitých částic, tím pádem se k okolí chová jako elektromagneticky neutrální, ale uvnitř neutralita fungovat nemusí.

Záporné elektrony a kladné ionty se opět spojují v neutrální celky, elektrony se navrací z excitovaného stavu na původní orbity a atomy se spojují opět v molekuly. Tento proces se nazývá *rekombinace*. Je to v podstatě opačný jev než disociace a ionizace, při kterých dodáním energie dochází k „rozštěpení“ – zde naopak dochází ke slučování a k vyzařování energie. Energie se uvolní a el. oblouk nataví základní materiál. Plazmový oblouk může mít teplotu až 30 000 °C. Teplota závisí na řadě faktorů jako proud, napětí, složení plynu, tlak,

3.1 Elektrický oblouk

Elektrický oblouk je elektrický výboj v plynu. Základní části elektrického oblouku jsou: katodová oblast, sloupec oblouku a anodová oblast. V katodové oblasti dochází k emisi elektronů, přesněji k emisi dochází v tzv. katodové skvrně. V místě minimálního emisního odporu. Sloupec oblouku je tvořen plazmou (viz výše), má tvar rozšiřujícího se kužele směrem k anodě – pokud jde o standardní případ zapojení stejnosměrného proudu s přímou polaritou. Většina zařízení sloužících k plazmovému řezání využívá stejnosměrného proudu s přímou polaritou a plazma proudí k anodě. Anodová oblast je místo s vyšší teplotou, přesněji je to anodová skvrna. Nejvyšší teplota je zapříčiněna rekombinací volných částic atomů, přičemž dochází k uvolnění energie.

3.2 Plazmový oblouk

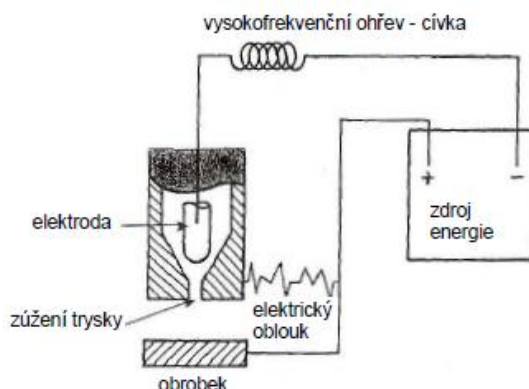
Při řezání plazmou se používá plazmový oblouk, což je stabilizovaný elektrický oblouk, který je koncentrován tvarem dýzy plazmového hořáku, proudícími plyny (vodou) a je intenzivně chlazen. Stabilizace (fokusace) elektrického oblouku má za následek zvýšení teploty a hustoty výkonu. Plazmové svařování se vyvinulo z metody

TIG úpravou hořáku v padesátých letech v USA. První úprava spočívala v zapuštění elektrody do trysky, čímž dochází k fokusaci oblouku stěnou trysky a možností hoření nezávislého oblouku mezi elektrodou a tryskou. Druhá změna byla, že se použil kromě ochranného plynu ještě další plyn plazmový, který je vpouštěn kolem elektrody přímo do el. oblouku a tím dochází ke zvýšení stupně ionizace a tím i ke zvýšení teploty.

3.3 Vznik oblouku [11]

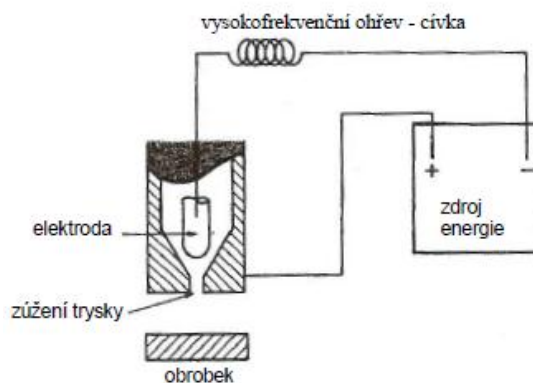
Konstrukce plazmového hořáku se také odvíjí od vzniku oblouku na:

- Hořák s přeneseným obloukem (závislý): plazmový oblouk hoří mezi elektrodou a materiálem. Lze řezat jen vodivé materiály jako jsou kovy. Přenesený oblouk je produktivnější než nepřenesený oblouk.



Obrázek 6 – Zapojení s přeneseným obloukem [11]

- Hořák s nepřeneseným obloukem (nezávislý): plazmový oblouk hoří mezi elektrodou a tryskou. Oblouk je zaostřený, vzdálenost je větší než u přeneseného oblouku a můžeme řezat všechny materiály i ty nevodivé jako keramika a plast. Nevýhodou je rychlé opotřebování trysky, která tvoří anodu. Tento typ hořáku se používá především u nástříků.



Obrázek 7 - Zapojení s nepřeneseným obloukem [11]

- Hořák s kombinovaným obloukem: využívá obou typů oblouku a používá se např. u svařování. K zažehnutí oblouku se využívá nepřenesený oblouk (tzv. pilotní) a pro samotné řezání se pak používá oblouk přenesený. Tento způsob se používá kvůli malému opotřebením součástí hořáku.

4 Plazmové řezání [10], [14], [22]

4.1 Stabilizační média

4.1.1 Plynová plazma

Využívá směsí argonu a vodíku (někdy místo vodíku používá dusík). Argon se snadno ionizuje, čímž se zajistí stabilita oblouku a snadné zažehnutí. Vodík se vyznačuje velmi dobrou tepelnou vodivostí. Díky této kombinaci vlastností jsme schopni dosáhnout dobrých výsledků řezu u většiny materiálů. Používá se především k řezání vysokolegovaných ocelí, niklu, mědi, molybdenu a dalších kovů. U tenkých plechů je plynová plazma značně rychlejší než vzduchová. Rozdíl se však vyrovná u tloušťek kolem 20 až 35 mm. Elektroda je wolframová.

4.1.2 Dusíková plazma (plyn + voda)

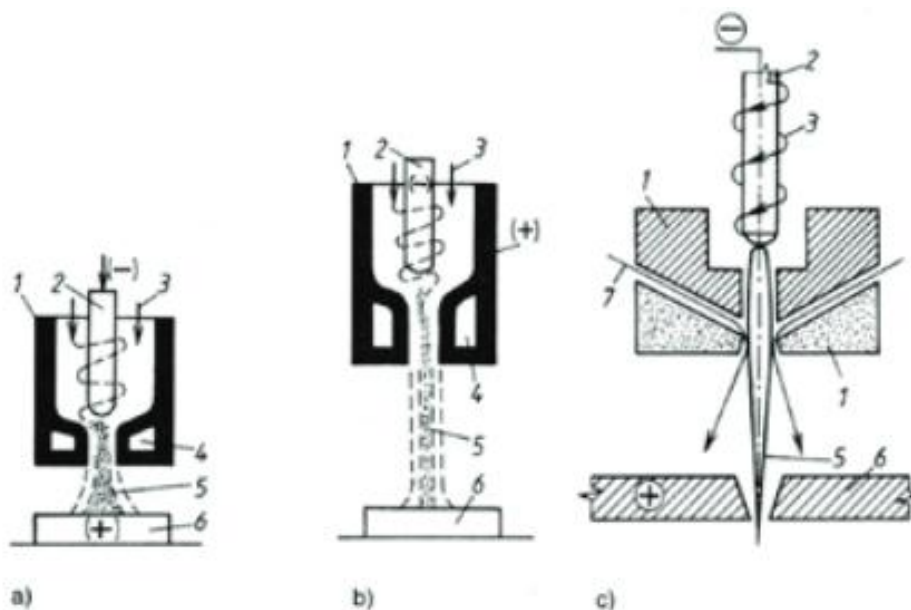
Kombinuje se s vodní sprchou, injekčním přívodem vody nebo se ponoří pod hladinu vody. Díky speciálnímu hořáku, který vytváří vodní vír, jenž ochlazuje vnější vrstvy plazmy, disociuje vodu a tím můžeme dosáhnout zvýšení teploty a zúžení paprsku. To má za následek větší řezné rychlosti a lepší kvality řezných ploch (kolmosti). Také při řezání pod hladinu vody se zlepší pracovní podmínky pro obsluhu (prašnost a záření). Dusíková plazma se používá pro řezání vysokolegovaných ocelí o velkých tloušťkách. Nevýhodou je struska ulpívající na spodní straně řezu.

4.1.3 Vzduchová plazma

Nejpoužívanější koncepce plazmového řezání. Dají se jí řezat téměř všechny materiály. Používá se především pro uhlíkovou ocel do tlouštěk 40 mm. Velmi levný provoz díky absenci drahých plynů. Vzduchová plazma využívá ke stabilizaci oblouku přefiltrovaný stlačený vzduch o tlaku 0,4 až 0,8 MPa a průtočném množství až 130 l / min. Nevýhoda této metody je rychlé opotřebování dílů hořáku vlivem oxidace.

4.1.4 Kyslíková plazma

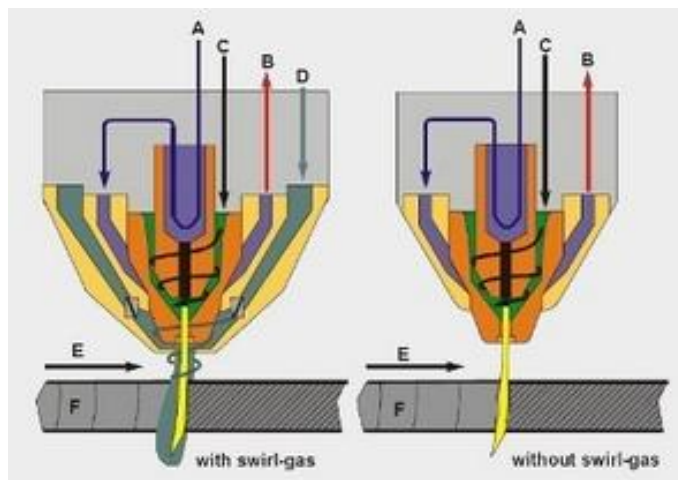
Kyslíková stabilizace je podobná vzduchové, ale vyznačuje se větší řeznou rychlostí, čistými řezy bez ulpívajících oxidů a dobrými geometrickými vlastnostmi řezu. Používá se především pro uhlíkovou ocel.



Obrázek 8 - a) hořák s plynovou stabilizací a transferovaným obloukem b) hořák s plynovou stabilizací a netransferovaným obloukem c) hořák s vodní stabilizací [22]

4.1.5 HD plazma

High Definition Plasma Arc Cutting, plazma, která má řezné vlastnosti podobné laseru, avšak nižší pořizovací náklady. Speciální hořák s vodním chlazením má za následek zúžení plazmového paprsku, zvýšení teploty a výstupní rychlosti. Díky tomu je řezná spára až o polovinu užší, řezná rychlost je větší, kolmost stěn lepší a na spodní straně řezu nedochází k otřepům.



Obrázek 9 - Schéma HD hořáku [22]

4.2 Konstrukce plazmového zařízení [15], [23]

4.2.1 Ruční zařízení

Ruční zařízení pro dělení plazmou se skládá ze zdroje energie a řezacího hořáku. Zařízení je většinou přenosné. Ruční hořák je vyměnitelný, lze také upnout do řezacího stolu a mechanizovat zařízení. Ruční řezání se většinou využívá u menších tloušťkách materiálu (5–30 mm).

4.2.2 Strojní zařízení

Strojní zařízení pro dělení plazmou se skládá ze zdroje energie, řezacího stolu, hořáku, kompresoru, filtrace a řídicí jednotky. Ve srovnání s ručním řezáním je strojní řezání výkonnější a produktivnější, dokonce některé stoly mohou být vybaveny více hořáky pro zvýšení produktivity. Na suportu stolu je spolu s hořákem také odsávání dýmu vzniklého při řezání, který je proháněn přes filtrační zařízení. Pohyb hořáku udává řídicí jednotka s NC nebo CNC řízením. Plyny z tlakových lahví jsou dodávány do směšovací jednotky. Vzduch je jediné médium, které není dodáváno z tlakových lahví, ale je nasáván z atmosféry přes filtraci a stlačován kompresorem.

4.3 Plazmový hořák [11], [15], [23], [24]

Hořák je vyměnitelná součást, i jeho části se dají měnit z důvodu omezené životnosti. Nejkratší životnost má tryska a elektroda.

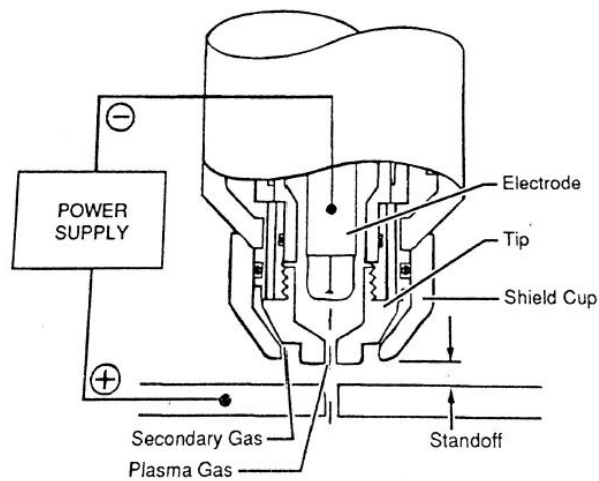
Tryska slouží k zúžení plazmy do koncentrovaného oblouku. Tryska je vystavena velmi vysokým teplotám, proto musí být intenzivně chlazena. Důležitým parametrem trysky je její výstupní průměr, který zužuje plazmový paprsek. Čím užší paprsek, tím se tryska rychleji opotřebovává.

Elektroda bývá zapojena jako katoda a je tepelně nejnamáhanější součástí hořáku, protože tvoří přechod mezi plazmou a elektrickým obvodem. Skrz elektrodu je přiváděn proud do oblouku. Elektroda musí být chlazená.

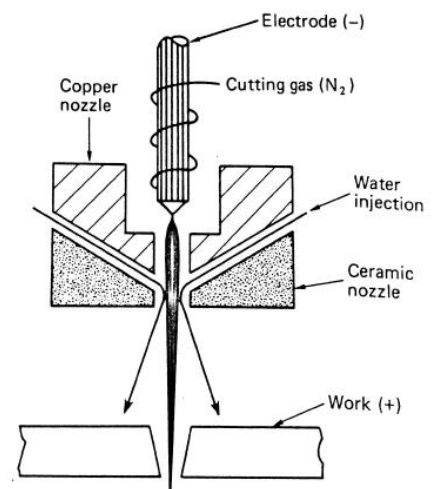


Obrázek 10 - Ukázka řezacího hořáku [24]

Schéma hořáku:



Obrázek 12 - Schéma řezacího hořáku [23]



Obrázek 11 - Hořák s injekčním přívodem vody [23]

Díky vysokým teplotám je nutné chlazení hořáku a to buď kapalinou nebo plynem. Kapalinou je nejčastěji voda a plynem vzduch z atmosféry stlačovaný kompresorem. Chladicí médium může přispívat i ke stabilizaci plazmového oblouku. Stabilizací je myšleno zaostření plazmového oblouku. Při chlazení kapalinou (vodou) se zlepšuje kvalita řezu a tepelně ovlivněná oblast materiálu.

4.4 Volba parametrů [11], [15], [17]

Hlavní parametry ovlivňující jakost jsou proud, napětí a řezná rychlost, které se volí podle typu a tloušťky řezaného materiálu.

Vedlejší parametry ovlivňující jakost jsou plazmový plyn, ochranné médium, průměr trysky, opotřebení spotřebních dílů hořáku, výška hořáku od řezaného materiálu, vibrace při řezání.

Při plazmovém řezání se dosahuje kvality povrchu jako při hrubování konvenčními metodami obrábění. V případě použití metody Hy-Definition se dosahuje kvalit a přesností srovnatelných s laserovým řezáním.

4.4.1 Rychlost dělení materiálu

Nastavení řezné rychlosti je velmi důležité, protože ovlivňuje celou řadu faktorů jako reliéf obrobku, úhel řezu, natavení materiálu, roztavený materiál na spodní straně hrany řezu a úhel řezu. Rychlost řezání se pohybuje od 0,2 m/min do 7,5 m/min a odvíjí se od typu materiálu a tloušťky řezu. Podle řezné rychlosti rozlišujeme druhy oblouků:

- Oblouk, který předbíhá osu hořáku ve směru posuvu: k dělení tenkých materiálů jako plechy
- Oblouk, který zaostává ve směru posuvu: nejpoužívanější typ oblouku, který se používá pro všechny plyny a materiály.
- Oblouk, který zůstává kolmý k ploše řezu: používá se při použití vzduchu jako plazmového plynu a řezání hliníku a korozivzdorné ocele.

Kvalita reliéfu je převážně dána nastavením rychlosti.

4.4.2 Proud a napětí

Používá se stejnosměrný proud, jehož velikost se odvíjí od materiálu a řezné rychlosti. Při příliš vysokém nastavení proudu dochází k velkému zaoblení horní hrany řezné spáry a k těžko odstranitelnému roztavení materiálu na spodní hraně spáry (otřepům). Při nízkém nastavení proudu se materiál nedopálí. Pomocí regulace napětí můžeme korigovat vzdálenost oblouku od materiálu.

4.4.3 Opotřebení

Nejrychleji opotřebovávaná je tryska spolu s elektrodou. Opotřebovaná tryska se vyznačuje oválným otvorem a elektroda úbytkem. Úbytek na elektrodě se měří hloubkoměrem a pokud dosahuje jednoho milimetru, doporučuje se měnit elektrodu i trysku současně.

4.4.4 Průměr trysky

Čím bude průměr trysky menší, tím bude docházet k rychlejšímu opotřebení, ale plazmový oblouk bude užší a řezná spára taky. Proto se musí volit optimální průměr trysky podle intenzity el. oblouku s ohledem na životnost. Průměr se také odvíjí od tloušťky řezaného materiálu a použitého řezacího proudu zdroje. Nejčastější průměry trysek jsou od 0,79 po 6,35 mm.

4.4.5 Vzdálenost hořáku od materiálu

Ideální vzdálenost hořáku od materiálu je 2–6 mm podle tloušťky řezaného materiálu a nastavení parametrů zdroje. Při malé vzdálenosti hořáku od obrobku vznikne záporný úhel řezné hrany. Naopak u velké vzdálenosti mezi hořákem a materiálem vzniká kladný úhel řezné hrany.

Tzv. manuální regulace výšky hořáku je, když se nastaví vzdálenost před řezáním na danou hodnotu, která se nemění. Nevýhodou je, že může docházet ke zvlnění materiálu a následné změně řezných podmínek.

Automatická regulace výšky hořáku je nejpoužívanější metoda a provádí se pomocí předem nastaveného napětí. Napětí se odvíjí od výšky a řezné rychlosti, proto se regulace v rozích a zaoblení vypíná, protože při poklesu rychlosti řezu by se snížila vzdálenost.

4.5 Jednotlivé fáze řezání plazmou [15], [18]

4.5.1 Předfuk

Předfuk je přivádění plynů, před zažehnutím pilotního oblouku. Přivádí se plazmový i ochranný plyn a celý proces trvá okolo 3 sekund, aby se vytvořila dostatečná atmosféra a vír plazmového plynu.

4.5.2 Pilotní oblouk

Je nepřenesený oblouk (vytváří se mezi elektrodou a tryskou), který trvá 1–4 s a poté se zažehne řezací oblouk. Je důležité, aby byl co nejkratší, protože nepříznivě ovlivňuje opotřebení trysky a elektrody. Jeho trvání se určí podle podmínek řezání. Pilotní oblouk má nízké hodnoty proudu (2–10 A) a vysokofrekvenční napětí (5 -10kV). Spolu s pilotním obloukem se spouští i ionizátor, který ionizuje plazmový plyn.

4.5.3 Řezací oblouk

Pro dosažení kvalitního řezu při hoření řezacího oblouku je velmi důležitá konstantní řezací rychlost. Tím se ovlivňuje životnost součástek hořáku. Pokud je potřeba

startovat uprostřed plechu, je vhodné hořák mít nastaven pod úhlem 45° k preventivní ochraně trysky před odletujícími kapkami roztaveného kovu.

4.5.4 Dofuk

Privádění plynů i po ukončení řezacího oblouku. Privádí se plazmový i ochranný plyn. Privádění plynů chrání materiál před okolní atmosférou a intenzivně chladí hořák. Dofuk trvá až 10 s.

4.6 Bezpečnost práce [17]

Při řezání vznikají velmi jedovaté dýmy a zplodiny, které se musí odsávat a následně přefiltrovat. Další škodlivé jevy při řezání je ultrafialové a infračervené záření, proto je nutná ochrana očí. Negativním jevem je také prašnost a hluk, který dosahuje až 110 dB. Všechny tyto negativní jevy se dají do velké míry usměrnit řezáním pod vodní hladinou.

5 Kvalita řezu při tepelném dělení

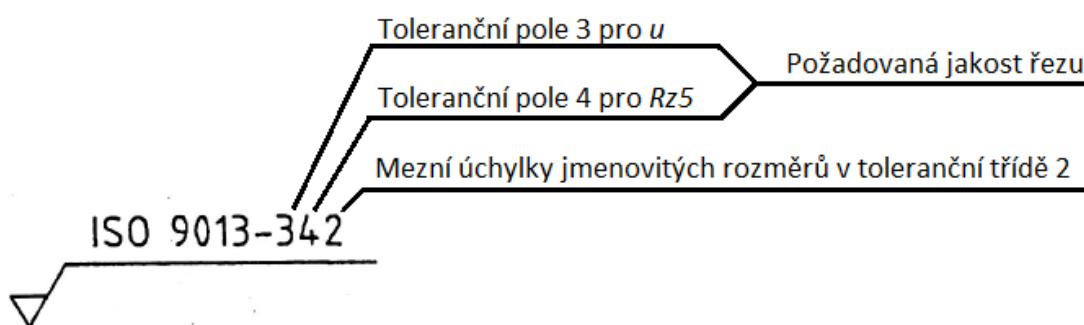
Kvalitu řezu dle současných požadavků můžeme vyhodnotit dvěma způsoby. První způsob vychází z normy ČSN EN ISO 9013:2002 (geometrické požadavky na klasifikaci tepelných řezů), která hodnotí geometrické požadavky na kvalitu řezu. Druhý způsob popisuje norma ČSN EN ISO 1090-2+A1 (provádění ocelových a hliníkových konstrukcí), která vyhodnocuje kvalitu řezu podle geometrických požadavků, ale hlavně podle ovlivnění tvrdosti řezných hran.

5.1 Geometrické požadavky na kvalitu řezu [01]

Norma ČSN EN ISO 9013:2002 uvádí geometrické požadavky na výrobky a úchytky jakosti řezu. Normu používáme pro materiály vhodné pro laserové řezání od 0,5 do 40 mm, plazmové řezání od 1 mm do 150 mm a pro řezání kyslíkem od 3 mm do 300 mm. Úchytky geometrických tolerancí posuzujeme a následně zařazujeme do tolerančních polí podle tabulek jakosti řezaných povrchů, které jsou uvedeny v této normě.

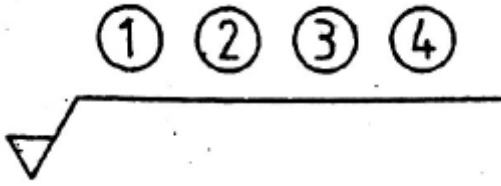
Požadovaná toleranční třída a jakost řezu musí být označena na výkrese a v rohovém razítku včetně odkazu na číslo této normy. Požadovaný stupeň jakosti a toleranční třída při tepelném dělení musí být označeny podle ISO 1302 následovně.

Příklad značení na výkrese:



Obrázek 13 - Značení kvality řezu na výkrese

Vysvětlení značení na výkrese:



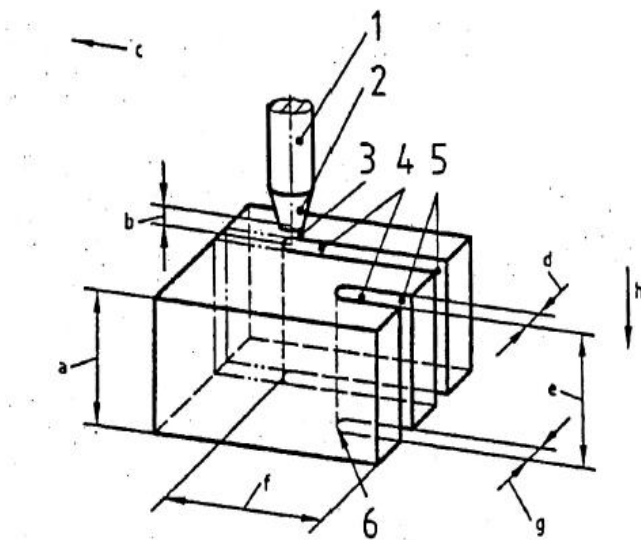
Obrázek 14 - Schéma značení

- 1 Označení čísla této mezinárodní normy
- 2 Označení tolerančního pole úchylky kolmosti u
- 3 Označení tolerančního pole průměrné výšky prvků profilu $Rz5$
- 4 Označení toleranční třídy mezní úchylky jmenovitých rozměrů

Příklad značení v rohovém razítku:

ISO 9013-342

5.1.1 Termíny vztahující se k procesu řezání zpracovávaného kusu

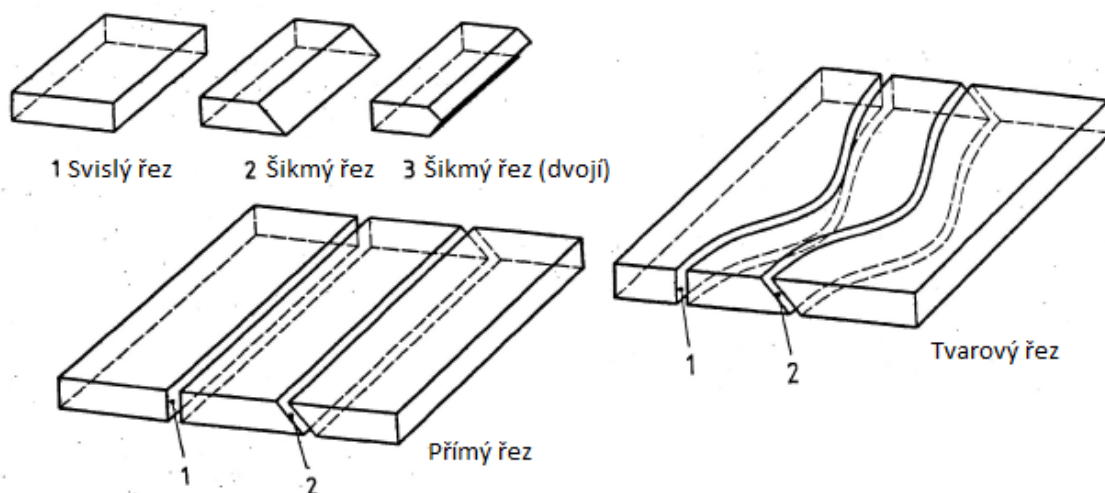


Obrázek 15 - Termíny vztahující se k procesu řezání

Vysvětlivky:

- 1 Řezací hořák
- 2 Hubice
- 3 Paprsek laseru/plamen/oblouk
- 4 Řezná spára
- 5 Začátek řezu
- 6 Konec řezu
- a Tloušťka zpracovávaného kusu
- b Vzdálenost trysky
- c Směr posunu
- d Šířka řezné spáry na horní ploše
- e Řezná tloušťka
- f Délka řezu
- g Šířka řezné spáry na spodní ploše
- h Směr řezání

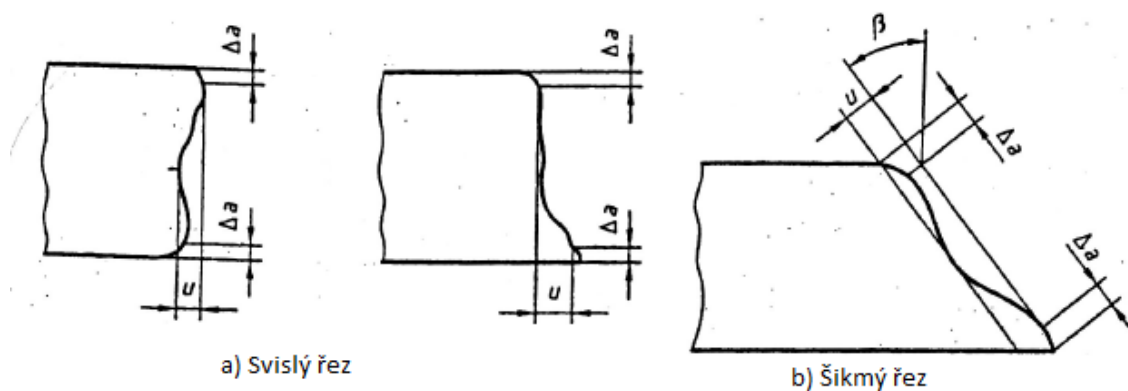
5.1.2 Typy řezů



Obrázek 16 - Typy řezů

5.1.3 Úchylka kolmosti nebo úchylka úhlu u

Úchylka kolmosti a úchylka úhlu je vzdálenost mezi rovnoběžkami, které se dotýkají řezného povrchu (v nejnižším a nejvyšším bodě) a svírají s povrchem řezaného materiálu daný úhel (pro svislé řezy 90°).

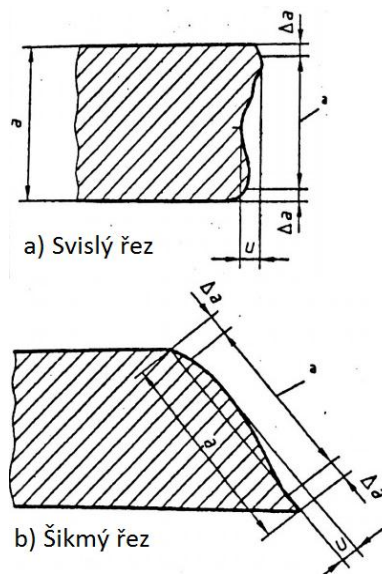


Obrázek 17 - Úchylky kolmosti u a úchylky úhlů u

Úchylka kolmosti a úchylka úhlu se určuje pouze ve vnitřní oblasti řezu, protože horní a dolní oblast řezu se zmenší o vzdálenost Δa . Oblast Δa se odvíjí od tloušťky řezu a je uvedena v následující tabulce 2. Důvodem pro zmenšení je dovolené natavení hran řezu.

Tabulka 2 - Velikost parametru Δa pro různé tloušťky řezu

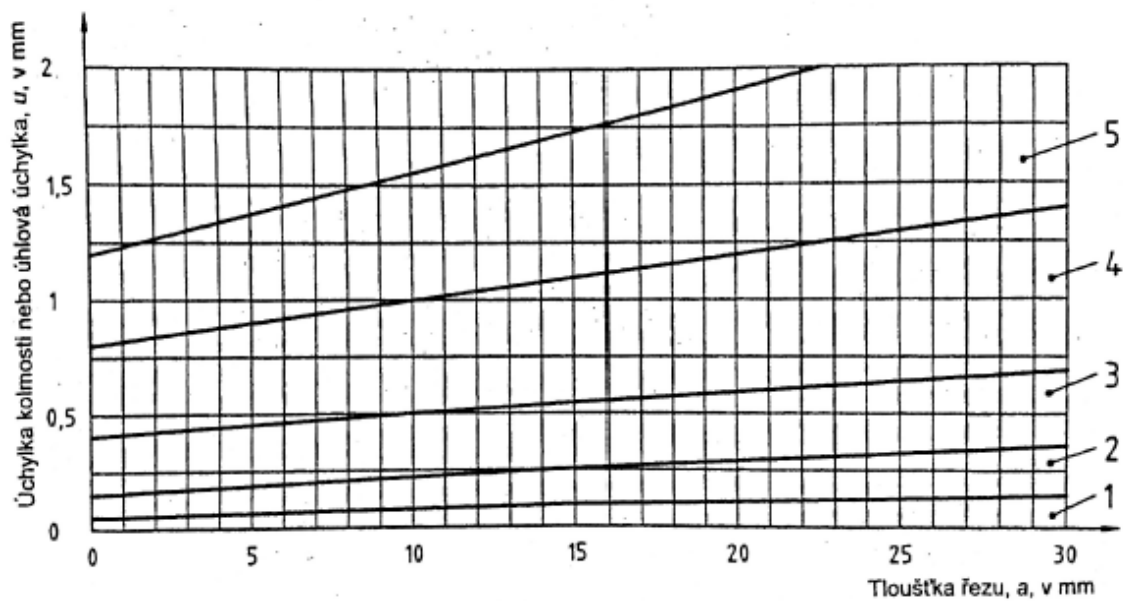
Tloušťka řezu, a mm	Δa mm
≤ 3	$0,1a$
$> 3 \leq 6$	0,3
$> 6 \leq 10$	0,6
$> 10 \leq 20$	1
$> 20 \leq 40$	1,5
$> 40 \leq 100$	2
$> 100 \leq 150$	3
$> 150 \leq 200$	5
$> 200 \leq 250$	8
$> 250 \leq 300$	10



Obrázek 18 - oblast pro stanovení úchylek kolmosti a úhlových úchylek

Tabulka 3 - Toleranční pole pro velikosti úchylky kolmosti nebo úhlové úchylky u

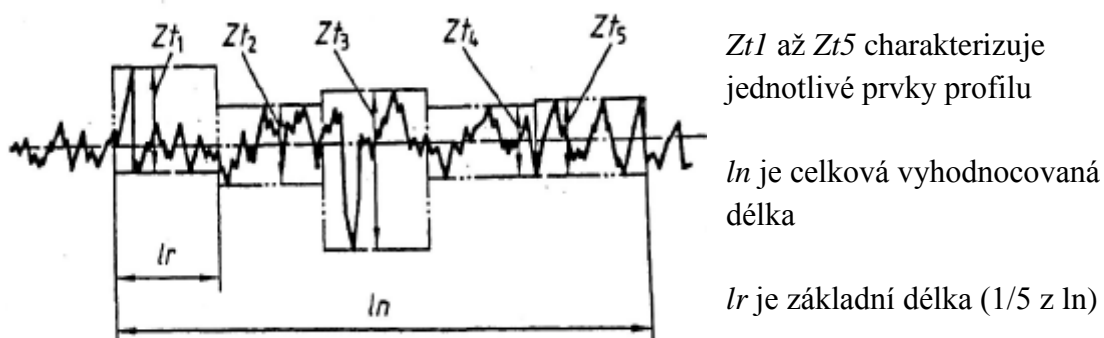
Toleranční pole	Úchylka kolmosti nebo úhlová úchylka, u mm
1	$0,05 + 0,003a$
2	$0,15 + 0,007a$
3	$0,4 + 0,01a$
4	$0,8 + 0,02a$
5	$1,2 + 0,035a$



Obrázek 19 - Toleranční pole pro úchylku kolmosti nebo úchylku úhlu u pro řezy do 30 mm

5.1.4 Průměrná výška profilu Rz5

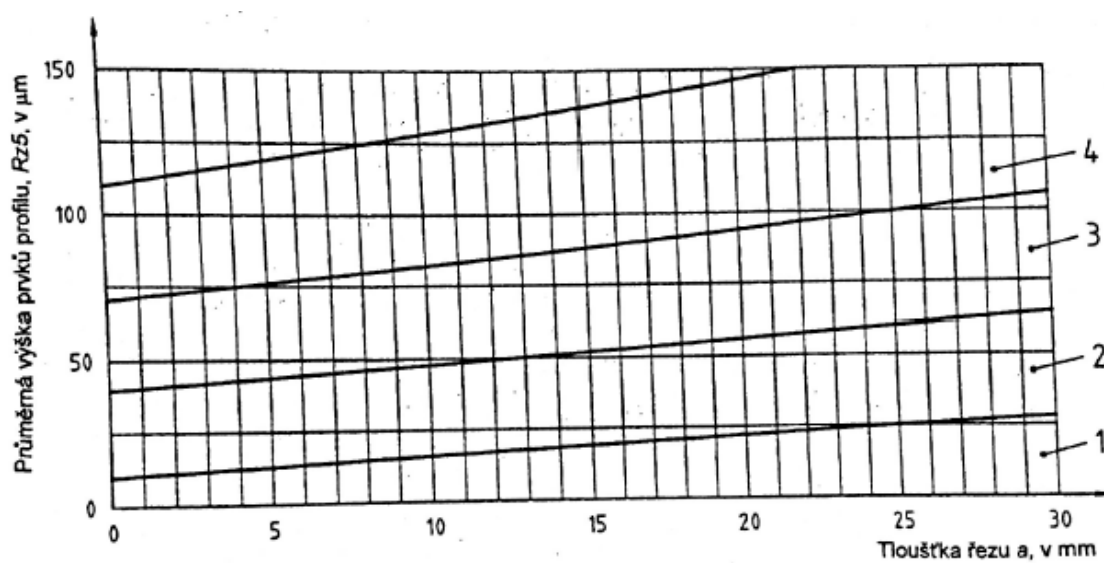
Průměrná výška profilu, Rz5, se vyhodnocuje z oblasti l_n , která se rozdělí na pět za sebou následujících oblastí l_r . V jednotlivých oblastech l_r určíme aritmetický průměr z výšek profilu – viz obrázek 20.



Obrázek 20 - Průměrná výška prvků profilů

Tabulka 4 - Toleranční pole pro průměrnou výšku prvků profilu Rz5

Toleranční pole	Průměrná výška prvků profilu, Rz5 μm
1	10 + (0,6a mm)
2	40 + (0,8a mm)
3	70 + (1,2a mm)
4	110 + (1,8a mm)



Obrázek 21 - Toleranční pole pro průměrnou výšku prvků profilu Rz5 pro řezy do 30 mm

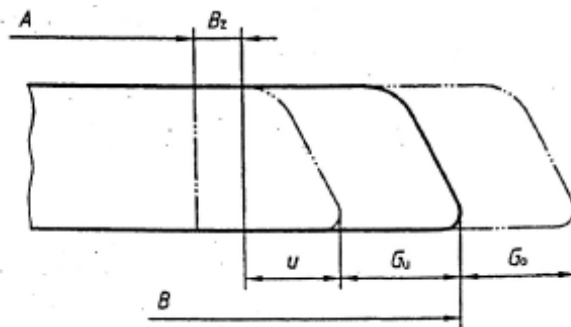
5.1.5 Rozměrové úchytky

Jestli je na výkrese nebo v jiné dokumentaci (jako např.: dodací podmínky) odkaz na normu ČSN EN ISO 9013, musí být rozměry považovány za jmenovité rozměry. Skutečné rozměry se určí na čistém řezu. Mezní úchytky jsou rozděleny do dvou tolerančních tříd (1 a 2) v závislosti na tloušťce řezaného materiálu a jmenovitém rozměru.

- Úchytky platí pouze pro řezy plazmou a plamenem („pro řezy provedené laserem závisí dosažitelné úchytky v podstatě na geometrii a předběžné úpravě řezaného materiálu“ ([01], 2004, s.18))
- Poměr délky a šířky zpracovávaného kusu nesmí být větší než 4:1 a obvodová délka řezu musí být větší než 350 mm (nebo musí být úchytky stanoveny výrobcem v souladu s touto normou)
- Úchytky kvality povrchu řezu jsou posuzovány odděleně od rozměrových úchytek

5.1.5.1 Rozměrové úchytky dílů s dodatečným opracováním

Pro možnost dodržení jmenovitého rozměru dílu, je třeba přičíst přídavek na opracování povrchu B_z . Když není přídavek na opracování uveden na výkrese, stanoví se z tabulky 5. „Skutečné množství materiálu, které se má odstranit, závisí na přídavku na opracování, úchylce kolmosti nebo úhlové úchylce a na průměrné výšce prvků profilu pro příslušný řezací proces.“ ([01], 2004, s.20)



- A je rozměr dokončeného dílu
- B je jmenovitý rozměr uříznutého dílu
- B_z je přídavek na opracování
- G_u je horní mezní úchytky
- G_d je dolní mezní úchytky

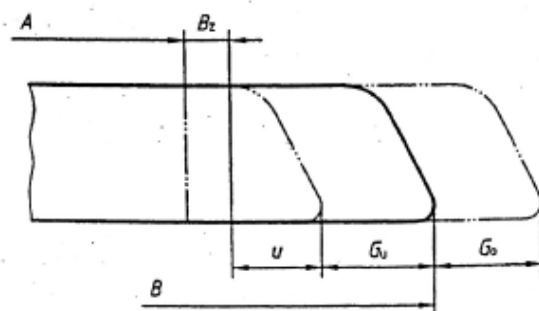
Obrázek 22 - Tolerance dílu s dodatečným opracováním

Tabulka 5 - Přídavek na opracování B_z

Tloušťka řezu, a	Přídavek na opracování pro jakýkoli povrch řezu, B_z
$\geq 2 \leq 20$	2
$> 20 \leq 50$	3
$> 50 \leq 80$	5
> 80	7

5.1.5.2 Rozměrové úchytky dílů bez dodatečného opracování

Aby bylo možné umístit zpracovávaný kus do montážního celku, je jmenovitý rozměr uříznutého dílu B dán jmenovitým rozměrem dokončeného dílu A , který je zmenšen o horní mezní úchytku G_o . „Skutečný rozměr dílu, vyrobeného tepelným dělením vždy odpovídá největšímu rozměru u vnějších rozměrů a nejmenšímu rozměru u vnitřních rozměrů.“ ([01], 2004, s.19)



A je jmenovitý rozměr dokončeného dílu

B je jmenovitý rozměr uříznutého dílu

G_o je horní mezní úchytky

G_u je dolní mezní úchytky

Obrázek 23 - Rozměrové úchytky dílů bez dodatečného opracování

5.2 Požadavky na tvrdost povrchů volných hran [02]

Norma ČSN EN 1090-2+A1 uvádí maximální přípustnou tvrdost povrchů volných hran pro konstrukční oceli. Tvrdost povrchů volných hran musí být v souladu s následující tabulkou 4, proto se musí kontrolovat procesy, které vedou ke zvýšení tvrdosti jako tepelné dělení, stříhání a děrování. Pokud je třeba pro dosažení požadované tvrdosti volných hran, tak se musí materiál předežhřát.

Tabulka 6 - Maximální dovolené hodnoty tvrdosti (HV10)

Normy výrobků	Pevnostní třída oceli	Hodnoty tvrdosti
EN 10025-2 až -5	S235 až S460	380
EN 10210-1, EN 10219-1		
EN 10149-2 a EN 10149-3	S260 až S700	450
EN 10025-6	S460 až S690	
POZNÁMKA Tyto hodnoty se použijí podle EN ISO 15614-1 pro pevnostní třídu ocelí, které jsou uvedeny v ISO/TR 20172.		

5.3 Hodnocení kvality řezu při tepelném dělení [02]

Dle normy ČSN EN1090-2+A1 se musí tepelné dělení materiálu provádět takovým způsobem, aby se splnily požadavky na maximální tvrdost hran, geometrické tolerance a přímost volných hran.

Tyto parametry se musí pravidelně kontrolovat na těchto částech výrobku:

- Přímý řez nejtlustšího základního výrobku
- Přímý řez nejtenčího základního výrobku
- Ostrý úhel z reprezentativní tloušťky
- Zakřivený oblouk z reprezentativní tloušťky

Měření se musí provést na vzorcích s přímým řezem o délce nejméně 200 mm a kontrolovat splnění požadované jakostní třídy. „Ostrý úhel a zakřivené vzorky se musí kontrolovat, aby se prokázalo, zda byly zhotoveny hrany ekvivalentního standardu přímého řezu“ ([02], 2012, s.46).

V následující tabulce jsou jednotlivá toleranční pole pro úchylky kolmosti a úchylky úhlu u a jednotlivá toleranční pole pro střední výšku profilu Rz5. Podle těchto tolerančních polí se vyhodnotí třídy provedení EXC, kde nejpřísnější třída je EXC4. Třidu provedení EXC stanovuje již konstruktér ve fázi vývoje. Určuje technické požadavky na

jakost podle náročnosti konstrukce. Třída provedení může být odlišná pro různé jednotlivé části konstrukce. Třída provedení se vyhodnotí podle tabulky 7.

Tabulka 7 - třídy provedení EXC

	Úchylka kolmosti a úchylka úhlu u	Střední výška profilu Rz5
EXC2	Toleranční pole 4	Toleranční pole 4
EXC3	Toleranční pole 4	Toleranční pole 4
EXC4	Toleranční pole 3	Toleranční pole 3

6 Vady při řezání kyslíkem, laserem a plazmou [03]

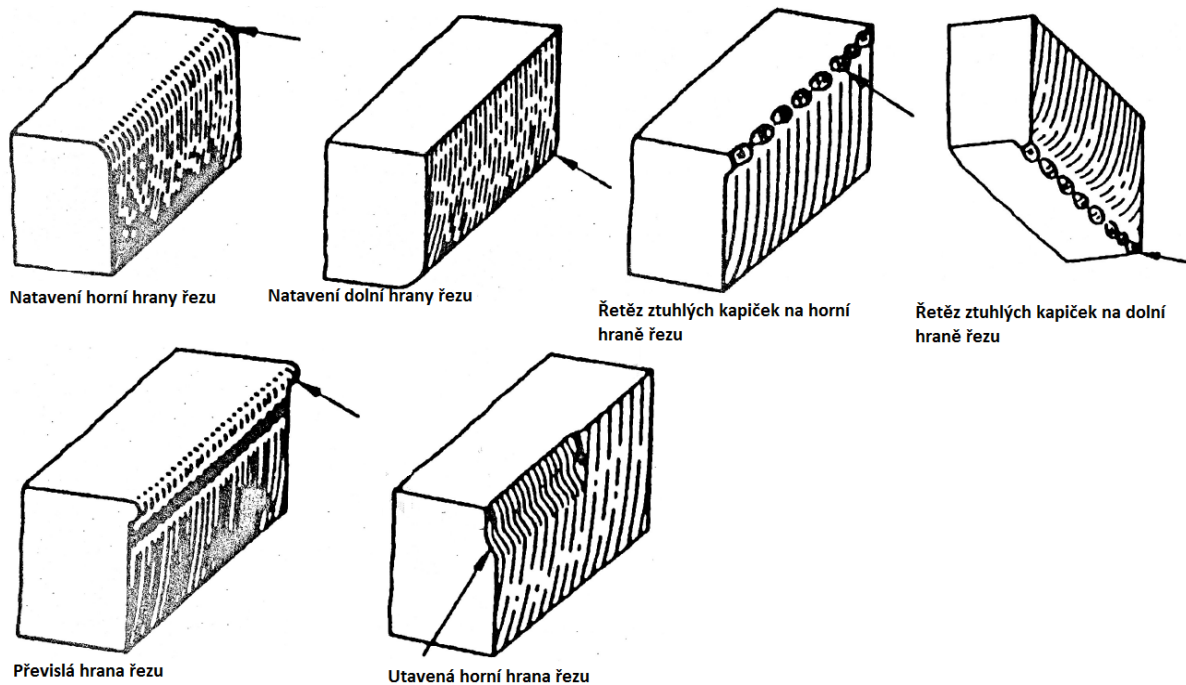
Vady vzniklé při tepelném dělení jsou popsány v normě ČSN EN 12584:1999 - Vady při řezání kyslíkem, laserem a plazmou. Norma obsahuje pouze typ a tvar vad.

Vady jsou rozříděny do následujících skupin:

- Vady na hranách řezu
- Trhliny
- Strusky
- Vady na plochách řezu
- Jiné vady

6.1 Vady na hranách řezu

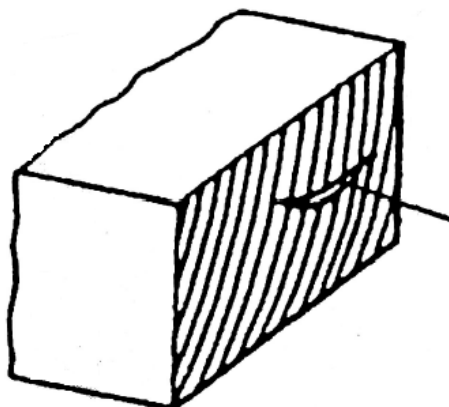
Jedná se o poškození plochy řezu nebo o chybějící materiál na hraně řezu.



Obrázek 24 - Vady na hranách řezu

6.2 Trhlina

Vznik trhliny vlivem ohřevu nebo chladnutí.

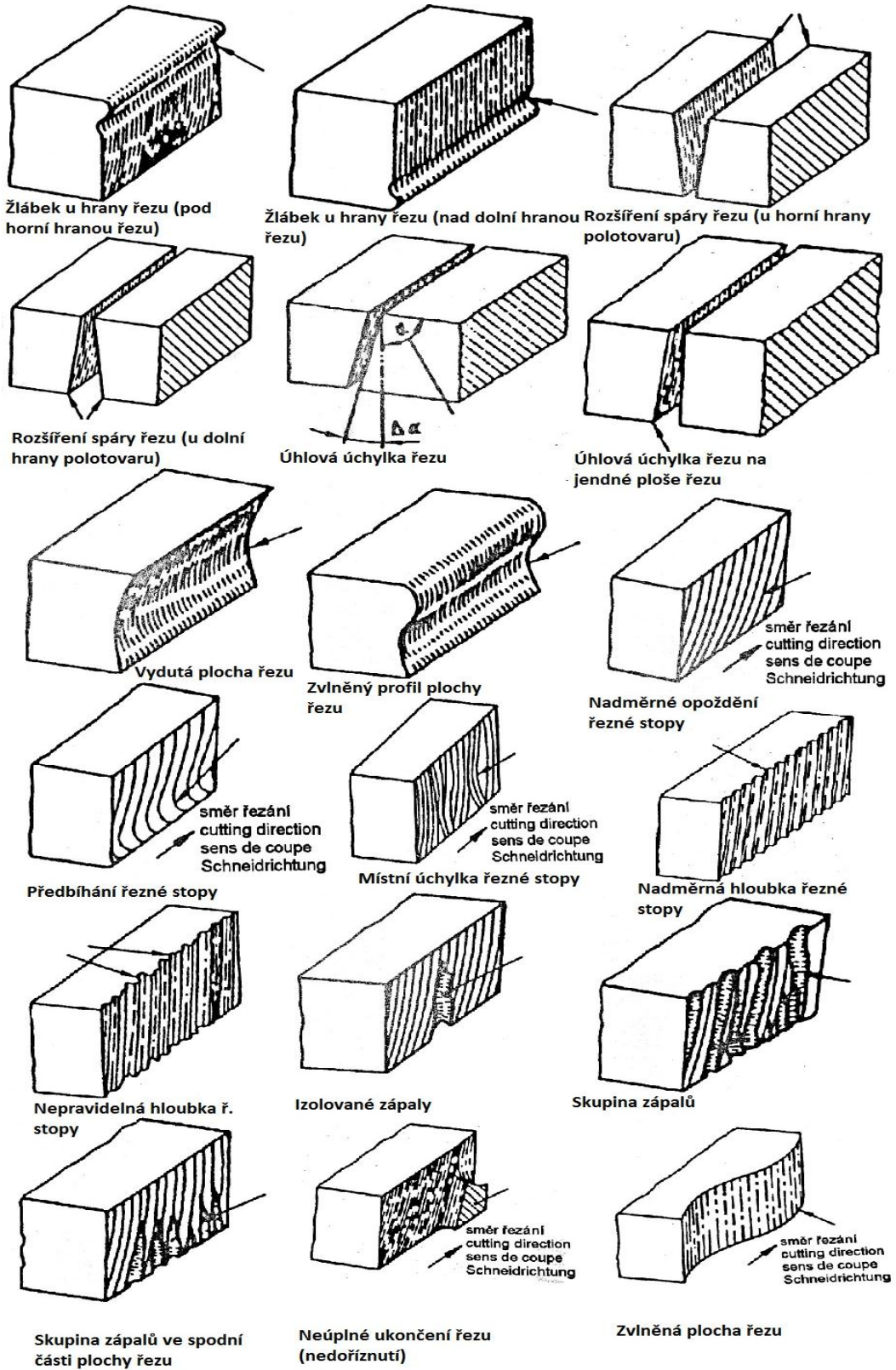


Makrotrhlina na ploše řezu

Obrázek 25 - Makrotrhlina na ploše řezu

6.3 Vady na plochách řezu

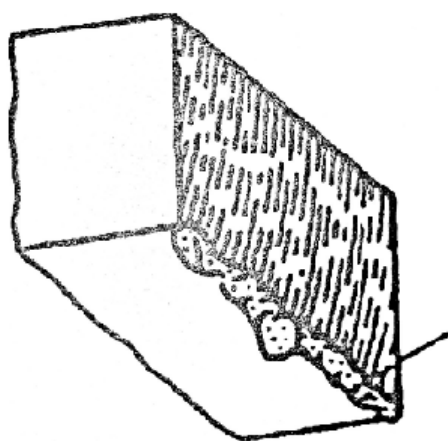
Úchytky od požadovaných tvarů.



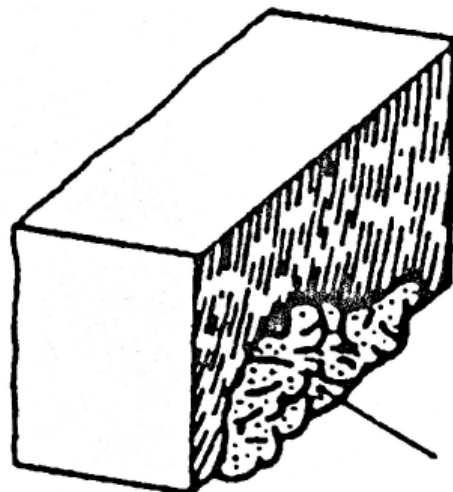
Obrázek 26 - Vady na plochách řezu

6.4 Ulpívající struska

Těžko odstranitelná struska na hranách řezu nebo na ploše řezu.



Ulpívající struska na spodní hraně řezu

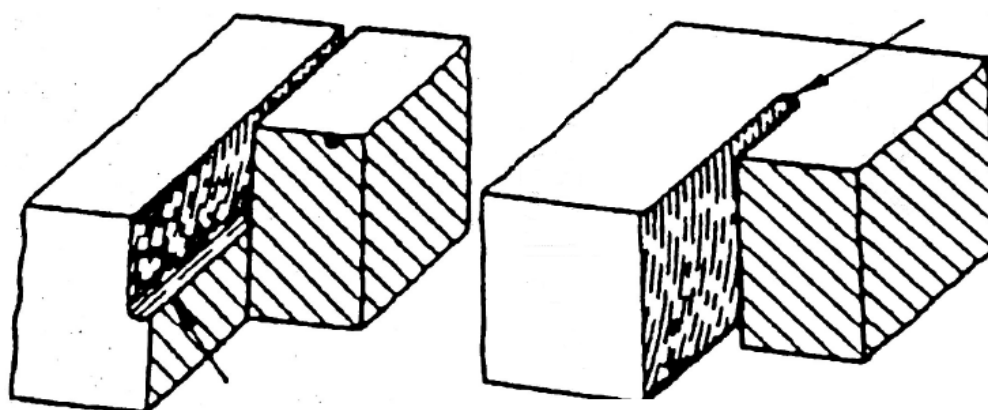


Slepenec strusky na ploše řezu

Obrázek 27 - ulpívající struska

6.5 Ostatní vady

Vady jako nadměrně široká spára, přerušovaný řez, úchytky na začátku řezu, při propalování,



Přerušovaný řez ve směru hloubky řezu

Přerušování řez ve směru řezání

Obrázek 28 - Ostatní vady

7 Stanovení tvrdosti podle Vickerse [04]

Měření tvrdosti podle Vickerse je popsáno v normě ČSN EN ISO 6507. Princip měření tvrdosti touto metodou spočívá ve vlačování diamantového tělíska tvaru pravidelného jehlanu do materiálu pod daným zatížením po danou dobu. Po odlehčení zanechá diamantové tělísko (indentor) v materiálu otisk dvou uhlopříček a jejich délku vyhodnocujeme.

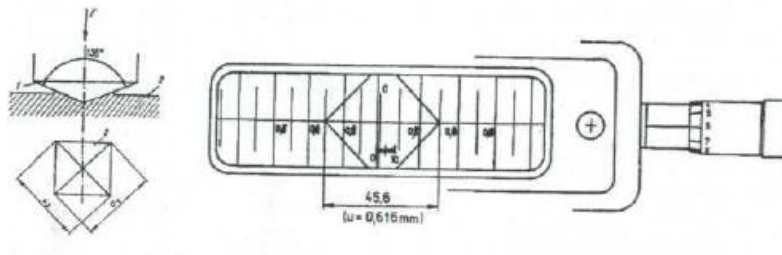
Vzorec :

$$HV = \frac{0,189.F}{u^2} = \frac{F}{S}$$

- F – zkušební zatížení v newtonech, např.: HV10 je 10 kg (100 N)
- u – je aritmetický průměr uhlopříček v mm

Značení tvrdosti : **640 HV 30 / 20**

- 640 – hodnota tvrdosti dle Vickerse
- HV - značka tvrdosti
- 30 – hodnota zatížení v kg
- 20 – zkušební zatížení v sekundách (pokud je větší než 15 s)



Obrázek 29 - Indentor a odečítání vtisku na tvrdoměru

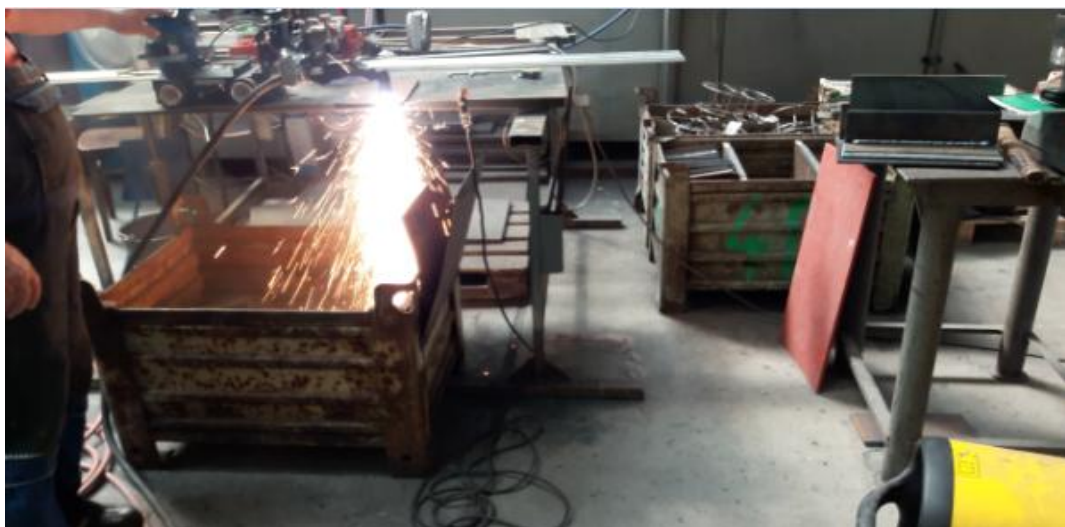
Pro přesné měření musí být povrch zbaven okují, cizích tělísek, mastnoty a musí být hladký a rovný. Vzdálenost dvou vtisků musí být minimálně trojnásobek u a tloušťka měřeného materiálu musí být minimálně 1,5 násobek u .

8 Experimentální část

Experimentální část se zabývá požadavky na kvalitu řezných hran při použití plazmového řezacího stroje. Byla změřena úchylka kolmosti u , průměrná výška profilu $Rz5$ a dále byl kladen důraz na tvrdost povrchů volných hran. Naměřené hodnoty byly vyhodnoceny pomocí normy ČSN EN ISO 9013:2002 a normy ČSN EN 1090-2+A1.

8.1 Podmínky vyhotovení řezů

- Pro vyhotovení řezů byl použit invertorový zdroj ESAB Powercut 875 s hořákem PT-32 pro ruční použití, jehož posuv byl zautomatizovaný pomocí přenosného svařovacího traktoru Weldycar NV.
- Jako základní materiál pro experiment byl zvolen plech z ořezuvzdorné oceli Hardox 450 o tloušťce 10 mm.
- Vzorky byly nařezány třemi různými rychlostmi: 40 cm/min, 55 cm/min a 70 cm/min.
- Pro všechny tři rychlosti zůstalo zvoleno stejné nastavení zdroje i stlačeného vzduchu.



Obrázek 30 - ukázka průběhu řezání

8.1.1 Plazmový řezací zdroj ESAB Powercut 875 [05], [06]

Jedná se o zařízení ze série výkonných, kompaktních, invertorových (400 V), pálicích zdrojů, které slouží pro tepelné dělení oceli, hliníku, slitin hliníku, mědi, mosazi a podobných materiálů. „Zdroj je schopen dělit nelegované materiály do tloušťky 32 mm, čistý řez do 22 mm“. ([05], 2006, s.1) Zařízení potřebuje pro provoz externí přívod stlačeného a odvlhčeného vzduchu. Je použitelný ve výrobních halách, ale také i pro mobilní pracoviště.

Tabulka 8 - Specifikace zdroje Powercut 875

Technická data

	POWERCUT 875
Napájení napětí V/Hz,	400V nebo 230V /50Hz
Rozsah proudu A	20-60 A
Maximální výstup při 40°C DZ 40% A	60
Napětí naprázdno V	275
Účinnost při maximálním proudu	0,92
Účinnost při max. proudu, %	90
Rozměry, d x š x v, mm	516 x 318 x 409
Váha, kg	39,5
Pracovní teplota, °C	-10 až +40
Třída krytí	IP 23S
Aplikační třída	S
Minimální tlak vzduchu, bar	5,5, 165 l/min



Obrázek 31 - ESAB Powercut 875

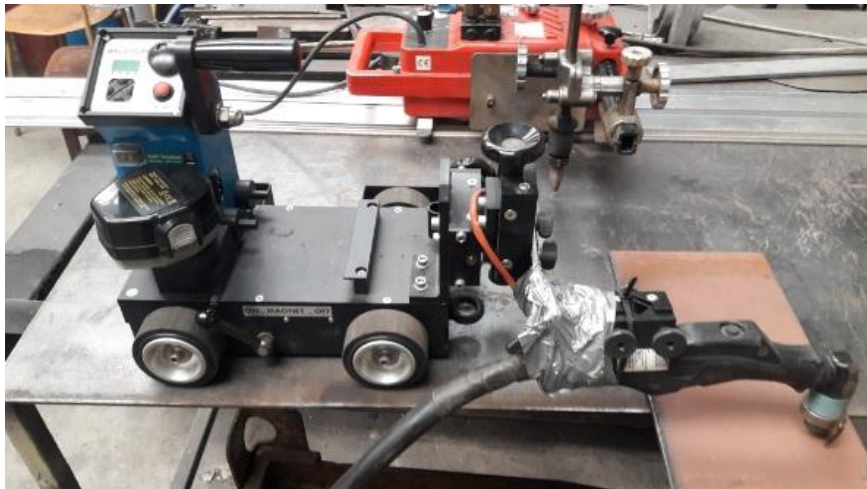
Součástí zdroje Powercut 875 je i hořák PT-32 EH. Jedná se o ergonomický hořák pro ruční použití se dvěma vypínači pro snadné ovládání.



Obrázek 32 - Hořák PT-32 se zakótovanými rozměry

8.1.2 Manipulátor Weldycar NV [07]

Jedná se o přenosný, autonomní svařovací traktor se čtyřkolým podvozkem, magnetickou přísavkou, který se obvykle používá pro svařování metodou MIG/MAG bez použití kolejnic. Tento experiment je důkazem, že se dá svařovací traktor použít i pro dělení materiálu plazmovým řezákem. Traktor má robustní konstrukci (11 kg), napájení pomocí 14 V baterie, síla magnetu je 25 kg a rychlost se dá nastavit v rozmezí 5 až 70 cm/min.



Obrázek 33 - Weldycar a hořák PT-32

8.1.3 Základní materiál pro experiment [08], [09]

Jako ZM byl použit ocelový plech s označením Hardox 450. Tato ocel patří mezi otěruvzdorné oceli (tzn. s vysokou tvrdostí), ale zachovává si většinu vlastností konstrukčních ocelí jako jsou: vrubová houževnatost, tažnost a také technologické vlastnosti jako svařitelnost, ohýbatelnost a obrobitelnost.

Hlavní výhodou ocelí Hardox je vysoká tvrdost a zároveň nízký obsah uhlíku. Tyto vlastnosti zaručují lepší svařitelnost než obdobně tvrdá konstrukční ocel (např. ČSN 11523). Toto přináší nezanedbatelné výhody v konstrukcích s velkým počtem svarových spojů, v místech, kde jejich kvalita výrazně ovlivňuje funkčnost jako korby nákladních automobilů, dopravníky, lžice,

Tabulka 9 – Chemické složení oceli Hardox 450

Hardox 450	C	Fe	Zn	Si	Mn	Al	Cr
Zastoupení v [%]	0,4	91,5	2,9	2,9	1	0,5	0,2

Name	Hardness* [HBW]	Toughness** KV, - 40°C [J]	Yield Strength** R _{0,2} [MPa]	Tensile strength** R _m [MPa]	Carbon equivalent**		Thickness range [mm]
					CEV [%]	CET [%]	
Hardox HiTuf***	310–370	95	950	980	0.55	0.36	40–120
Hardox 400	370–430	45	1000	1250	0.37	0.27	4.0–130
Hardox 450	425–475	40	1200	1400	0.48	0.35	3.2–80
Hardox 500****	470–530	30	1300	1550	0.62	0.41	4.0–80
Hardox 550	525–575	30	1400	1700	0.72	0.48	10–50
Hardox 600	570–640	20	1650	2000	0.73	0.55	8.0–50

Obrázek 34 - Mechanické vlastnosti ocelí Hardox

8.1.5 Popis experimentu

Samotný experiment proběhl v dílnách Fakulty strojní ČVUT na výše zmíněných zařízeních byly vytvořeny vzorky řezů o rozměrech 50 x 200 mm z plechu Hardox 450 o tloušťce 10 mm. Byly použity různé parametry, které měly za úkol zmapovat vliv řezné rychlosti na změnu vlastností řezných hran. Pro zapnutí a vypnutí hořáku byl použit čtyřtaktní režim ovládání, což minimalizuje manipulaci s hořákem.

Tabulka 10 - Nastavení zdroje ESAB a traktoru Weldycar při řezání

Vzorek	Proud [A]	Tlak [bar]	Rychlost [cm/min]
r. 40	60	7	40
r. 55	60	7	55
r. 70	60	7	70



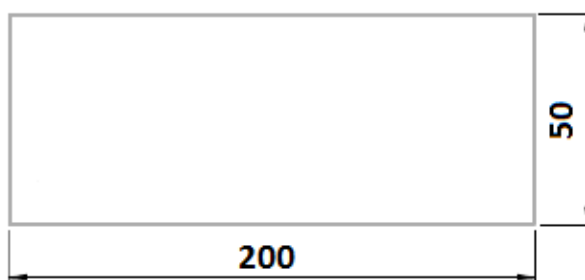
Obrázek 35 - Příklady nastavení

8.1.6 Výsledné vzorky

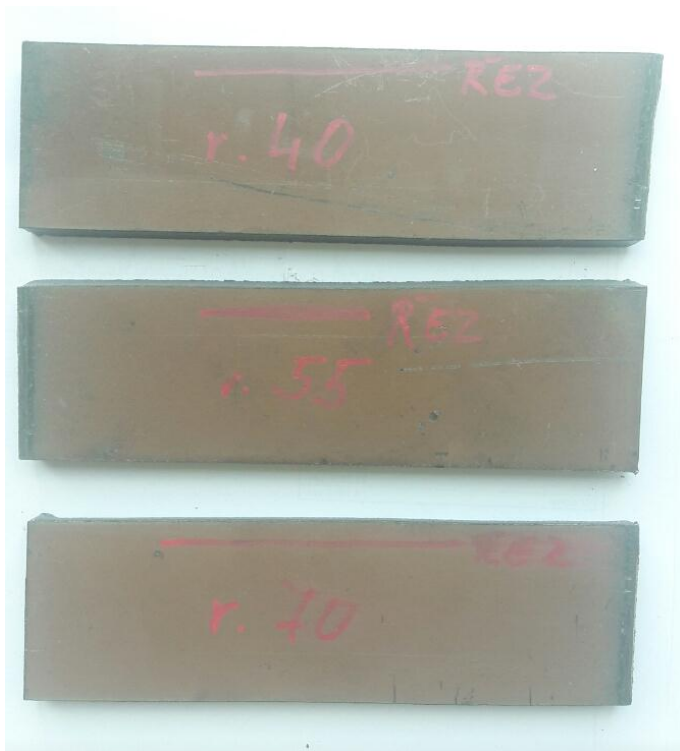
Norma ČSN EN 1090-2 uvádí požadavky na měření vzorků při procesech tepelného dělení:

- přímý řez nejtlustšího základního výrobku
- přímý řez nejtenčího základního výrobku
- ostrý úhel z reprezentativní tloušťky
- zakřivený oblouk z reprezentativní tloušťky
- řez musí mít minimálně 200 mm

Pro zjednodušení experimentu a vzhledem k časovým možnostem nebyly plně dodrženy požadavky normy na podobu a vzhled zkušebních vzorků, ale experiment byl omezen na přímý řez.



Obrázek 37 - Tvar řezaného vzorku



Obrázek 38 - Výsledné vzorky



Obrázek 39 - Řezná hrana na vzorcích (r.40, r.55, r.70)

8.2 Úprava vzorků po řezání

Ulpělá struska na spodní straně řezu byla velmi snadno odstranitelná pouze plochým sekáčem. Dále bylo třeba vzorky okartáčovat ocelovým kartáčem, aby byly zbaveny nečistot, barvy a oxidů před měřením geometrických charakteristik, jak to předepisuje norma ČSN EN ISO 9013:2002. „Měření se musí provádět na kartáčovaných řezech, očištěných od oxidů a mimo oblast s vadami.“ ([01], 2002, s.13). Před měřením tvrdosti byly odebrány zkušební tělíska ve střední části vzorků o šířce 25 mm, řezáním na přesné metalografické pile, která je intenzivně chlazena vodou, aby nedošlo k tepelnému ovlivnění.



Obrázek 41 - Vzorky připravené pro měření tvrdosti



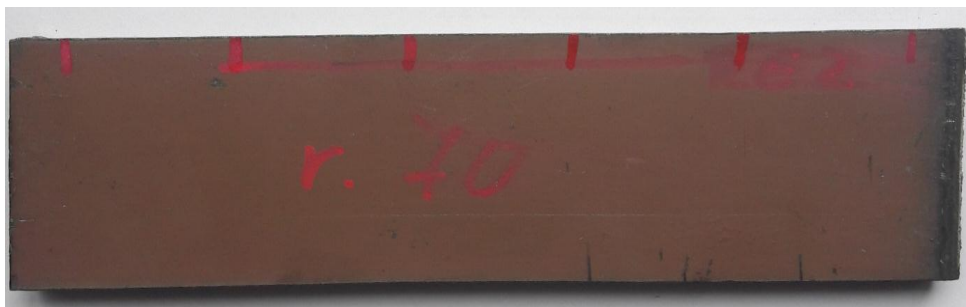
Obrázek 40 - Metalografická pila Struers Labotom 5

9 Geometrické požadavky

Měření geometrických charakteristik bylo realizováno v Měrovém a školicím středisku Zeiss na FS, ČVUT v Praze. Vyhodnocena byla úchylka kolmosti řezu u a průměrná výška profilu $Rz5$ dle normy ČSN EN ISO 9013:2002. Poté jsme určili jakost řezaných povrchů podle normy ČSN EN 1090-2+A1.

9.1 Měření úchylky kolmosti řezu „u“

Měření kolmosti řezu a úhlu řezu probíhalo na měřicím zařízení Zeiss Calypso Prismo. Kolmost byla měřena na šesti bodech řezu ve střední části vzorku. Jednotlivé body byly od sebe vzdáleny 30 mm. První a poslední bod byl 10 mm od hrany vzorku. viz obrázek 36.

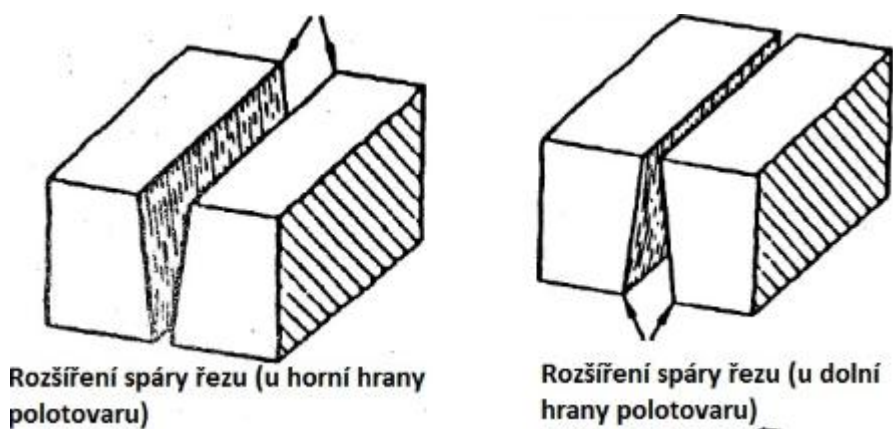


Obrázek 42 - Místa měřená na vzorku r.70



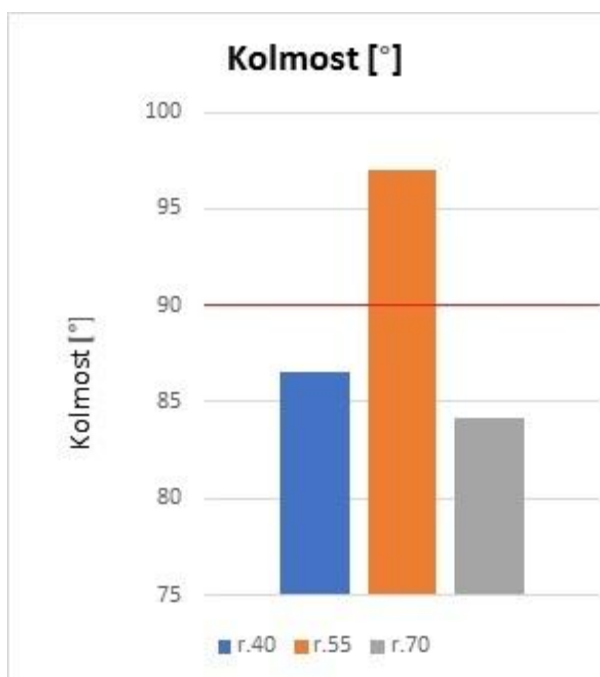
Obrázek 43 - Zeiss Calypso Prismo, ČVUT

Pokud je kolmost řezných hran větší než 90° , tak to znamená zúžení řezné mezery. Pokud je hodnota kolmosti menší než 90° , tak se jedná o rozšíření řezné mezery.

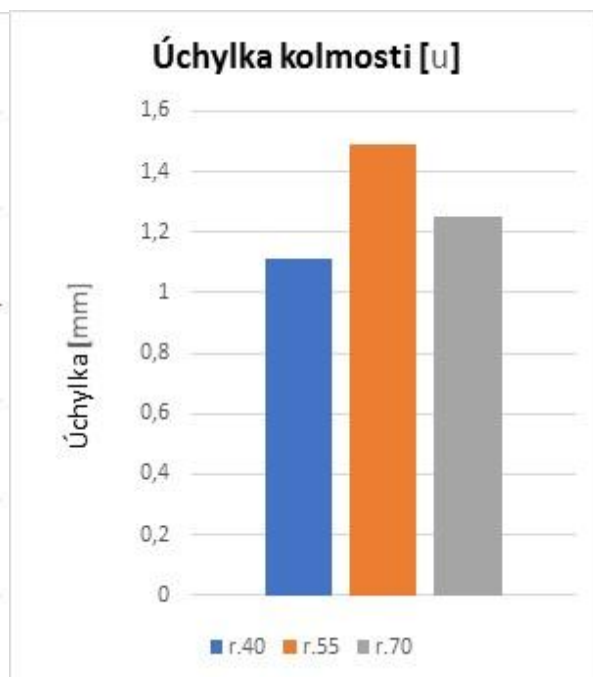


Obrázek 44 - Příklad zúžení a rozšíření řezné mezery

Následující sloupcové grafy zobrazují hodnoty naměřené na vzorcích r. 40, r.55 a r.70.



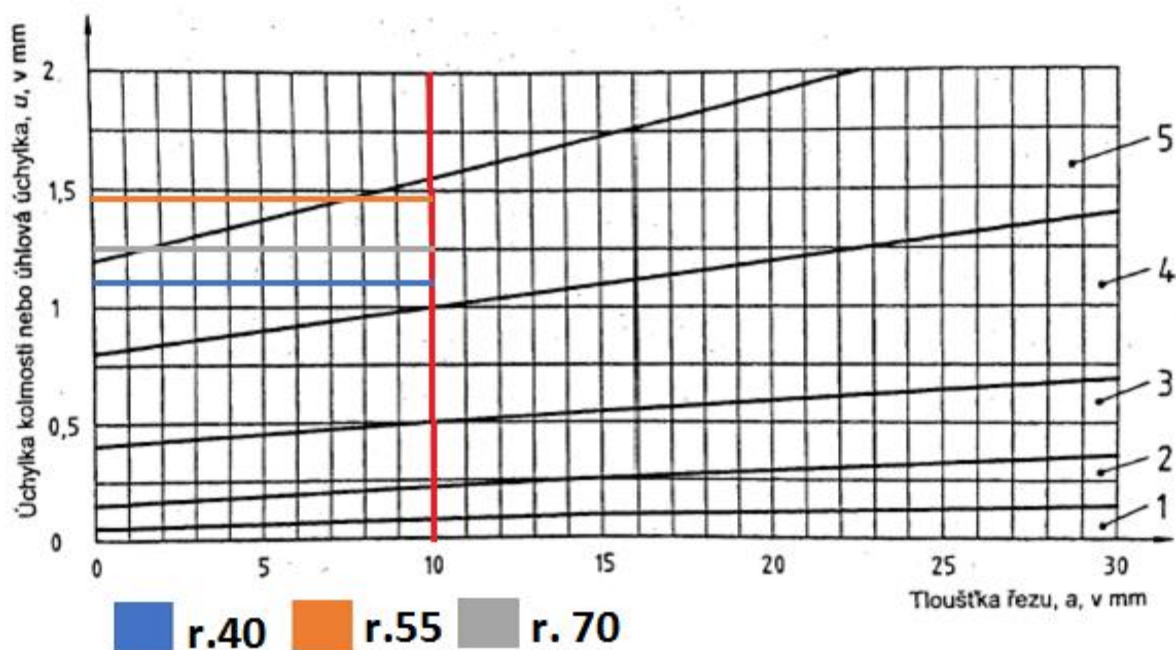
Obrázek 46 - Kolmost řezů



Obrázek 45 - úchylka kolmosti u

9.1.1 Vyhodnocení úchytky kolmosti „u“

Úchytky kolmosti řezu byla vyhodnocena a zařazena do tolerančních polí v tabulce 11. Hodnoty u vyšly rozdílné a poměrně vysoké. Je možné, že se jedná o důsledek uchycení ručního hořáku na traktor Weldycar.



Obrázek 48 - Vyhodnocení tolerančních polí úchytky kolmosti u

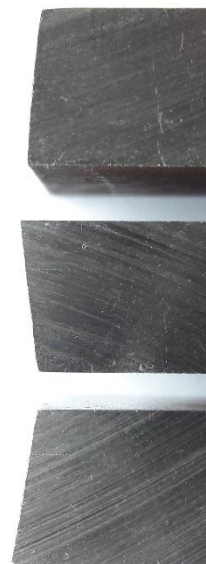
Tabulka 11 - Vyhodnocení úchytky kolmosti u pro tloušťku 10 mm

Vzorek	Kolmost řezu [°]	Úchytky kolmosti u [mm]	Toleranční pole
r.40	86,55	1,11	5
r.55	97,03	1,49	5
r.70	84,19	1,25	5

r. 70

r. 55

r. 40



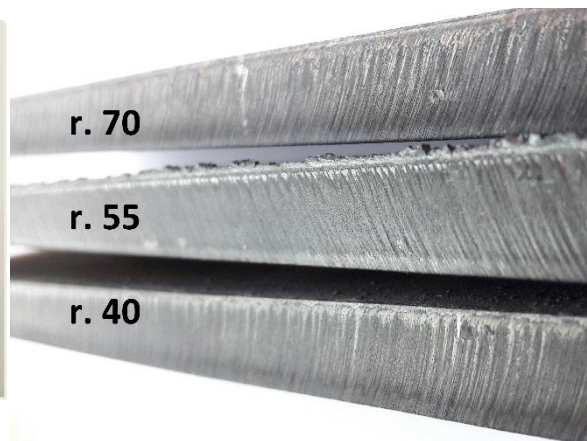
Obrázek 47 - Detail na řeznou hranu v řezu

9.2 Měření průměrné výšky profilu „Rz5“

Měření profilu $Rz5$ probíhalo na profiloměru Mahr XCR 20. Měření bylo provedeno v souladu s normou ČSN EN ISO 4288:1999. Celková oblast měření je 17,5 mm, ta se skládá z 2,5 mm náběhové délky, 12,5 mm měřené délky, která je rozdělena do pěti 2,5 mm úseků, a 2,5 mm výběhové délky.

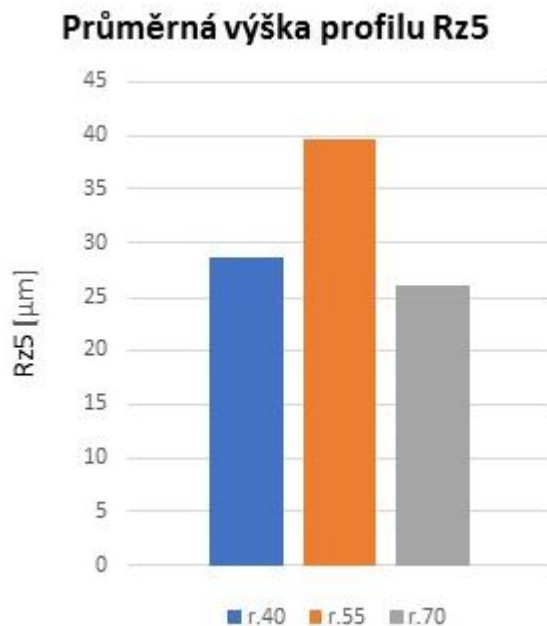


Obrázek 50 - profiloměr Mahr XCR20, ČVUT



Obrázek 49 - Detail řezné hrany

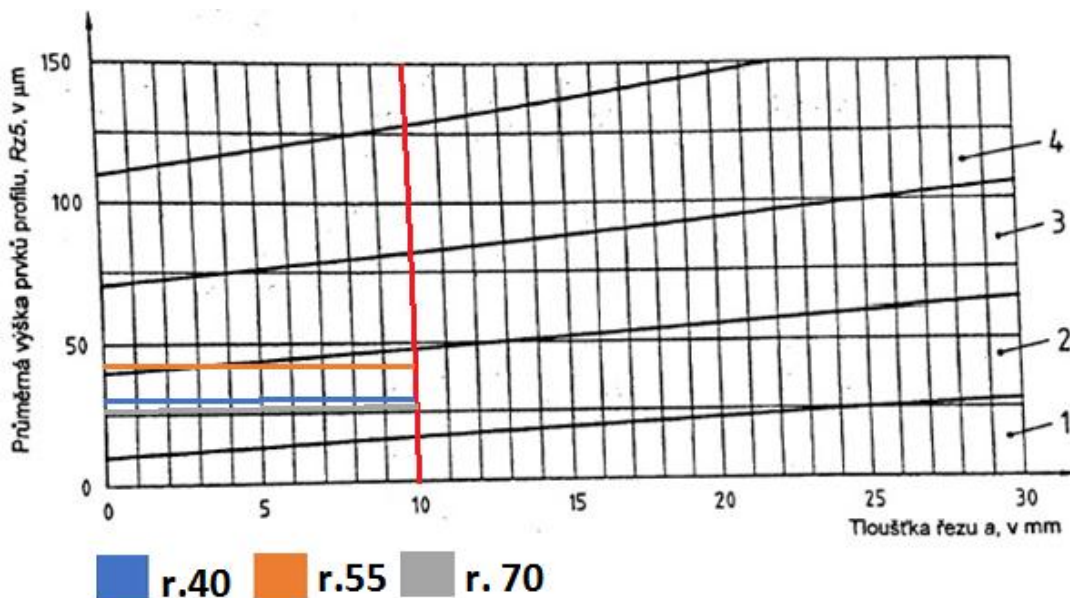
Průměrná výška profilu $Rz5$ naměřená na vzorcích r.40, r.55 a r.70 je uvedena ve sloupcovém grafu 45.



Obrázek 51 - Průměrná výška profilu Rz5

9.2.1 Vyhodnocení průměrné výšky prvků profilu „Rz5“

Všechny hodnoty se nacházejí v tolerančním poli 2. Nejhorších výsledků bylo dosaženo u vzorku se střední rychlostí řezání 55 cm/min.



Obrázek 52 - Vyhodnocení tolerančních polí průměrné výšky prvků profilu Rz5

Tabulka 12 - Vyhodnocení průměrné výšky profilu Rz5 pro tloušťku 10 mm

Vzorek	r.40	r.55	r.70
Rz5 [μm]	28,67	39,69	26,02
Toleranční pole	2	2	2

9.3 Celkové vyhodnocení geometrických požadavků

Výsledná toleranční pole vyhodnocená dle normy ČSN EN ISO 9013 se dosadí do tabulky č. 13, vyňaté z normy ČSN EN ISO 1090-2+A1, a vyhodnotí se třída provedení EXC.

Ovšem úchylka kolmosti u vyšla u všech vzorků v tolerančním poli 5, která se nenachází v následující tabulce, ale odpovídá třídě provedení EXC1. „Řezné hrany EXC1, které jsou bez významných nepřesností, jsou přijatelné za předpokladu, že jsou odstraněny všechny okraje. Pro kolmost a úlovou toleranci u lze použít toleranční pole 5.“ ([02], 2012, s.46)

Je známo, že při svařování plazmou vzniká tzv. „podkosení“ řezné plochy, které je třeba minimalizovat.

Lze tedy konstatovat, že ruční řezání s největší pravděpodobností nebude mít požadovanou kvalitu z pohledu geometrických charakteristik – nevyhověla by s největší pravděpodobností úchylka kolmosti.

Pro experiment sice nebylo použito ruční řezání, ale „improvizovaný“ automatizovaný posuv ručního hořáku. I když byl pro zapnutí a vypnutí hořáku použit čtyřtaktní režim ovládání, což minimalizuje manipulaci s hořákem, nebylo dosaženo odpovídající kolmosti řezu.

Toto by bylo nutné lépe odladit a experiment opakovat, případně se tomuto problému vyhnout použitím plně automatizovaného způsobu řezání s patřičným odladěním řezacích parametrů.

Tabulka 13 - Jakost řezaných povrchů

	Úchylka kolmosti a úchylka úhlu u	Střední výška profilu, Rz5
EXC2	Toleranční pole 4	Toleranční pole 4
EXC3	Toleranční pole 4	Toleranční pole 4
EXC4	Toleranční pole 3	Toleranční pole 3

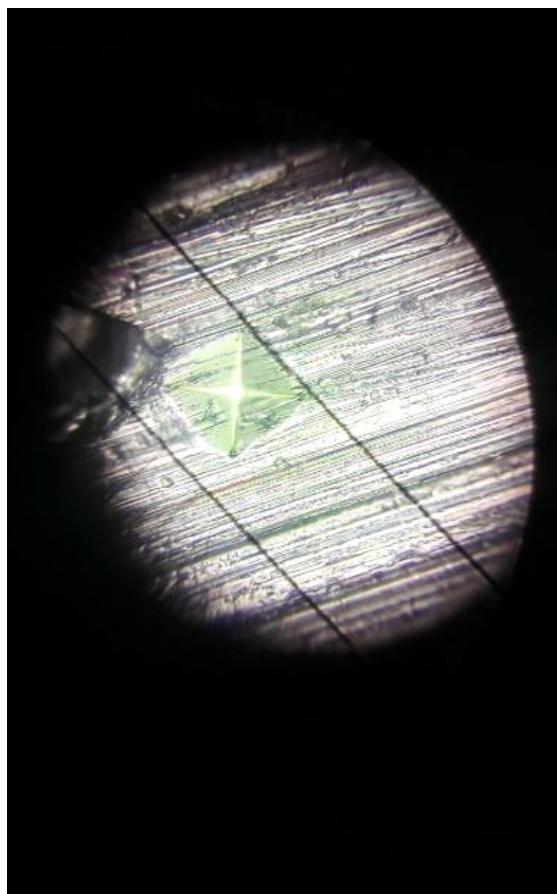
11 Měření tvrdosti

I přes nedostatek ve výrobě vzorků, který byl uveden na konci předchozí kapitoly, byly vzorky plně použitelné pro kontrolu kvality řezných ploch z hlediska ovlivnění tvrdosti.

Měření tvrdosti bylo realizováno na tvrdoměru Buehler IndentaMet 1100. K měření se použila metoda podle Vickerse se zatížením HV1. Zatížení indentoru odpovídalo 1 kg a doba působení síly vtisku byla 11 s. Jednalo se tedy v podstatě o měření tvrdosti se sníženým zatížením (resp. podle některých norem o tzv. mikrotvrdost). Měření bylo provedeno dvěma způsoby: na příčných řezech zkušebních tělísek a na povrchu vzorků.



Obrázek 54 - Buehler Indenta 11004



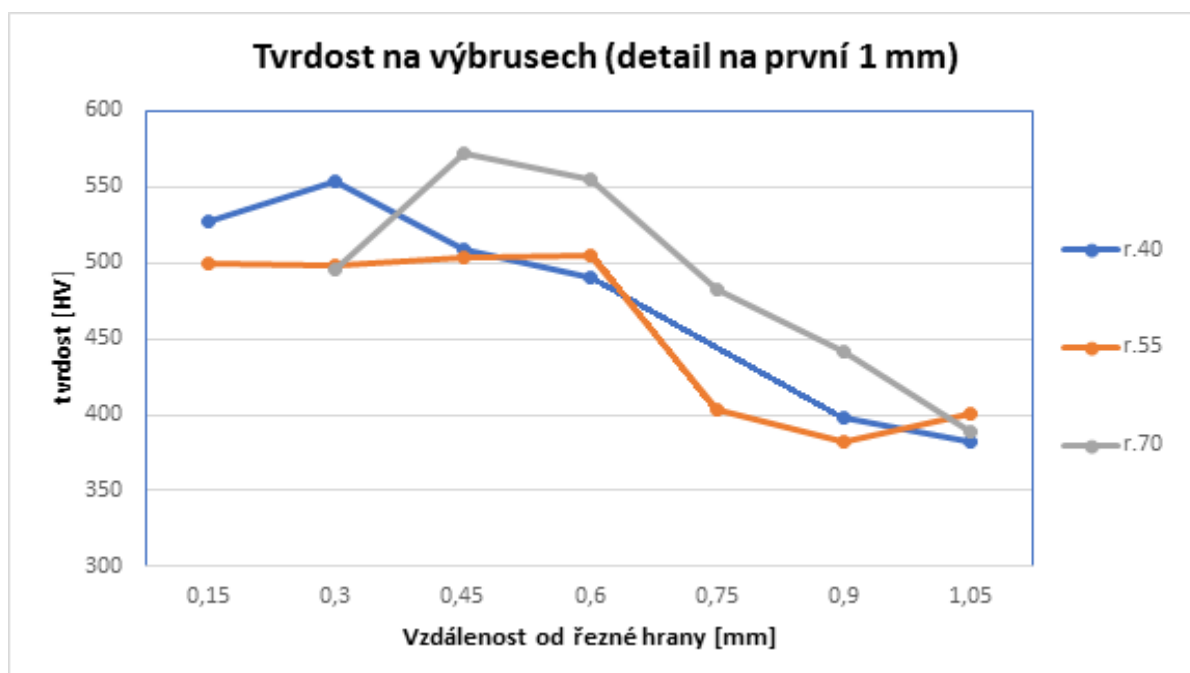
Obrázek 53 - ukázka vtisku

11.1 Měření v příčném řezu

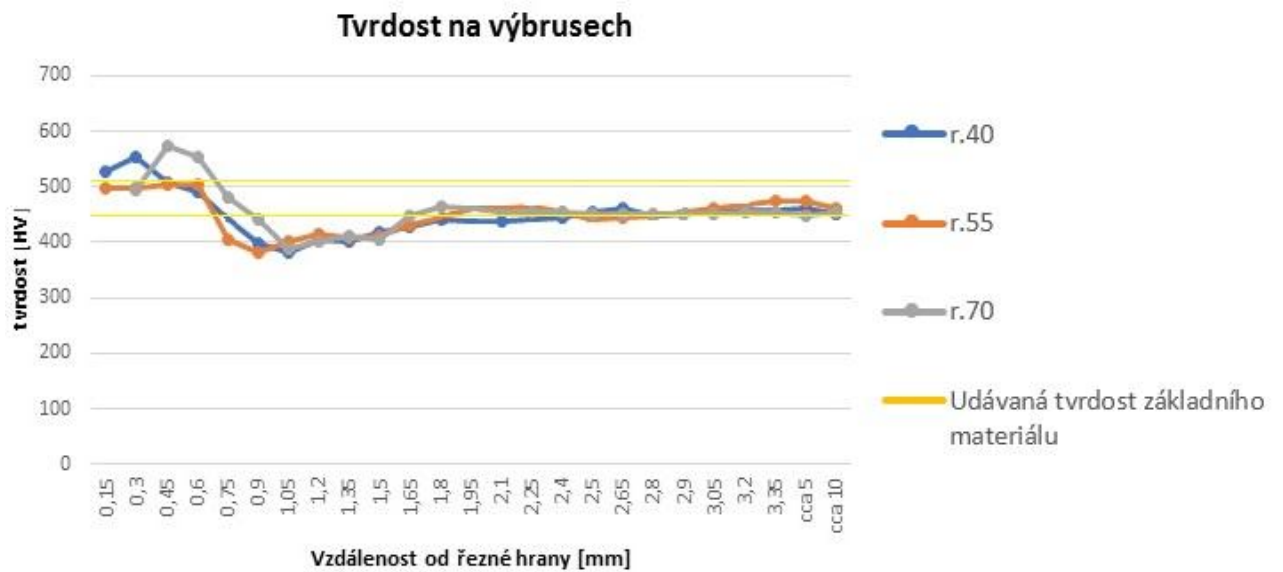
Měření proběhlo na příčných řezech zhotovených na výše uvedených zkušebních tělískách, odebraných ze zkušební vzorku pomocí metalografické pily. Měření probíhalo ve střední části vzorku (ve vzdálenosti 5 mm od povrchu) a postupovalo směrem od řezné hrany do střední části vzorku (s odstupem po 0,15 mm). V následující tabulce jsou uvedeny průměrné hodnoty tvrdosti naměřené v příčných řezech.

Tabulka 14 - Průměrné hodnoty tvrdosti na výbrusech

Vzdálenost od řezné hrany [mm]	r. 40 [HV1]	r.55 [HV1]	r.70 [HV1]
0,45	509	504	573
0,9	398	382	442
2,4	446	453	455
3,05	454	461	451
5	460	475	448
10	451	460	456



Obrázek 55 - Tvrđost na výbrusech, detail na první mm



Obrázek 56 - Měření na výbrusech

11.1.1 Vyhodnocení tvrdosti na výbrusech

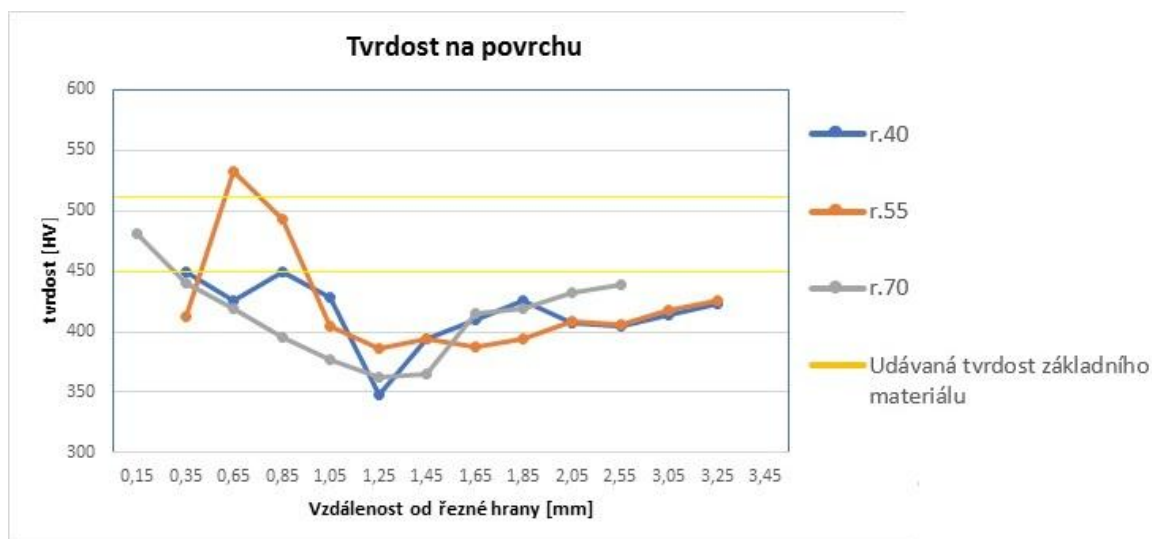
Z tabulek a grafů výše uvedených je zřejmé, že došlo ke zpevnění a následnému odpevnění materiálu, kdy v první fázi měření (v blízkosti řezu) tvrdost narostla v rozmezí 50 až 130 HV a ve vzdálenosti cca 0,75 mm klesla cca o 50 HV. Největší tvrdost byla naměřena u hrany řezu, s větší vzdáleností od hrany tvrdost klesá a poté se tvrdost navrací k hodnotám udávaným výrobcem materiálu. K ustálení dojde cca ve vzdálenosti 1,5 mm.

11.2 Měření tvrdosti na povrchu

Měření proběhlo na povrchu vzorků, které byly před měřením očištěny ocelovým kartáčem a následně odmaštěny lihem. Měření probíhalo od řezné hrany směrem do střední části vzorku. V tabulce jsou uvedeny průměrné hodnoty tvrdosti na povrchu.

Tabulka 15 - Průměrné hodnoty tvrdosti na povrchu

Vzdálenost od řezné hrany [mm]	r. 40 [HV1]	r.55 [HV1]	r.70 [HV1]
0,5	425	533	420
1	428	404	377
1,5	394	394	365
2	407	409	433
2,5	405	405	440
3	414	418	



Obrázek 57 - Tvrdost na povrchu

11.2.1 Vyhodnocení tvrdosti na povrchu

Z tabulky 15 a grafů č. 51 je zřejmé, že povrchová tvrdost se poměrně liší od tvrdosti v příčném řezu vzorků. V blízkosti řezu došlo k odpevnění materiálu (o 100 až 125 HV) a poté se tvrdost navrácí k udávaným hodnotám výrobcem materiálu.

11.3 Celkové vyhodnocení tvrdosti

Vyhodnocení tvrdosti podle normy ČSN EN ISO 1090 není v tomto případě úplně adekvátní, protože ocel Hardox 450 nepatří mezi klasické konstrukční oceli a není pro ni tedy v normě uvedené max. kritérium tvrdosti – viz tabulka č. 16.

Podle ISO/TR 15 608 ocel Hardox 450 spadá do skupiny 3.2. V ČSN EN ISO 15614-1 je maximální povolená tvrdost pro sk. 3 uvedena 450 HV, což by tedy mohlo být bráno jako kritérium. Nicméně tato hodnota je v podstatě shodná s předepsanou tvrdostí základního materiálu u Hardoxu 450, takže není úplně objektivní tuto hodnotu použít.

Ke zpevnění, vlivem tepelného ovlivnění, dochází v podstatě u všech materiálů. Každopádně v tomto případě, při vhodně zvolené rychlosti řezání, nedochází k radikální změně tvrdosti. A nemělo by to tedy při samotném následném svařování mít zásadní vliv. Navíc po nárůstu tvrdosti došlo ve všech případech i k odpevnění.

Lze tedy především konstatovat, že ustálení tvrdosti nastalo ve všech případech do 3 mm od hrany řezu. K nejvýraznějšímu ovlivnění tvrdosti na výbrusech došlo u rychlosti 70 cm/min a nejmenšímu u rychlosti 55 cm/min. Na povrchu je situace opačná a k nejvýraznějšímu ovlivnění tvrdosti došlo u rychlosti 55 cm/min a nejmenšího u rychlosti 70 cm/min.

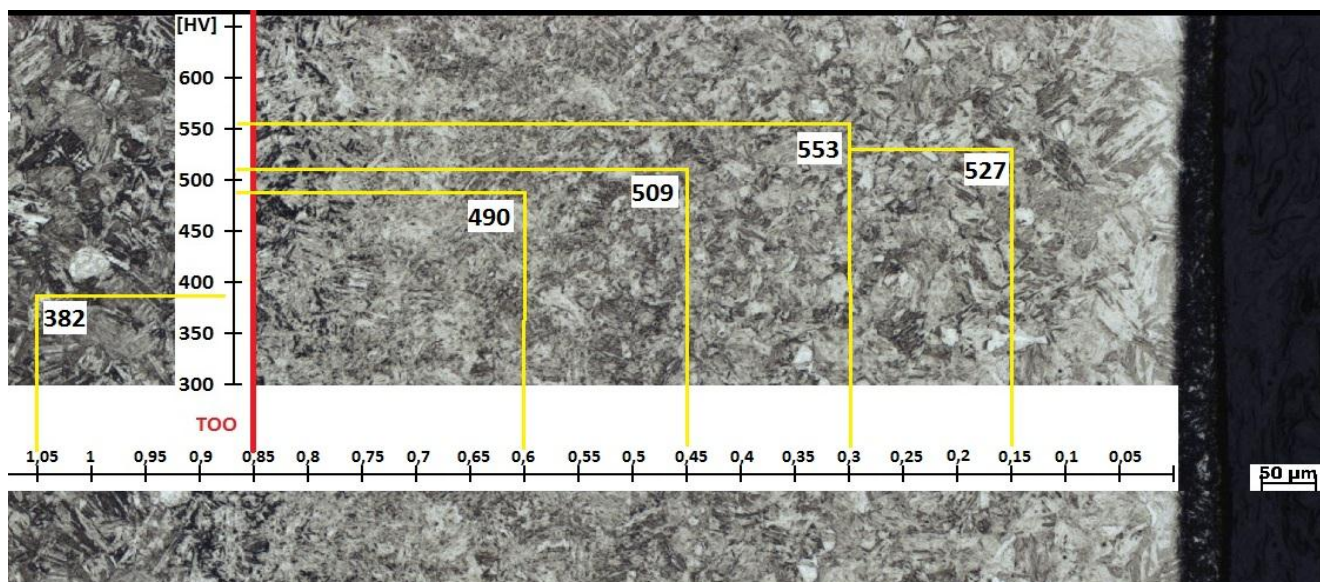
Tabulka 16 - maximální dovolené hodnoty tvrdosti

Normy výrobků	Pevnostní třída oceli	Hodnoty tvrdosti
EN 10025-2 až -5	S235 až S460	380
EN 10210-1, EN 10219-1		
EN 10149-2 a EN 10149-3	S260 až S700	450
EN 10025-6	S460 až S690	

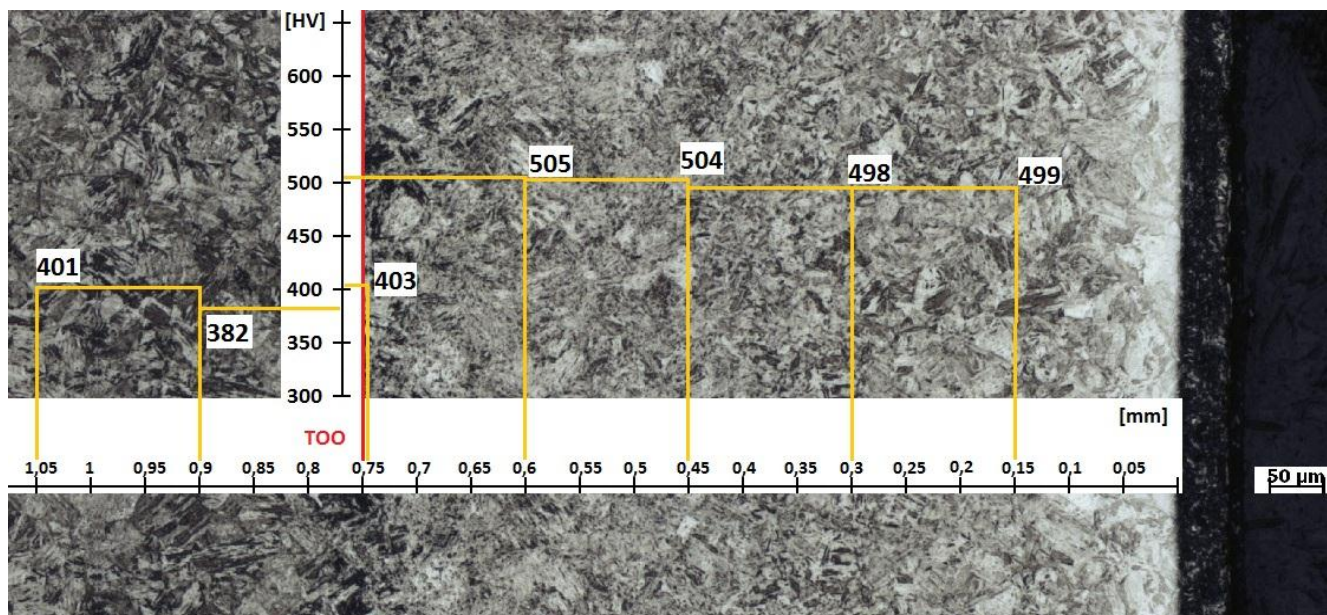
POZNÁMKA Tyto hodnoty se použijí podle EN ISO 15614-1 pro pevnostní třídu ocelí, které jsou uvedeny v ISO/TR 20172.

12 Tepelně ovlivněná oblast

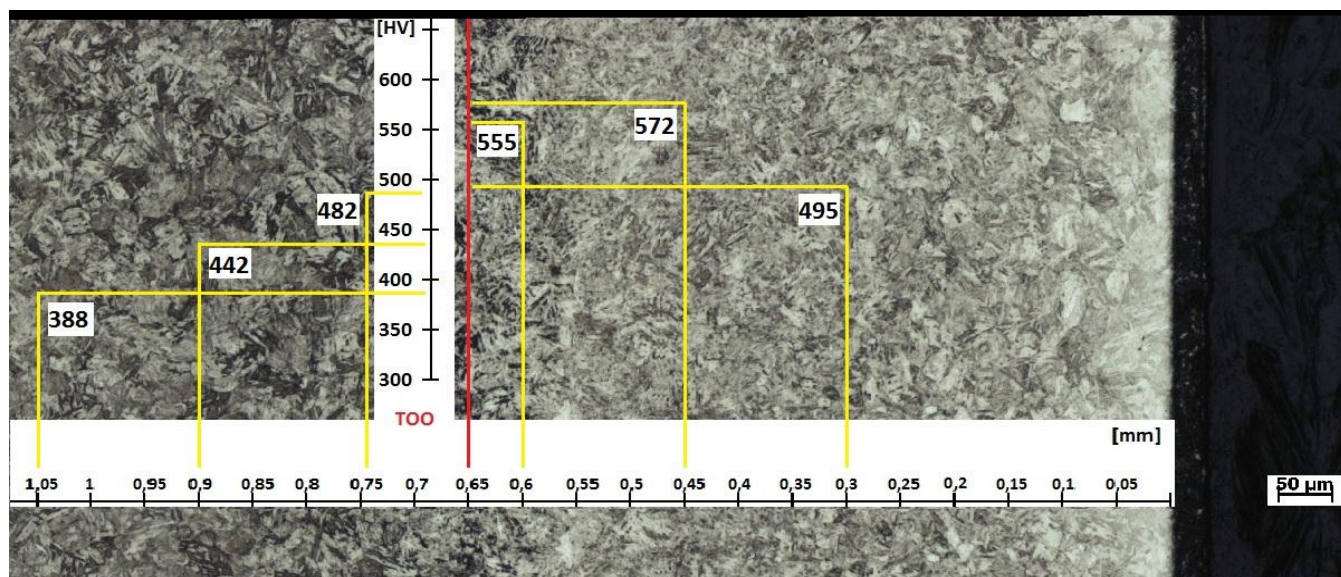
Každé tepelné dělení vytváří v blízkosti řezu tepelně ovlivněnou oblast (TOO). TOO vzniká při řezání materiálu nebo při požadovaném předehřátí materiálu. Vnesené teplo má za následek změnu struktur materiálu a jeho vlastností. Na následujících mikroskopických snímcích metalografických výbrusů jednotlivých vzorků je vidět vyznačená tepelně ovlivněná oblast a její rozsah.



Obrázek 58 - Tepelně ovlivněná oblast vzorku r.40



Obrázek 59 - Tepelně ovlivněná oblast vzorku r. 55



Obrázek 60 - Tepelně ovlivněná oblast r.70

12.1 Vyhodnocení tepelně ovlivněné oblasti

Vzorek	r.40	r.55	r.70
TOO [mm]	0,85	0,75	0,65

Na následujících snímcích jde vidět, že tepelně ovlivněná oblast je závislá na řezné rychlosti. S rostoucí rychlostí se ovlivněná oblast zmenšuje a naopak. Zároveň platí, že čím širší oblast tím nižší tvrdost. Na hranici TOO dojde k nejvýraznějšímu poklesu tvrdosti, což odpovídá měření tvrdosti.

Závěr

První část experimentu se zabývala hodnocením geometrických požadavků jako úchylka kolmosti řezných hran u , střední výšku profilu $Rz5$ a následném zařazení těchto výsledků do tolerančních polí podle předpisů normy ČSN EN ISO 9013:2002. Díky obtížnému uchycení hořáku na automatizovaný posuv vyšla kolmost řezných hran u v tolerančním poli 5 pro všechny tři řezné rychlosti. Střední výšky profilu $Rz5$ byly vyhodnoceny v tolerančním poli 2 pro všechny rychlosti. I přes obtíže s měřením úchylky kolmosti jsme docílili třídy provedení EXC1 dle normy ČSN EN ISO 1090-2+A1. Nejlepšího hodnocení geometrických požadavků se dosáhlo s použitím nejvyšší řezné rychlosti 70 cm/min.

V druhé části experimentu jsme zjišťovali změnu tvrdosti pro různé řezné rychlosti při plazmovém řezání. Nejprve došlo ke zpevnění a následnému odpevnění materiálu, po cca 1,5 mm se hodnoty tvrdosti navrací zpět k původním hodnotám, které udává výrobce. Změna tvrdosti se pohybuje v rozmezí 50 až 130 HV, tedy k žádnému radikálnímu zpevnění nedošlo. Největší výkyvy tvrdosti nastaly u nejvyšší řezné rychlosti 70 cm/min. Vyhodnocení tvrdosti hran podle normy ČSN EN ISO 1090-2+A1 nebylo úplně adekvátní díky předpisu maximální tvrdosti hran, který se téměř shodoval s maximální tvrdostí materiálu Hardox 450 udávanou výrobcem.

Třetí část experimentu pojednává o velikosti tepelně ovlivněné oblasti a její závislosti na tvrdosti. Čím větší byla řezná rychlosti tím menší byla tepelně ovlivněná oblast, její zpevnění bylo o to větší. Na hranici TOO dojde k nejvýraznějšímu poklesu tvrdosti, což odpovídá měření tvrdosti.

Na základě tohoto experimentu lze konstatovat, že plazmové řezání je vyhovující pro dělení materiálu Hardox 450.

Použité literární zdroje

[01] ČSN EN ISO 9013, Tepelné dělení – Klasifikace tepelných řezů – Geometrické požadavky na výrobky a úchytky jakosti řezu, Praha: Český normalizační institut, 2004

[02] ČSN EN ISO 1090-2+A1, Provádění ocelových konstrukcí a hliníkových konstrukcí – Část 2: Technické požadavky na ocelové konstrukce, Praha: Český normalizační institut, 2012

[03] ČSN EN ISO 12584, Vady při řezání kyslíkem, laserem a plasmou - Terminologie, Praha: Český normalizační institut, 2001

[04] HORÁČEK, Jaroslav. Nauka o materiálu (návody na cvičení), dotisk 2. vydání, Praha: PowerPrint, 2004

[05] ESAB Vamberk s.r.o., Powercut 875, 2006, Staženo dne 15.7.2017, dostupné na webu: http://www.dpuls.cz/data/download/svarovacitechnika_power_cut875.pdf

[06] ESAB Welding & Cutting Products, Powercut 875, Plasma Arc Cutting Package, 2008, Staženo dne 15.7.2017, dostupné na webu: [http://www.esabna.com/literature/plasma%20equipment/cutting%20packages%20-%20systems/manual%20\(only\)%20cutting%20packages/domestic/powercut-875_f-15-653-j.pdf](http://www.esabna.com/literature/plasma%20equipment/cutting%20packages%20-%20systems/manual%20(only)%20cutting%20packages/domestic/powercut-875_f-15-653-j.pdf)

[07] WELMET spol. s.r.o., Weldycar NV, 2016, Staženo dne 15.7.2017, dostupné na webu: http://www.welmet.cz/download_file.php?file=1452845657

[08] WINFA s.r.o., HARDOX, Otěruvzdorná nebo konstrukční ocel, 2016, Staženo dne 12.7.2017, dostupné na webu: <http://www.winfa.sk/pdf/h14a.pdf>

[09] SSAB, HARDOX, Techsupport 63, 2016, Staženo dne 12.7.2017, dostupné na webu: <http://www.winfa.sk/pdf/harpropproc.pdf>

[10] MINAŘÍK, V. *Tepelné dělení materiálu*. 1.vyd. Praha: České vysoké učení technické, 1993, 50 s., ISBN 80-01-01028-7.

- [11] MAŇKOVÁ, Ildikó. *Progresivné technológie*. 1 vydání. Košice: Vienala,2000. 275 s. ISBN 80-7099-430-4.
- [12] KUBÍČEK, J., KANDUS, B., AMBROŽ, O., *Technologie svařování a zařízení*. 2. vyd. Ostrava: ZERROS, 2001. 395 s., ISBN 80-85771-81-0.
- [13] LINDE. *Facts about. Plasma technology. Linde Gas Division, Linde Gas Headquarters, Seitnerstrasse 70, 82049 Pullach, Germany*. [pdf dokument].
- [14] BARCAL, J., *Nekonvenční metody obrábění*. Praha:ČVUT, 1989. 17-51
- [15] HÍREŠ, O., HATALA, M., HLOCH, S., *Delenie kovových materiálov okružnou pílou, vodným prúdom a plazmovým oblúkom*. 1. vyd. Jiří Pustina: Ostrava - Poruba 2007. ISBN 978-80-8073-769-6.
- [16] MATĚJKA, D., BANKO, B., *Plazmové striekanie kovových a keramických práškov*, 1 vyd. SNP, Bánská Bystrica 1988, 272 s., ISBN 063-062-87
- [17] HyPerformance Plasma HPR260XD Auto Gas: Návod k používání <https://www.hypertherm.com/Xnet/library/library.jsp?locale=en> pdf
- [18] SADÍLEK, M., *Nekonvenční metody obrábění II*. VŠB-TU, 2016. ISBN 978-80-248-3944-8
- [19] ČSN 05 3400, Tepelné delenie kovov. Rezanie kovov kyslíkom a plazmou, Základné pojmy, Praha: Český normalizační institut, 2001
- [20] ČSN EN ISO 4063, Svařování a příbuzné procesy – přehled metod a jejich číslování, Praha: Český normalizační institut, 2010
- [21] KOLAŘÍK L., Technologie svařování – Elektrický oblouk, Staženo dne 10.1.2017, dostupné na webu: https://moodle.fs.cvut.cz/pluginfile.php/19177/mod_resource/content/1/5_oblouk_tsv_2016.pdf
- [22] Hlavatý I., Svět svaru, Řezání plazmou - 82, Praha, 2/2014, dostupné na webu: http://www.svetsvaru.cz/wp-content/uploads/2014/07/2014-2_RezaniPlasmou.pdf
- [23] Olson L. D., ASM Handbook, Vol. 6 Welding, Brazing, and Soldering, ASM International, 1993,ISBN: 978-0-87170-382-8
- [24] KOLAŘÍK L., Technologie svařování – Plazmové svařování, Praha: ČVUT, Fakulta strojní

[25] Mrňa L., Dělení a svařování svazkem plazmatu, dostupné na webu: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/hsv__specialni_metody_svarovani__deleni_a_svarovani_plasmou_2013__mrna.pdf

Použité zdroje k obrázkům

[01] obrázek příkladu řezání plazmou, staženo dne 1.8.2017, dostupné na webu: http://www.hansensteel.com/images/site/plasma-cutting_1_lg.jpg

[02] obrázek příkladu řezání kyslíkem, staženo dne 1.8.2017, dostupné na webu: <http://www.spolgas.cz/wp-content/uploads/pc010086.jpg>

[03] obrázek příkladu řezání laserem, staženo dne 1.8.2017, dostupné na webu: <http://federalmetalworks.com/wp-content/uploads/2015/04/lazer-kesim-4.jpg>

[31] obrázek zdroje ESAB Powercut 875, staženo dne 15.7.2017, dostupné na webu: http://www.dpuls.cz/data/download/svarovacitechnika_power_cut875.pdf

[32] obrázek hořáku PT-32, staženo dne 15.7.2017, dostupné na webu: http://www.dpuls.cz/data/download/svarovacitechnika_power_cut875.pdf

[34] obrázek mechanických vlastností oceli Hardox, staženo dne 12.7.2017, dostupné na webu: <http://www.winfa.sk/pdf/harpropproc.pdf>

[41] obrázek metalografické pily, staženo dne 12.7.2017, dostupné na webu: http://www.aimil.com/Resources/Products/original/347_Labotom-5.jpg

[43] obrázek Zeiss Calypso Prismo, staženo dne 15.7.2017, dostupné na webu: http://technologie.fs.cvut.cz/images/cmm_zeiss_4.jpg

[50] obrázek profiloměru Mahr XCR20, staženo dne 15.7.2017, dostupné na webu: <http://technologie.fs.cvut.cz/images/mahr.png>

Seznam obrázků a tabulek

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Ukázka řezání plazmou [01]	11
Obrázek 2 - Ukázka řezání kyslíkem [02]	12
Obrázek 3 - Ukázka řezání laserem [03]	12
Obrázek 4 - Příklad disociace [21]	14
Obrázek 5 - Vymrštění valenčního elektronu [21]	14
Obrázek 6 – Zapojení s přeneseným obloukem [11]	16
Obrázek 7 - Zapojení s nepřeneseným obloukem [11]	17
Obrázek 8 - a) hořák s plynovou stabilizací a transferovaným obloukem b) hořák s plynovou stabilizací a netransferovaným obloukem c) hořák s vodní stabilizací [22]	19
Obrázek 9 - Schéma HD hořáku [22]	19
Obrázek 10 - Ukázka řezacího hořáku [24]	21
Obrázek 11 - Hořák s injekčním přívodem vody [23]	21
Obrázek 12 - Schéma řezacího hořáku [23]	21
Obrázek 13 - Značení kvality řezu na výkrese	26
Obrázek 14 - Schéma značení	27
Obrázek 15 - Termíny vztahující se k procesu řezání	27
Obrázek 16 - Typy řezů	28
Obrázek 17 - Úchylky kolmosti u a úchylky úhlů u	28
Obrázek 18 - oblast pro stanovení úchylek kolmosti a úhlových úchylek	29
Obrázek 19 - Toleranční pole pro úchylku kolmosti nebo úchylku úhlu u pro řezy do 30 mm	30
Obrázek 20 - Průměrná výška prvků profilů	30
Obrázek 21 - Toleranční pole pro průměrnou výšku prvků profilu Rz5 pro řezy do 30 mm	31
Obrázek 22 - Tolerance dílu s dodatečným opracováním	32
Obrázek 23 - Rozměrové úchylky dílů bez dodatečného opracování	33
Obrázek 24 - Vady na hranách řezu	36
Obrázek 25 - Makrotrhlina na ploše řezu	36
Obrázek 26 - Vady na plochách řezu	37
Obrázek 27 - ulpívající struska	38
Obrázek 28 - Ostatní vady	38
Obrázek 29 - Indentor a odečítání vtisku na tvrdoměru	39
Obrázek 30 - ukázka průběhu řezání	40
Obrázek 31 - ESAB Powercut 875	41
Obrázek 32 - Hořák PT-32 se zakótovanými rozměry	41
Obrázek 33 - Weldycar a hořák PT-32	42
Obrázek 34 - Mechanické vlastnosti ocelí Hardox	43
Obrázek 35 - Příklady nastavení	44
Obrázek 37 - Tvar řezaného vzorku	44
Obrázek 36 - Výsledné vzorky	44
Obrázek 38 - Výsledné vzorky	45
Obrázek 39 - Řezná hrana na vzorcích (r.40, r.55, r.70)	45
Obrázek 41 - Metalografická pila Struers Labotom 5	45
Obrázek 40 - Vzorky připravené pro měření tvrdosti	45

Obrázek 42 - Místa měřená na vzorku r.70	46
Obrázek 43 - Zeiss Calypso Prismo, ČVUT	46
Obrázek 44 - Příklad zúžení a rozšíření řezné mezery	47
Obrázek 45 - úchylka kolmosti u	47
Obrázek 46 - Kolmost řezů	47
Obrázek 47 - Detail na řeznou hranu v řezu	48
Obrázek 48 - Vyhodnocení tolerančních polí úchylky kolmosti u	48
Obrázek 49 - Detail řezné hrany	49
Obrázek 50 - profiloměr Mahr XCR20, ČVUT	49
Obrázek 51 - Průměrná výška profilu Rz5	49
Obrázek 52 - Vyhodnocení tolerančních polí průměrné výšky prvků profilu Rz5	50
Obrázek 53 - ukázka vtisku	52
Obrázek 54 - Buehler Indenta 11004	52
Obrázek 55 - Tvrdost na výbrusech, detail na první mm	53
Obrázek 56 - Měření na výbrusech	54
Obrázek 57 - Tvrdost na povrchu	55
Obrázek 58 - Tepelně ovlivněná oblast vzorku r.40	57
Obrázek 59 - Tepelně ovlivněná oblast vzorku r. 55	58
Obrázek 60 - Tepelně ovlivněná oblast r.70	58

Seznam tabulek

Tabulka 1 - značení metod tepelného dělní	13
Tabulka 2 - Velikost parametru Δa pro různé tloušťky řezu	29
Tabulka 3 - Toleranční pole pro velikosti úchylky kolmosti nebo úhlové úchylky u	29
Tabulka 4 - Toleranční pole pro průměrnou výšku prvků profilu Rz5	31
Tabulka 5 - Příklad na opracování Bz	33
Tabulka 6 - Maximální dovolené hodnoty tvrdosti (HV10)	34
Tabulka 7 - třídy provedení EXC	35
Tabulka 8 - Specifikace zdroje Powercut 875	41
Tabulka 9 – Chemické složení oceli Hardox 450	43
Tabulka 10 - Nastavení zdroje ESAB a traktoru Weldycar při řezání	43
Tabulka 11 - Vyhodnocení úchylky kolmosti u pro tloušťku 10 mm	48
Tabulka 12 - Vyhodnocení průměrné výšky profilu Rz5 pro tloušťku 10 mm	50
Tabulka 13 - Jakost řezaných povrchů	51
Tabulka 14 - Průměrné hodnoty tvrdosti na výbrusech	53
Tabulka 15 - Průměrné hodnoty tvrdosti na povrchu	55
Tabulka 16 - maximální dovolené hodnoty tvrdosti	57