



**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

CZECH TECHNICAL UNIVERSITY IN PRAGUE

FAKULTA STROJNÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

DEPARTMENT OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

OVLIVNĚNÍ ŘEZÝCH HRAN KONSTRUKČNÍCH OCELÍ PO PLAZMOVÉM ŘEZÁNÍ

THE AFFECTING OF CUTTING EDGES OF STRUCTURAL
STEELS AFTER PLASMA CUTTING

DIPLOMOVÁ PRÁCE

AUTOR:

AUTHOR

Bc. Tomáš Bláha

VEDOUCÍ PRÁCE:

SUPERVISOR

doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE

STUDIJNÍ PROGRAM:

STUDY PROGRAM

Výrobní inženýrství

PRAHA 2024

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Bláha** Jméno: **Tomáš** Osobní číslo: **470074**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**
Studijní program: **Výrobní inženýrství**
Specializace: **Bez specializace**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Ovlivnění řezných hran konstrukčních ocelí po plazmovém řezání

Název diplomové práce anglicky:

The affecting of cutting edges of structural steels after plasma cutting

Pokyny pro vypracování:

Rozdělení metod tepelného dělení a popis problematiky plazmového řezání ocelí
Způsoby ovlivnění řezných hran po tepelném dělení a popis způsobu hodnocení podle ČSN EN 1090
Návrh experimentu a jeho realizace - vliv sestavy řezacího hořáku na kvalitu řezu
Vyhodnocení dosažených výsledků - porovnání u vybraných materiálů
Závěr

Seznam doporučené literatury:

- [1] Šačírovič, A.: Ovlivnění řezných hran při tepelném dělení plazmou, Bakalářská práce, FS, ČVUT v Praze, Praha, 2017
- [2] Kupka, J.: Vliv řezání kyslíkem na vlastnosti základního materiálu, Diplomová práce, FS, ČVUT v Praze, Praha, 2015
- [3] Minařík, V.: Tepelné dělení materiálu, Vydavatelství ČVUT, Praha 1993
- [4] ČSN EN 1090-2+A1, Provádění ocelových konstrukcí a hliníkových konstrukcí – Část 2: Technické požadavky na ocelové konstrukce, Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2019

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

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

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

Ing. Tomáš Panáček, IWE ústav strojírenské technologie FS

Datum zadání diplomové práce: **16.10.2023** Termín odevzdání diplomové práce: **15.01.2024**

Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2024**

doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Tímto prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Ladislava Kolaříka, Ph.D. IWE, a to pouze pomocí podkladů uvedených v seznamu použité literatury v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne:

.....

Podpis autora

Poděkování

Velmi rád bych tímto poděkoval panu doc. Ing. Ladislavu Kolaříkovi Ph.D. IWE za obětavou pomoc při zpracovávání této práce a všechny odborné rady, doc. Ing. Marii Kolaříkové Ph.D. za velkou pomoc při provedení metalografické zkoušky, Ing. Tomáši Panáčkovi za pomoc při řezání vzorků na plazmovém stroji a celému kolektivu Ústavu strojírenské technologie FS ČVUT v Praze. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat i své rodině, přítelkyni Mie a nejbližším za podporu během celého studia.

Anotace

Tato diplomová práce se zabývá ovlivněním řezných hran konstrukčních ocelí po plazmovém řezání. Teoretická část popisuje základní metody tepelného dělení s bližším zaměřením na tepelné dělení plazmou. Dále vysvětluje a popisuje jednotlivé části plazmového hořáku. V praktické části se diplomová práce věnuje hodnocení velikosti tepelně ovlivněné oblasti po řezání a vyhodnocení kvality řezu (prostřednictvím měření tvrdosti řezných hran, úchylky kolmosti a měřením drsnosti povrchu - Rz₅) na vybraných typech základních materiálů (konstrukční ocel S235 a Hardox 450). Uvedené charakteristiky jsou vyhodnocovány v souladu s normou ČSN EN 1090-2 přílohou D.

Název diplomové práce:	Ovlivnění řezných hran konstrukčních ocelí po plazmovém řezání
Autor práce:	Bc. Tomáš Bláha
Vedoucí práce:	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE
Akademický rok:	2023/2024
Vysoká škola:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Ústav:	12133 – Ústav strojírenské technologie
Vedoucí ústavu:	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE
Rozsah práce:	91 stran, 55 obrázků, 24 tabulek, 6 příloh
Klíčová slova:	tepelné dělení, řezání plazmou, řezání konstrukční oceli, řezání Hardoxu

Anotation

This thesis deals with the influence of cutting edges of structural steels after plasma cutting. The theoretical part describes the basic methods of thermal cutting with a closer focus on plasma thermal cutting. It also explains and describes the different parts of the plasma torch. In the practical part, the thesis deals with the evaluation of the size of the thermally affected area after cutting and the evaluation of the quality of the cut (through the measurement of the hardness of the cutting edges, the perpendicularity deviation and the measurement of the surface roughness - Rz5) on selected types of basic materials (structural steel S235 and Hardox 450). These characteristics are evaluated in accordance with EN 1090-2 Annex D.

Title of the final thesis:	The affecting of cutting edges of structural steels after plasma cutting
Author:	Bc. Tomáš Bláha
Supervisor:	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE
Academic year:	2023/2024
University:	CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering
Department:	12133 – Department of Manufacturing Technology
Head of department:	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE
Extent:	91 pages, 55 pictures, 24 tables, 6 attachments
Keywords:	thermal cutting, plasma cutting, cutting of structural steel, cutting of Hardox

Seznam použitých zkratek

TOO	Tepelně ovlivněná oblast
OVO	Otěrzdorná ocel
TD	Tepelné dělení
Nd	Neodym
Yb	Ytterbium
YAG	Yttrium aluminium garnet
DC-	Direct current (stejnoseměrný proud) – přímá polarita zapojení

Obsah

1	Úvod a cíl práce	10
2	Tepelné dělení materiálu	11
2.1	Metody tepelného dělení	11
2.1.1	Tepelné dělení kyslíkem	11
2.1.2	Tepelné dělení laserem	14
2.1.3	Tepelné dělení plazmou	17
2.1.4	Tepelné dělení el. obloukem	17
2.2	Vhodnost metod	18
3	Řezání plazmou	21
3.1	Historie plazmy	21
3.2	Princip plazmového řezání	22
3.3	Elektrody	23
3.4	Typy plynů	24
3.5	Řezací hořáky	27
3.6	Popis jednotlivých částí plazmového hořáku	29
3.6.1	Tělo hořáku	29
3.6.2	Chladicí trubka	29
3.6.3	Katoda	30
3.6.4	Vedení plynu	30
3.6.5	Tryska	30
3.6.6	Krytka trysky	30
3.6.7	Krytka vířivého plynu	31
3.6.8	Ochranná krytka	31
3.6.9	Speciální montážní nářadí	31
4	Příprava experimentu	33

4.1	Popis experimentálního zařízení	33
4.2	Experimentální pracoviště	36
4.3	Volba materiálů	36
4.3.1	Úprava materiálu	38
4.4	Norma ČSN EN 1090-2	39
4.4.1	Drsnost povrchu - Průměrná výška prvků profilu R_{z5}	41
4.4.1.1	Drsnost	42
4.4.2	Úchylka kolmosti a úhlu	44
4.4.2.1	Kolmost	44
4.4.3	Zkouška tvrdosti	47
4.4.3.1	Zkouška tvrdosti podle Vickerse	48
4.4.3.2	Zkouška tvrdosti podle Rockwella	49
4.4.3.3	Zkouška tvrdosti podle Brinella	50
4.5	Typy použitých plazmových hořáků	52
4.5.1	Sestava hořáku – 60 A	52
4.5.2	Sestava hořáku – 130 A	53
4.5.3	Sestava hořáku – 280 A	53
5	Vyhodnocení experimentu	54
5.1	Měření drsnosti řezu - průměrná výška prvků profilu R_{z5}	55
5.2	Metalografická analýza	57
5.3	Měření velikosti tepelně ovlivněné oblasti	59
5.4	Měření úchylky kolmosti a úhlu	64
5.5	Měření tvrdosti řezných hran	68
5.6	Vyhodnocení výsledků	73
6	Závěr	75

1 Úvod a cíl práce

Diplomová práce se zabývá zkoumáním ovlivnění řezných hran po plazmovém řezání v souladu s normou na provádění ocelových konstrukcí – ČSN EN 1090 a porovnáním na dvou typech základních materiálů, které reprezentují materiál s bezproblémovou řezatelností (konstrukční ocel S235) a materiál se zvýšenou tvrdostí (otěruvzdorná ocel Hardox 450).

V teoretické části diplomové práce je zpracována rešerše zaměřená na nejčastější metody tepelného dělení. Dále je detailněji popsáno samotné plazmové řezání, tedy jeho historie, a dále samotný princip plazmového dělení materiálu. V další části jsou popsány plyny, které se pro toto dělení nejčastěji používají a také jejich vhodnost použití. Taktéž jsou popsány jednotlivé komponenty, z kterých se samotný plazmový hořák skládá. V neposlední části rešerše je popsána norma, dle které se experiment diplomové práce prováděl. Jsou zde uvedeny parametry a popsány postupy, které se v experimentální části vyhodnocovaly. Hodnocena byla drsnost řezných hran, úchylka kolmosti, tvrdost řezné hrany a nad rámec uvedené normy i velikost tepelně ovlivněné oblasti po řezání.

Cílem diplomové práce bylo zjistit, jaký mají vliv vybrané sestavy plazmových hořáků na vlastnosti vytvořené řezné hrany. Pro experiment byla vybrána střední tloušťka řezaného materiálu – 10 mm. Existuje řada výkonových variant hořáků, které jsou určeny pro řezání vybrané tloušťky. Byly vybrány tři výkonové sestavy hořáku, které mají v doporučeném rozsahu řezaných tloušťek zvolenou tloušťku plechu (a to jako minimální, střední a maximální doporučenou tloušťku v řezatelném rozsahu tloušťek). Diplomová práce tedy poskytuje výsledky vlivu zvolené výkonové sestavy hořáku (pro danou tloušťku plechu a zvolený materiál) na kvalitu řezu a mechanické vlastnosti řezných hran.

2 Tepelné dělení materiálu

Jedna z velmi rozšířených technologií dělení materiálu je tepelné dělení, kde do místa řezu je dodávána tepelná energie různými způsoby. Tepelné dělení lze využít v ruční variantě, ale často se využívá především ve strojní podobě. Jedna z hlavních výhod oproti mechanickému dělení je rychlost řezání, a tudíž související efektivita, avšak má to i své nevýhody - omezení tloušťky řezaného materiálu, velkou hlučnost procesu, vývin velkého množství emisí či vznik tepelně ovlivněné oblasti (TOO).

2.1 Metody tepelného dělení

Tepelné dělení materiálu je dnes považováno za základní technologii pro přípravu ocelových konstrukcí. Mezi nejčastější metody patří: řezání kyslíkem, plazmou a laserem. Mezi méně využívanou metodu patří dělení pomocí el. oblouku. V praxi se můžeme setkat ještě s jednou metodou dělení, která však nespadá do skupiny metod tepelného dělení, ale také se často využívá pro dělení materiálu, a to je řezání pomocí vodního paprsku.

2.1.1 Tepelné dělení kyslíkem

Řezání kyslíkem (podle normy ČSN EN ISO 4063 se tato metoda značí číselným kódem 81) spočívá v předehřátí řezaného materiálu na tzv. zápalnou teplotu a v následné oxidické reakci umožňující řezání materiálu proudem kyslíku.

Celý princip řezání kyslíkem se dělí na tři fáze:

- První fází je ohřev řezaného materiálu na zápalnou teplotu. Teplo potřebné pro řezání získáme hořením hořlavého plynu s kyslíkem. Jako hořlavý plyn se nejčastěji používá acetylen, ale lze použít řadu dalších hořlavých plynů, jako je např.: propan, zemní plyn, svítiplyn, vodík a další. Směsí acetylenu a kyslíku lze dosáhnout teploty až 3160 °C. [1]
- Druhá fáze je oxidace materiálu. Jakmile je řezaný materiál ohřátý na zápalnou teplotu, je přiveden skrze trysku řezný kyslík. Kyslík reaguje s ohřátým řezaným materiálem. Vzniká silná oxidická reakce, při níž se vytváří velké množství tepla, které spaluje materiál a tím vzniká řezná spára. Toto teplo dále předehřívá řezaný materiál. Celý proces řezání

díky tomu může plynule pokračovat až do doby, kdy přestane být přiváděn řezný kyslík. [1]

- Třetí fází je vyfukování roztaveného kovu a produktu spalování z řezné spáry. Za pomoci řezacího kyslíku a jeho kinetické energie je spalovaný materiál vyfukován z řezné spáry díky oxidům železa (tekuté strusce). [1]

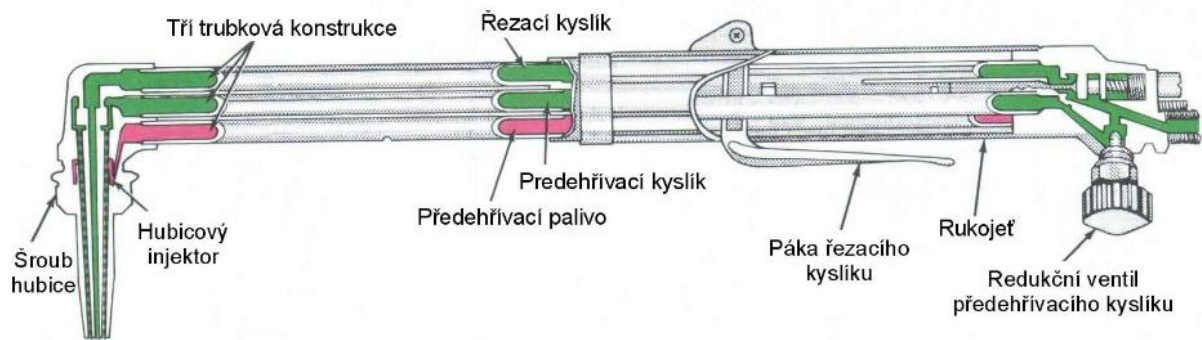
Pro předešlý plamen se nejčastěji používá kyslíko-acetylenová směs. Na řezací kyslík jsou kladeny velké požadavky ohledně jeho čistoty, která by měla být minimálně 99,5%, což je obvyklá čistota v používaných tlakových lahvích. Každé snížení čistoty o 0,1% znamená snížení rychlosti řezání o 10%. Při správném použití (nastavení řezných parametrů) je kvalita řezaného povrchu srovnatelná s třískovým obráběním. [2]

Pomocí kyslíku se dají řezat nelegované a nízkolegované oceli, kde velice záleží na jejich chemickém složení. V řezatelných ocelích se obsah uhlíku pohybuje od 0,3 – 0,9% (teoretický limit množství uhlíku je 1,6 hmot. %, nicméně uhlík zhoršuje řezatelnost). Velkou výhodou této metody je řezání materiálu až do tloušťky 300 mm (komerčně dodávanými hořáky), což ostatní metody tepelného dělení neumožňují. Avšak kovy menších tlouštěk - do 12mm se obvykle řezou plazmou či laserem. Při použití těchto dvou metod je oproti řezání kyslíkem menší tepelně ovlivněná oblast. Metoda lze použít jak v ruční, tak i strojní podobě. [2]

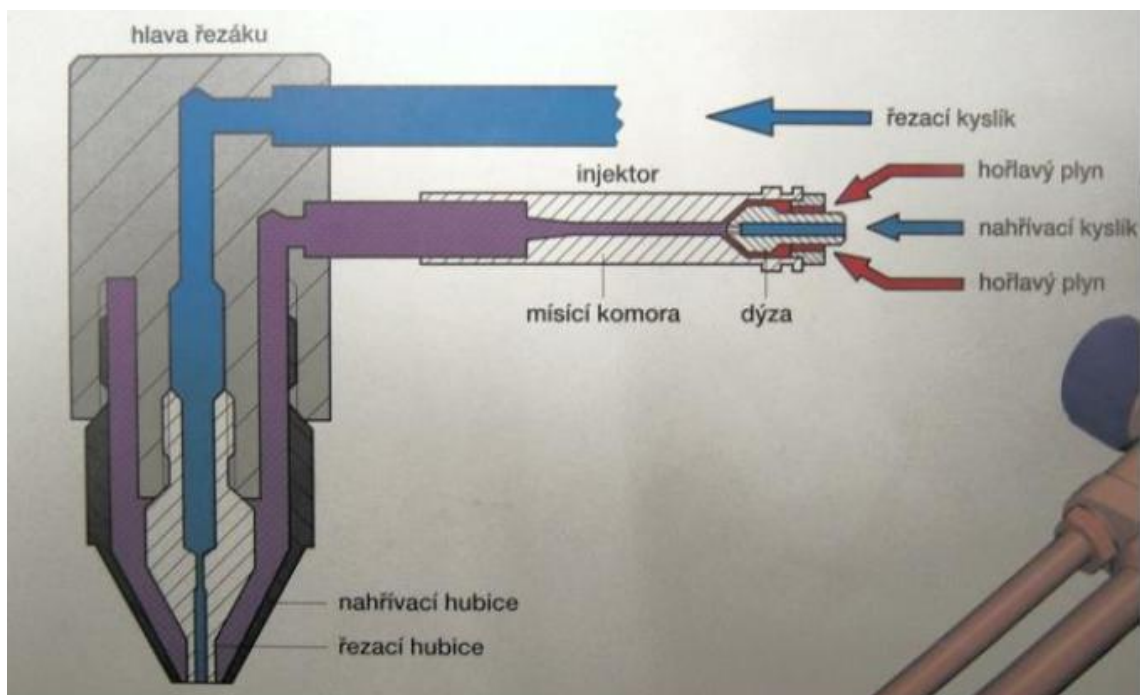


Obrázek 1: Strojní řezání kyslíkem – firma ESAB [3]

Při řezání kyslíkem se používají dva základní konstrukční typy hořáků. Jeden z typů je hořák se směšovací hubicí, viz obr. 2. U tohoto typu hořáku se plyny (předehřívací kyslík a hořlavý plyn) mísí až v samotné hubici. Hořák se směšovací hubicí se používá výhradně pro ruční řezání. Druhým typem je směšování v injektoru, viz obr. 3. V tomto případě směšování probíhá v samotném těle hořáku, kde se mísí nahřívací kyslík a hořlavý plyn. Tento typ hořáku je nejpoužívanější systém jak pro ruční, tak i strojní řezání, především z důvodu jeho bezpečnosti.



Obrázek 2: Schéma moderního řezacího hořáku se směšováním v hubici [4]



Obrázek 3: Princip injektorového řezacího hořáku [5]

2.1.2 Tepelné dělení laserem

Princip dělení materiálu pomocí laseru spočívá v tom, že na daný materiál dopadá laserový paprsek o dané vlnové délce. Samotný proces dělení začíná interakcí laserového paprsku s povrchem děleného materiálu. Vzájemný styk vede k přeměně vysoce koncentrované světelné energie na energii tepelnou, což se projeví prudkým ohřevem děleného materiálu v místě řezu. Řezný proces následně probíhá kombinací fyzikálních jevů jako je hoření, tavení a sublimace, avšak jeden je vždy převládající. Který to je, závisí na řezaném materiálu, použitém asistenčním plynu a na kvalitativních požadavcích řezu. Tepelné dělení laserem má podle normy ČSN EN ISO 4063, číselné značení 84. [6], [7]

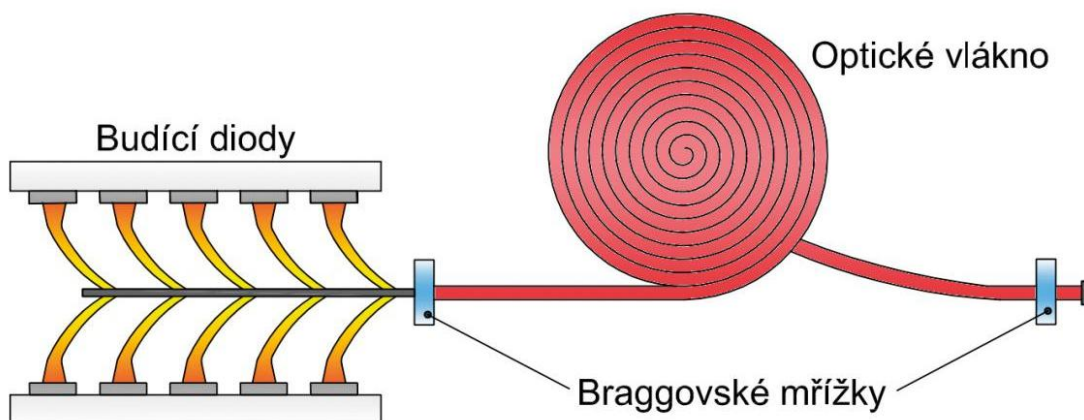
Lasery v dnešní době procházejí velkým vývojem a zároveň se rozšiřuje nabídka typů laserů, avšak vždy se jedná o světelný paprsek neboli proud fotonů o jednotné vlnové délce. Většina průmyslově používaných typů laserů lze zařadit do následujících skupin (členění dle aktivního prostředí laseru):

- Plynové lasery (kde je hlavní představitelem CO₂ laser)
- Pevnolátkové lasery (Nd:YAG)
- Moderní typy laserů (v podstatě se jedná o specifické skupiny pevnolátkových laserů, jako např. diskový laser, vláknový laser apod.)

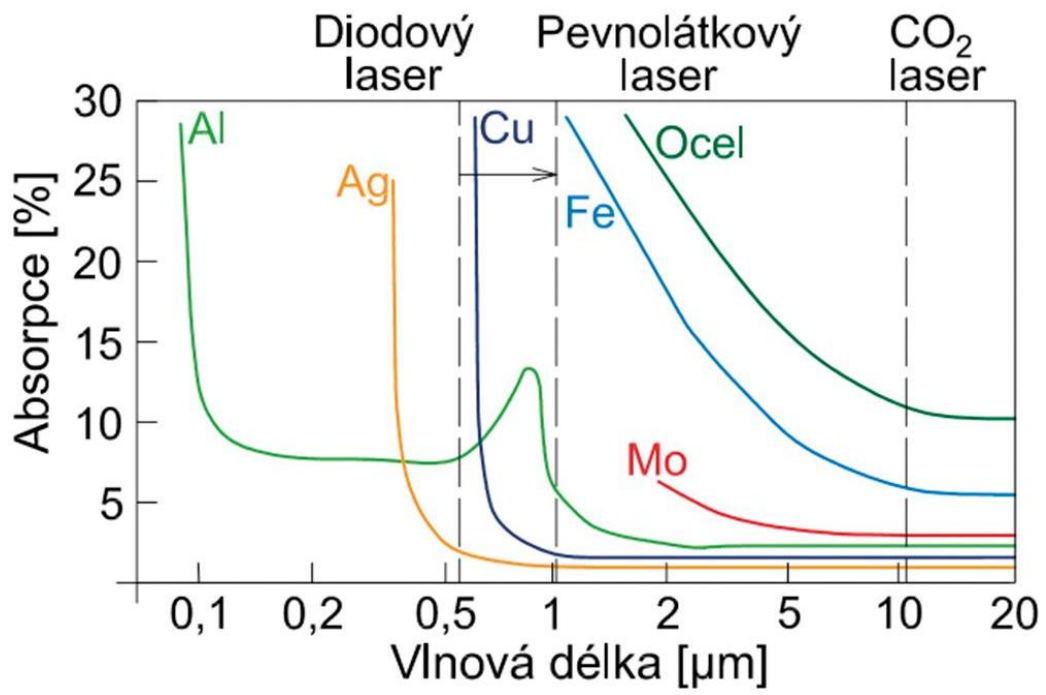
CO₂ laser byl nejrozšířenější a nejběžnější typ plynového laseru, který se v posledních letech používal. Díky své nízké účinnosti, která se pohybuje kolem 5-10 %, se od něj pomalu začíná ustupovat. Princip tohoto typu laseru je založen na vzniku laserového paprsku v rezonátoru, který je vyplněný plynnou směsí. Plyn v rezonátoru se skládá z helia, dusíku a oxidu uhličitého, případně může být použit některý speciální plyn jako je xenon, oxid uhelnatý či kyslík. Paprsek, který tento typ laseru produkuje, spadá do oblasti infračerveného záření o vlnové délce 10,6 μm. Lidské oko je schopno vidět záření o vlnové délce od 0,38 μm do 0,76 μm (tzv. optické záření) což znamená, že lidské oko tento laserový paprsek není schopno zachytit. [8]

Pevnolátkové lasery jsou dnes díky svým vlastnostem jedny z nejpoužívanějších. Mezi nejčastěji využívané patří Nd:YAG laser, kde aktivní prostředí tvoří YAG krystal (Yttrium Aluminium Garnet), dopovaný ionty neodymu (Nd) nebo ytterbia (Yb). Dále

se také můžeme často setkat s dvěma dalšími typy: diskovým a vláknovým. Hlavní rozdíl mezi těmito 3 typy je v uspořádání aktivního prostředí. V případě Nd:YAG laseru je aktivní prostředí tyčinka (délky 15-20 cm, průměr cca 1 mm). U zbylých dvou jak názvy napovídají, jsou tyto typy odvozeny od tvaru aktivního prostředí – krystal ve tvaru disku či optické vlákno. Velkým pozitivem těchto laserů je absence laserových plynů. Paprsek pevnolátkového laseru, díky jeho vlnové délce, lze vést optickým vláknem, proto se tento typ laseru hojně využívá v kombinaci s použitím pomocí průmyslových robotů. Přivedení laserového paprsku do laserové hlavy je poměrně jednoduché. Vlnová délka laseru těchto typů se pohybuje okolo hodnoty cca. 1 μm . I přes vyšší pořizovací cenu laseru se postupně přechází z obvyklých CO₂ laserů na pevnolátkové lasery. Jsou výkonnější, a protože nejsou potřeba rezonátorové plyny, jsou náklady na jejich provoz nižší. [8], [40]



Obrázek 4: Schéma vláknového laseru [8]



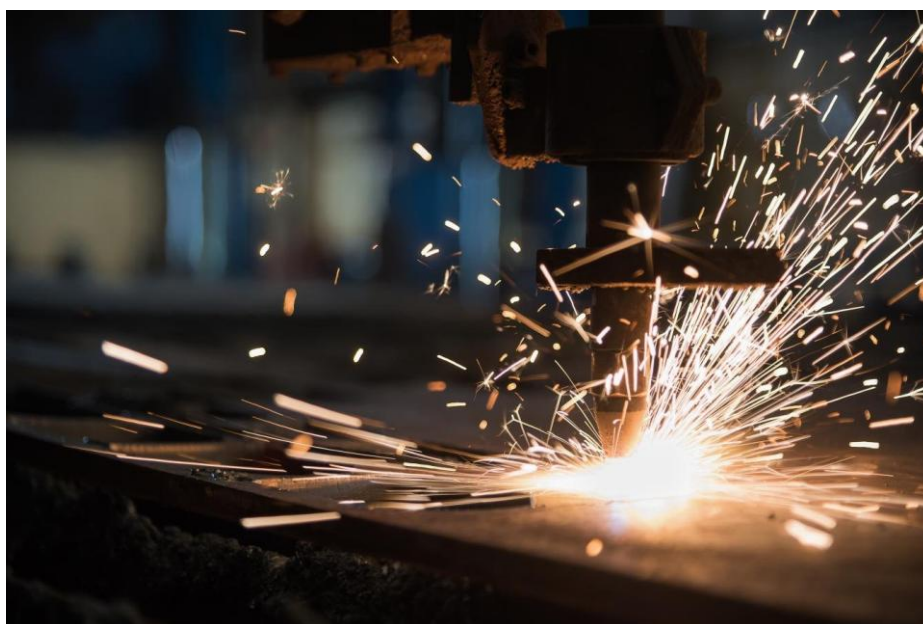
Obrázek 5: Závislost absorpce materiálu na vlnové délce záření [8]



Obrázek 6: Řezání 3D tvaru pomocí laseru [8]

2.1.3 Tepelné dělení plazmou

Řezání pomocí plazmového oblouku (dle normy ČSN EN ISO 4063 se značí číslem 83) je založeno na ionizaci plynu. Zdrojem tepla u této metody je zúžený stabilizovaný oblouk, který vzniká mezi elektrodou a řezaným materiálem. Roztavený materiál je odstraňován pomocí ionizovaného plynu. Dělení pomocí plazmy se dá používat jak ručně, tak i strojně s připojením na CNC stroj. Pomocí této technologie dokážeme řezat všechny vodivé materiály, slitiny ocelí nebo neželezné kovy. Do 50 mm tloušťky můžeme docílit velmi kvalitního řezu. Maximální tloušťka materiálu, kterou dokážeme touto metodou řezat, je cca 150 mm. Vzhledem k tomu, že tato metoda je hlavním předmětem diplomové práce, bude jí věnována samostatná kapitola č. 3. [9]



Obrázek 7: Strojní řezání plazmou (firma KT MetSteel) [10]

2.1.4 Tepelné dělení el. obloukem

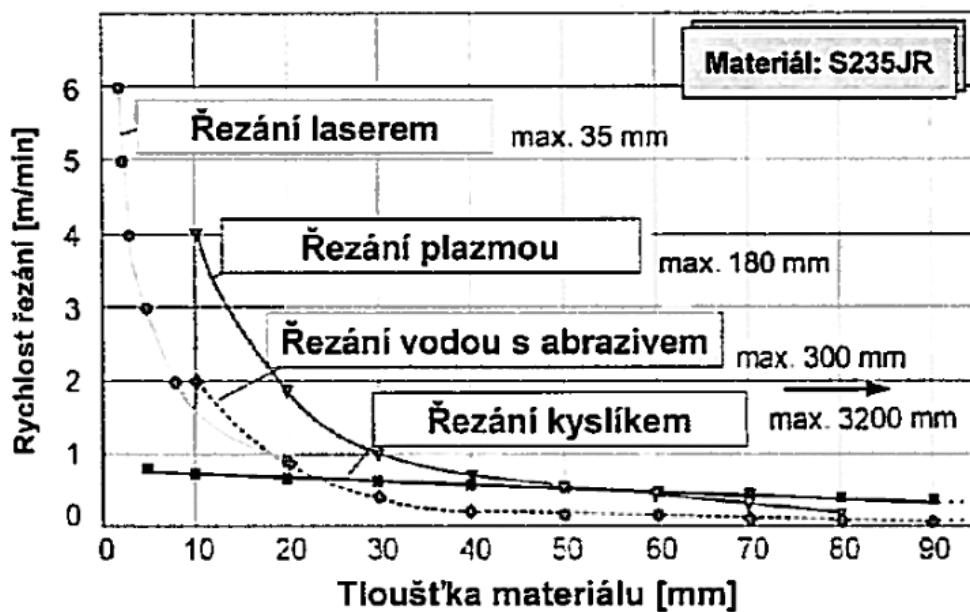
Proces obloukového řezání (nebo drážkování) je velice jednoduchý. Používá se k tomu uhlíková elektroda, standardní napájecí zdroj a stlačený vzduch. Mezi hrotem elektrody a obrobkem vzniká intenzivní elektrický oblouk. Žár z uhlíkového oblouku taví kov a ten je proudem stlačeného vzduchu odfukován z povrchu obrobku. Tato technologie se nejčastěji používá pro odstranění starých nebo vadných svarů, případně při demontážích zařízení či konstrukcí. Podle normy ČSN EN ISO 4063 má metoda dělení el. obloukem číselné značení 82. [11]

2.2 Vhodnost metod

Každá z výše uvedených metod tepelného dělení je vhodná pro jinou oblast řezání.

- Kyslíkem – 81
- Elektrickým obloukem – 82
- Plazmou – 83
- Laserem – 84

Na jakém principu tyto metody fungují, bylo řečeno v předešlých kapitolách. V následující části této kapitoly bude důkladněji popsáno, kdy je vhodné použít jakou metodu.



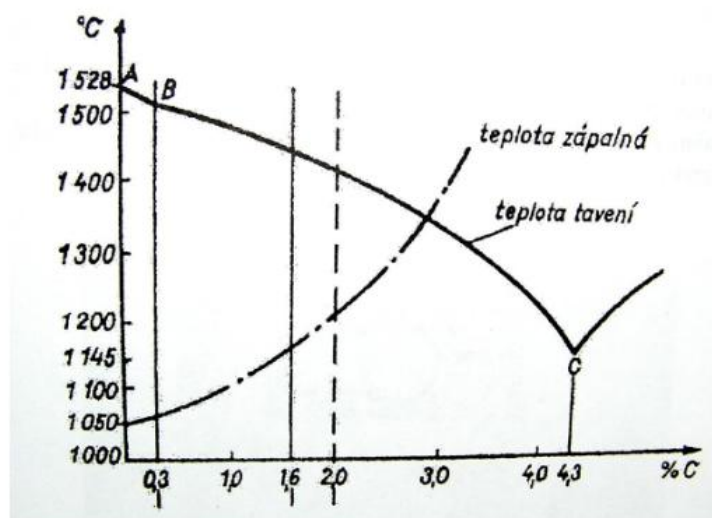
Obrázek 8: Graf závislosti rychlosti řezání na tloušťce materiálu pro různé metody řezání [11]

Podmínky řezatelnosti:

Řezání kyslíkem (81)

- Teplota tavení materiálu musí být vyšší než jeho zápalná teplota. Zápalnou teplotou se rozumí teplota, při které kov intenzivně reaguje s kyslíkem a kdy množství uvolněného tepla je za jednotku času vyšší než množství odvedeného tepla. Lze vidět na obrázku č. 9. [1], [10]
- Teplota tavení řezaného materiálu musí být vyšší než teplota tavení vzniklých oxidů. [10]

- Reakce řezaného materiálu s kyslíkem musí být exotermická (musí produkovat teplo). [10]
- Množství tepla uvolněného oxidickou reakcí musí postačovat na přehřátí materiálu na zápalnou teplotu. [10]
- Oxidy musí být natolik tekuté, aby je proud kyslíku vypudil z řezné spáry. [10]



Obrázek 9: Porovnání zápalné teploty a teploty tavení na obsahu uhlíku v materiálu [11]

Řezání elektrickým obloukem (82)

Dělení nebo také drážkování elektrickým obloukem se především využívá u oprav, nejvíce při odstraňování starých svarů nebo vnějších i vnitřních defektů, jako příprava pro následné svařování.

Využívají se 4 metody elektrického oblouku:

První z nich je metoda Oxy-arc, kdy elektroda, která se využívá je dutá a touto dutinou se přivádí kyslík do místa řezání. Ohřev zajišťuje elektrický oblouk, který se zapaluje dotykem elektrody s řezným materiálem, a díky tomu se místo nataví a přiváděný kyslík dutou elektrodou spaluje natavený materiál. [11]

Druhá metoda opět využívá kovovou dutou obalenou elektrodu, která má zpravidla celulózový obal, a ta se připojuje na DC- zdroje se strmou statickou charakteristikou. Napětí naprázdno může být maximálně 65V. [11]

Uhlíkové elektrody jsou třetí metodou. Jak už sám název napovídá, jedná se o plné elektrody, které jsou holé či poměděné. To umožňuje větší stabilitu oblouku, vysoký výkon, minimální tepelně ovlivněnou oblast a také čistý řez. Uhlíkovou elektrodou se dají řezat všechny kovy od oceli, litiny až po nikl, měď či hliník. Vzduch přiváděný skrze držák elektrody proudí následně podél elektrody a to vždy zespodu (musí mít tlak alespoň 5,5 baru). [11]

Poslední metoda používá obalené elektrody. Funguje na stejném principu jako obloukové svařování, jen je zapotřebí mnohem větší proudové zatížení. Řezaný materiál je z místa tavení odstraňován dynamikou oblouku a zároveň plyny, které vznikají hořením tlustého exotermického obalu elektrody. Používá se DC- s rozmezím proudu 350 A až 500 A. Maximální tloušťka řezaného plechu je 15mm. [11]

Plazmové řezání (83)

Plazmové řezání se využívá při řezání všech vodivých materiálů, omezeně lze pomocí nezávislého zapojení řezat i nevodivé materiály. Maximální tloušťka řezu je 150 mm, výjimečně až 180 mm. Nejlepší a nejehospodárnější je využití plazmového oblouku při řezání korozivzdorné oceli a slitin hliníku. Tato metoda umožňuje řezat vysokou rychlostí, vyznačuje se hladkým řezem a úzkou řeznou spárkou. Využívá se při ručním řezání, ale také při strojním řezání na CNC strojích.

Především při řezání tenkých plechů je řezání velmi úsporné (např. v porovnání s řezáním kyslíkem), jelikož nepotřebuje přehřev. Ve výsledku je i menší TOO. Lze dosáhnout velmi solidní rychlosti řezu a díky těmto dvěma aspektům lze ušetřit čas i peníze.

Kvalita povrchu řezného materiálu nehraje téměř žádnou roli. Povrch může být oxidovaný, lakovaný či jakkoliv narušený. Jeho kvalita při plazmovém řezání má jen minimální vliv na celý proces. [9], [12]

Laserové řezání (84)

V současnosti je využití laseru při řezání materiálu nejrozšířenější aplikací laseru v průmyslu.

Nejčastěji se tato metoda používá pro řezání oceli, korozivzdorné oceli, hliníku, ale jsou také speciální sestavy laserových řezaček pro plast, dřevo či keramiku. Mezi hlavní výhody laseru patří přesnost řezu - 0,1 mm na metr délky řezu. Snadná kontrola výkonu umožňuje rovnoměrnou kvalitu řezu v celé jeho délce. Řezné plochy dosahují drsnosti cca Ra 1,6. Laser je schopen řezat vysokou rychlostí, obdobně jako plazma. Obvyklé laserové řezací sestavy zvládají řezat do 20 mm tloušťky materiálu, ty nejvýkonnější dokážou až do 40 mm. Díky schopnosti fokusovat laserový paprsek do velmi malého bodu se šířka řezné spáry pohybuje kolem hodnoty 0,05mm. Laserové řezání má velké výhody oproti ostatním metodám, avšak pořizovací cena ve srovnání se stejně výkonnou plazmovou řezačkou je několikanásobná, a zároveň údržba a vlastní proces laserové řezací soustavy je taktéž velmi nákladný. [11], [13], [14]

3 Řezání plazmou

3.1 Historie plazmy

Plazma - takto označujeme čtvrté skupenství hmoty. Na naší planetě se vyskytuje jen zřídka, avšak 99% hmoty, která se vyskytuje ve vesmíru, je právě ve formě plazmatu. Plazma je kvazineutrální plyn nabitých a neutrálních částic, který vykazuje kolektivní chování. [15]

Plazmu můžeme rozdělit na dva druhy. Podle stupně ionizace na slabě a silně ionizovanou plazmu. Slabě ionizovaná plazma může existovat za pokojové teploty a koncentrace nabitých částic je malá oproti neutrálním částicím. Tento typ plazmy je směs neutrálního plynu a elektronů. Zatímco silně ionizovaná plazma je směs elektronového a iontového plynu, která existuje pouze za vysokých teplot. [15]

Při popisu výboje v roce 1879 si William Crookes uvědomil, že jev, který popisuje, je nové skupenství a popsal ho. Chemik americké národnosti Irving Langmuir, studoval elektrický oblouk se stejným počtem kladných iontů a elektronů, a byl první, kdo toto skupenství pojmenoval jako plazma. Tento termín zvolil, když při pozorování chování kladného sloupce ve výboji mu připomněl chování krevní plazmy. [15]

Plazma se od plynu liší především tím, že na částice působí síly gravitační, ale také elektromagnetické. To vede k důsledku, že plazma je elektricky a tepelně vodivá. Plazma vytváří plazmová vlákna neboli pinče a proudové vrstvy, které tvoří buď lineární nebo plošné útvary. Skrze plazmu se dokáže šířit velké množství vln (od magnetoakustické až po Alfvénovy vlny). [15]

3.2 Princip plazmového řezání

Řezání plazmovým obloukem můžeme rozdělit na dva základní principy - na přenesený oblouk neboli závislé zapojení a na nepřenesený oblouk čili nezávislé zapojení.

Přenesený oblouk se používá u vodivých materiálů. Nejprve se v hořáku zapálí pilotní oblouk (pomocný oblouk). Ten vzniká mezi elektrodou a obalem hořáku. Poté se do hořáku přivede pomocný plyn, který se pomocí pilotního oblouku ionizuje. Tento ionizovaný plyn proudí skrze hořák na řezaný materiál. Jelikož je v tomto případě materiál vodivý, vzniká zde přenesený plazmový oblouk mezi elektrodou a řezaným materiálem. Tento princip se využívá nejen při řezání, ale také svařování a navařování vodivých materiálů. [20]

Nepřenesený oblouk se využívá nejvíce při nanášení povlaků (tzv. žárové stříkání), ale dají se s ním obrábět a řezat i nevodivé materiály. Plazmový oblouk vzniká v hořáku, kde je oblouk tvořen mezi elektrodou a tryskou a plyn proudící tímto obloukem je ionizován a vzniká plazma. [20]

Samotná plazma má vysokou teplotu. Pomocný elektrický oblouk, který vzniká mezi elektrodou a řezaným materiálem či elektrodou a tryskou, tuto teplotu ještě více podporuje. Teplota se může pohybovat až kolem 20 000 K v závislosti na použitém plazmovém médiu (v přírodě se můžeme setkat s plazmou při blesku, kdy v jeho kanálu se teplota pohybuje kolem 30 000 K). Plyny mají různé fyzikální vlastnosti, včetně ionizačních potenciálů. Kontrahovaný (fokusovaný) elektrický oblouk má vzhledem k použitým plynům tyto teploty: vodíková plazma do 8 000 K, dusíková plazma do 7 000 K, argonová plazma do 15 000 K, heliová plazma do 20 000 K. Vysoká rychlost, kterou proudí plyn tryskou, je též velmi důležitá a dosahuje rychlosti až 350 m/s, což je více než je rychlost zvuku. [9], [10], [16]

3.3 Elektrody

Při dělení materiálu metodou plazmového řezání je dosahováno vysokých teplot. Díky tomu jsou díly hořáku jako jsou trysky, krytky vířivého plynu, krytky trysek, ale také elektrody velmi namáhány jak právě teplotou, tak i erozivním působením plynů. Abychom docílili co největší životnosti elektrody, musíme ji chladit. Při řezání do 100 A je elektroda chlazená vzduchem či plazmovým plynem, u systémů kde je potřeba řezat většími proudy (nad 100 A) je třeba elektrodu chladit kapalinou (propylenglycol). [17]

Tělo samotné elektrody bývá nejčastěji vyrobeno z mědi či jejích slitin. Ve své špičce obsahuje elektroda vložku buď z wolframu, ale pokud se jako plazmové médium používají plyny jako kyslík a vzduch, používá se hafnium. Wolfram v přítomnosti kyslíku reaguje (probíhají oxidační reakce) a tím se mnohem více opotřebovává. Hafnium mnohem lépe odolává přítomnosti kyslíku a taktéž jako wolfram má vysoký bod tání. [17]

Elektroda a samotná vložka se opotřebovává vždy, ať je z jakéhokoliv materiálu. Největší podíl na opotřebení má samotný start neboli zapálení oblouku a zároveň také ukončení procesu řezání – zhasnutí oblouku. Právě v těchto okamžicích, tím myšleno zapálení/zhasnutí oblouku, se hafnium rychle zahřívá na vysokou teplotu než se nataví, a poté naopak při zhasnutí se rychle ochladí a tuhne. Těmito cykly nejvíce ubíráme na životnosti elektrody. Proto je velmi zásadní samotné chlazení soustavy. [17]

Hafnium má špatnou tepelnou vodivost, proto se začaly vyrábět vložky z hafnia, které jsou zasazeny do obalu ze stříbra. Stříbro velmi dobře odvádí teplo a zároveň je velmi dobrým vodičem elektrického proudu. Pomocí tohoto stříbrového obalu se hafnium mnohem lépe chladí, tudíž se pomaleji vypaluje. Výhodou je samozřejmě delší životnost spotřebního dílu, a to vede k delšímu provozu hořáku před výměnou dílů. [17]

Tato metoda stříbrového obalu hafnia je patentovaná ve Spojených státech i v Evropě. Přestože cena stříbra stále stoupá, pořizovací ceny těchto elektrod jsou stále srovnatelné s běžnými měděnými elektrodami, avšak při větší užitné hodnotě pro

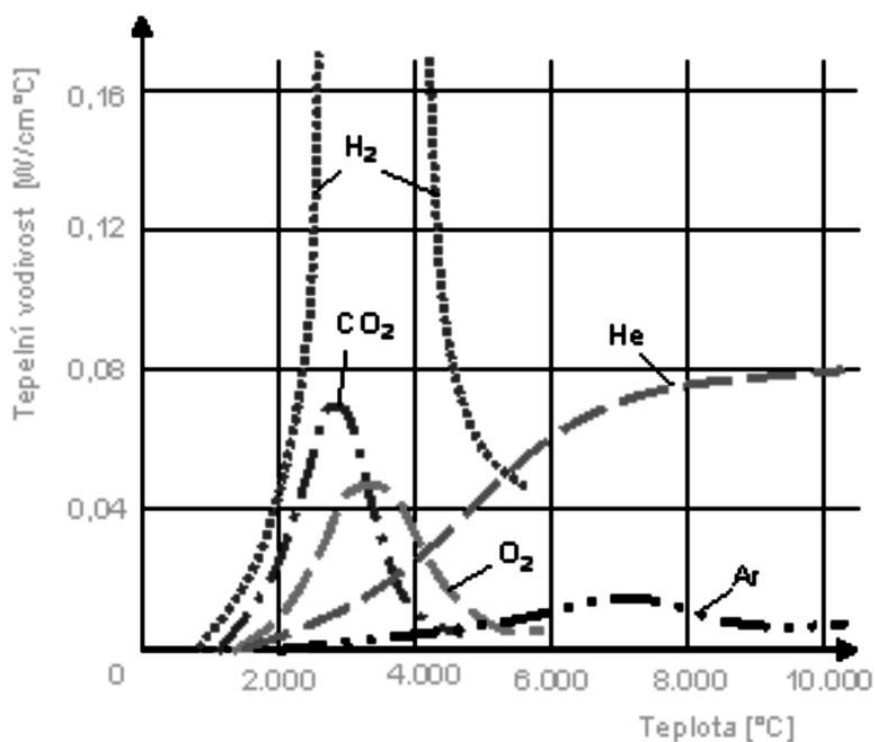
zákazníka. Tyto elektrody se používají pro proudové nastavení do 200 A a mají označení „Super – Life“. [17]

3.4 Typy plynů

Pro vytvoření plazmatu se nejdříve zapálí tzv. pilotní oblouk, který vzniká mezi elektrodou a stěnou trysky. Po krátkém časovém intervalu, cca 3 vteřin, se plazmový zdroj přepne do závislého zapojení o větším výkonu, a tím se vytvoří elektrický oblouk, který vzniká mezi elektrodou a řezaným materiálem. Skrze tento oblouk proudí pod tlakem plyn a to stabilní (inertní) nebo aktivní, či jeho kombinace.

Mezi inertní plyny, které se používají při plazmovém řezání, patří argon, helium, ale také lze použít například dusík.

Aktivní plyn se používá pro zvýšení tepelného účinku. Jako aktivní plyn se nejčastěji používá kyslík, čímž vznikají na povrchu kovu oxidy, které jsou ale snadno odstranitelné. Díky tomu je řezání efektivnější. Mezi aktivní plyny patří také vodík a uhlovodíky. [18]



Obrázek 10: Vliv tepelné vodivosti plynů v závislosti na teplotě [22]

Dále jsou popsány jednotlivé plyny používané při plazmovém řezání:

1. Vzduch: Vzduch je směs plynů a zároveň nejpoužívanější médium pro plazmové řezání. Je dostupný, levný a nevyžaduje dodatečné náklady na plynové láhve. Nicméně pro výrobu technického vzduchu je třeba zařízení – kompresor. Vzduch obsahuje i kyslík (cca 21 hmot. %), který podporuje oxidaci a odstraňování nataveného kovu. Vzduch se nejčastěji používá pro řezání neželezných kovů, například hliníku, ale dá se použít i pro hrubé řezání oceli.
2. Kyslík: Kyslík je aktivní plyn, který se často používá při plazmovém řezání. Jeho reaktivita (exotermická reakce) umožňuje rychlejší a účinnější řezání kovů, proto se používá nejvíce pro řezání uhlíkových ocelí. Kyslík se často kombinuje se stabilním plynem jako je argon nebo dusík, a to pro optimalizaci procesu řezání.
3. Argon: Argon je inertní plyn, který má velmi dobré ionizační vlastnosti, a proto se i při svařování používá jako nosná část směsí. Lze ho použít i samostatně, což z něj dělá nejpoužívanější ochranný plyn při svařování. Při plazmovém svařování jej lze použít nejen jako ochranný plyn, ale i jako plazmový plyn a taktéž ho lze použít při plazmovém řezání. Jeho hlavní výhodou je schopnost poskytovat stabilní a konzistentní plazma, které je ideální pro řezání měkkých kovů náchylných na styk s kyslíkem. Je to například hliník či vysokolegovaná korozivzdorná ocel. A právě argon vytváří ochranný plazmový oblak, díky kterému se minimalizuje interakce řezaného materiálu s okolním vzduchem.
4. Dusík: Dusík je další málo reaktivní plyn, který se často kombinuje s kyslíkem nebo argonem při plazmovém řezání. Jeho využití je podobné jako u argonu. Pomocí dusíku lze řezat neželezné kovy jako je hliník nebo vysokolegované korozivzdorné oceli. Dusík se více využívá při řezání hliníku, jelikož minimalizuje oxidaci. Volba mezi těmito dvěma plyny závisí na konkrétních vlastnostech řezaného materiálu, ale také hraje roli ekonomický faktor, protože je dusík snáze dostupný.
5. Vodík: Vodík je aktivní (redukční) plyn, který se někdy používá při plazmovém řezání. Jeho použití umožňuje vyšší rychlost řezání a zlepšenou kvalitu řezu, jelikož má nejvyšší tepelnou vodivost ze všech uvedených plynů. Vodík se často kombinuje s argonem nebo jinými plyny pro optimalizaci výkonu. Využívá se při řezání oceli

a nerezové oceli. Používá se ze všech uvedených plynů nejméně díky své velké reaktivnosti a s kyslíkem může vytvořit výbušné směsi. [18]

Tabulka 1: Složení vzdušné atmosféry [21]

Hlavní složky	Koncentrace (% obj.)	Celková hmotnost (%)
Dusík (N ₂)	78,090	75,5
Kyslík (O ₂)	20,950	23,17
Argon (Ar)	0,930	1,286
Oxid uhličitý (CO ₂)	0,032	0,043
Neon (Ne)	1,8.10 ⁻³	1,2.10 ⁻³
Helium (He)	5,24.10 ⁻⁵	7,0.10 ⁻⁵
Krypton (Kr)	1,0.10 ⁻⁴	3.10 ⁻⁴
Vodík (H)	5,0.10 ⁻⁵	-
Xenon (Xe)	8,0.10 ⁻⁶	4,0.10 ⁻⁴
Ozon (O ₃)	1,0.10 ⁻⁶	-

Kombinace plynů pro jednotlivé materiály:

Dané materiály se mohou řezat kombinací plynů či jedním daným plynem, viz tabulka č. 2. Hlavní roli pro volbu varianty, jak se bude materiál řezat, jsou vlastní specifika řezaného materiálu. Mezi základní aspekty, na které se musí přihlížet, patří:

1. Reaktivita – náchylnost některých materiálů k oxidačním procesům, proto je potřeba zvolit kombinaci plynů, která oxidaci minimalizuje.
2. Vlastnosti materiálu – různé materiály mohou vyžadovat specifické tepelné a chemické vlastnosti pro dosažení čistého a kvalitního řezu, proto mohou být použity kombinace více plynů.
3. Bezpečnostní úvahy – například při manipulaci a použití vodíku se musí dbát na velkou bezpečnost.
4. Ekonomické úvahy – náklady na plyn. [18]

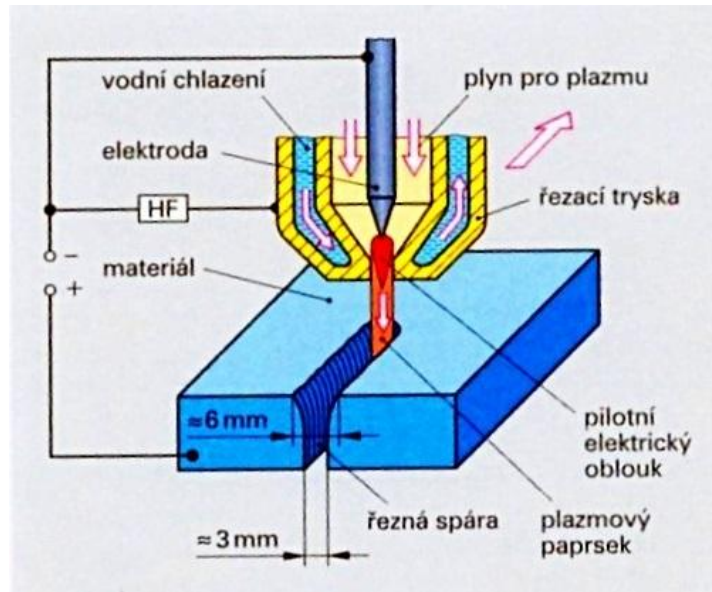
Tabulka 2: Využití kombinace plynů pro jednotlivé materiály [10], [19]

Typy materiálů	Varianta 1	Varianta 2	Varianta 3	Varianta 4
Běžná ocel	kyslík	vzduch		
Vysokolegovaná a nástrojová ocel	argon + vodík	argon + vodík + dusík	argon + dusík	
Lehké kovy	argon + vodík	vzduch		
Barevné kovy	argon + vodík			
Kompozitní materiál	argon + vodík	argon + vodík + dusík	vzduch	kyslík

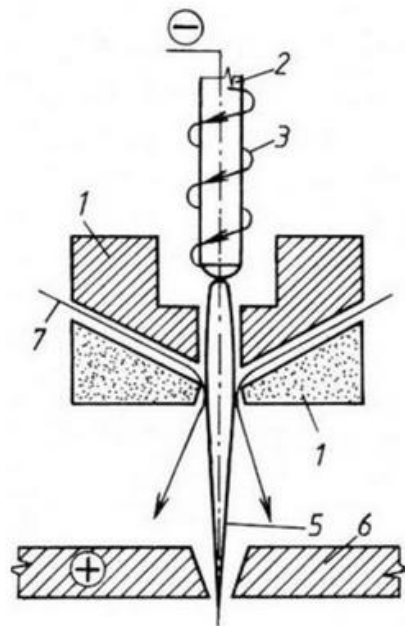
3.5 Řezací hořáky

Samotný řezací hořák je zařízení, ve kterém se přeměňuje elektrická energie na tepelnou energii. Ta je poté usměrněna proudem plazmatu. Plazmový hořák se skládá z několika výměnných částí, které budou popsány důkladněji v následující kapitole č. 3.6. Dané sestavy se volí dle zvoleného řezacího proudu a také vzhledem k tloušťce a typu materiálu, který budeme řezat. Tryska je chlazena buď plynem nebo kapalinou. Ve výstupní části je tryska zúžená pro větší koncentraci plazmového oblouku. Plazmové hořáky mají též jednu důležitou vlastnost. Díky své správné konstrukci stabilizují elektrický oblouk. [26]

Plazma dokáže řezat vodivé, ale i nevodivé materiály. Plazmové hořáky můžeme rozdělit na dva typy. První z nich je hořák s přeneseným obloukem, kterým se řežou právě vodivé materiály. Druhý typ je hořák s nepřeneseným obloukem, kterým se dá obrábět například keramika, ale spíše se využívá pro nanášení povlaků. V tomto případě hořák funguje trochu jinak než u běžného řezání ocelí. Jak bylo v předešlých kapitolách zmíněno, při zpracování vodivých materiálů vzniká oblouk mezi elektrodou a řezným materiálem. U obrábění keramiky to je ale jinak. Zde se používá netransferový neboli nepřenesený oblouk, který vzniká mezi elektrodou a tryskou hořáku. Tato speciální tryska plazmového hořáku s vodní stabilizací má v sobě přídavné kanálky, kterými proudí voda přímo do hořáku. Výhodou při řezání touto technologií je, že po startu a vzniku oblouku můžeme celý hořák ponořit pod vodu. To je výhoda pro obsluhu, nepráší se, sníží se hluk a zmenší se ultrafialové záření. [20]



Obrázek 11: Schéma řezání plazmovým hořákem [24]

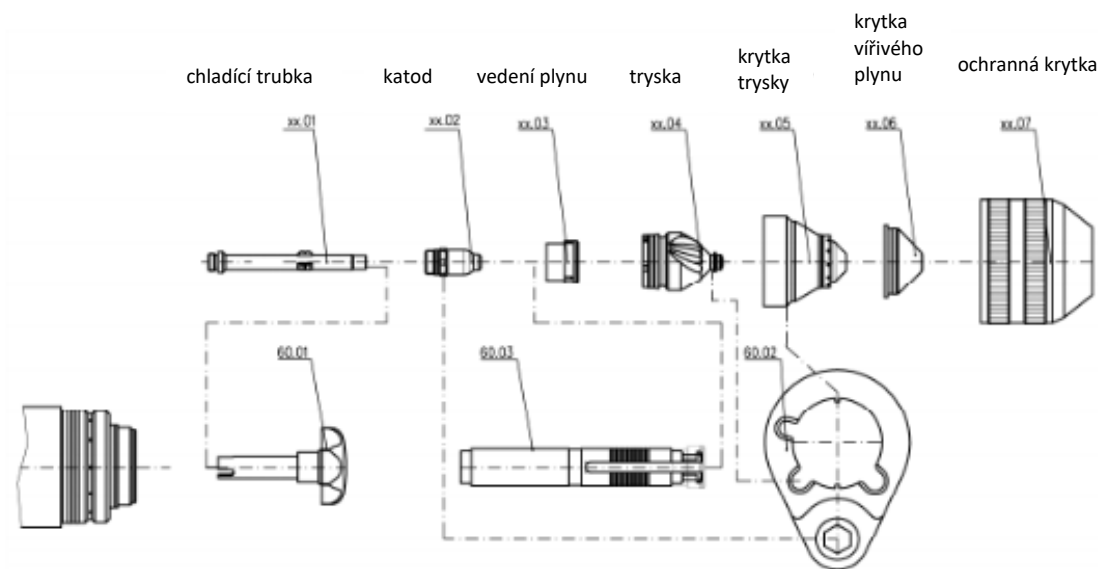


- 1 – těleso hořáku
- 2 – katoda
- 3 – přívod plynu (argon)
- 4 – chlazení hořáku
- 5 – paprsek plazmatu
- 6 – obrobek
- 7 - přívod vody

Obrázek 12: Plazmový hořák s vodní stabilizací [25]

3.6 Popis jednotlivých částí plazmového hořáku

Plazmový hořák pro řezání se skládá z několika komponent. Jak bylo zmíněno v kapitole 3.5, téměř vždy se hořák musí celý rozmontovat a složit z odpovídajících komponent. Ty jsou dané od výrobce dle zvolené velikosti řezného proudu, typu materiálu a jeho tloušťky. Tyto komponenty jsou vidět na obrázku č. 13.



Obrázek 13: Komponenty hořáku a nářadí [27]

3.6.1 Tělo hořáku

Základní částí plazmového hořáku je jeho samotné tělo, na které se dále montují vyměnitelné součásti. Tyto součásti – komponenty - můžeme také nazvat spotřebním materiálem. Jelikož se všechny vyměnitelné části montují přímo na tělo hořáku, tak právě toto tělo hořáku je uzpůsobeno tak, aby všechny jeho jednotlivě vyměnitelné části byly mezi sebou dokonale vyrovnané.

Dále je skrze tělo hořáku dodáván řezný a ochranný plyn. Jeho poslední funkcí je pak dodávání řezného proudu na katodu. [28]

3.6.2 Chladicí trubka

Jako první v pořadí se na tělo hořáku montuje chladicí trubka, která je nezbytná pro chlazení katody. Jen málokdy se musí tato část měnit, protože pro většinu sestav

bývá stejná. Je ale nutné ji kontrolovat, zda není příliš opotřebovaná. Jak název napovídá, má za úkol chladit katodu. [28]

3.6.3 Katoda

Katoda je jednou z hlavních částí sestavy. Právě v katodě je počáteční a i elektrický kontaktní bod plazmového oblouku. Jak bylo řečeno v kapitole (3.3 Elektrody), katoda neboli elektroda je vyrobena většinou z mědi a v samotné špičce je vložka z wolframu nebo hafnia. Volí se tyto dva materiály kvůli velmi vysokému bodu tání. Při plazmovém řezání musí katoda vydržet extrémní teplotu samotného plazmového oblouku. Její hlavní funkcí je tedy vytvořit nejprve pilotní oblouk a následně plazmový oblouk mezi katodou a řezaným materiálem. [28]

3.6.4 Vedení plynu

Kroužek, který především vede plyn, má dvě funkce. První funkcí je rotace plynu, který směřuje do oblasti katody. To má za účel vystředění řezacího oblouku, tím pádem zúžení řezného plazmatu pro vyšší řezné rychlosti. Druhá funkce tohoto kroužku je ve využití pro chlazení těla hořáku, katody a také trysky. Díky této schopnosti tak zvýšíme životnost komponent a také účinnost řezání. [28], [29]

3.6.5 Tryska

Tryska je část soustavy, která ovládá směr plazmového oblouku. Pokud máme novou trysku, otvor v ní je dokonale kulatý a vnitřní i vnější hrany jsou ostré. Tím docílíme co nejlepší kvalitu řezu. Při opotřebování se otvor mění do nedokonalého tvaru, hrany se díky erozivnímu opotřebovávání zakulacují, a to vede ke špatné kvalitě samotného řezu. Proto je nutné opotřebování trysky kontrolovat. [28]

3.6.6 Krytka trysky

Krytka trysky má za úkol držet trysku a krytku vířivého plynu na správném místě a zároveň směřovat tok chladicí kapaliny na vnější stranu trysky. Tento komponent není opotřebováván plazmovým obloukem, tudíž vydrží mnohonásobně delší dobu oproti ostatním výměnným částem. Krytku je nutno vyměnit pouze v případě, když se ucpou malé otvory, jimiž proudí plyn. [28]

3.6.7 Krytka vířivého plynu

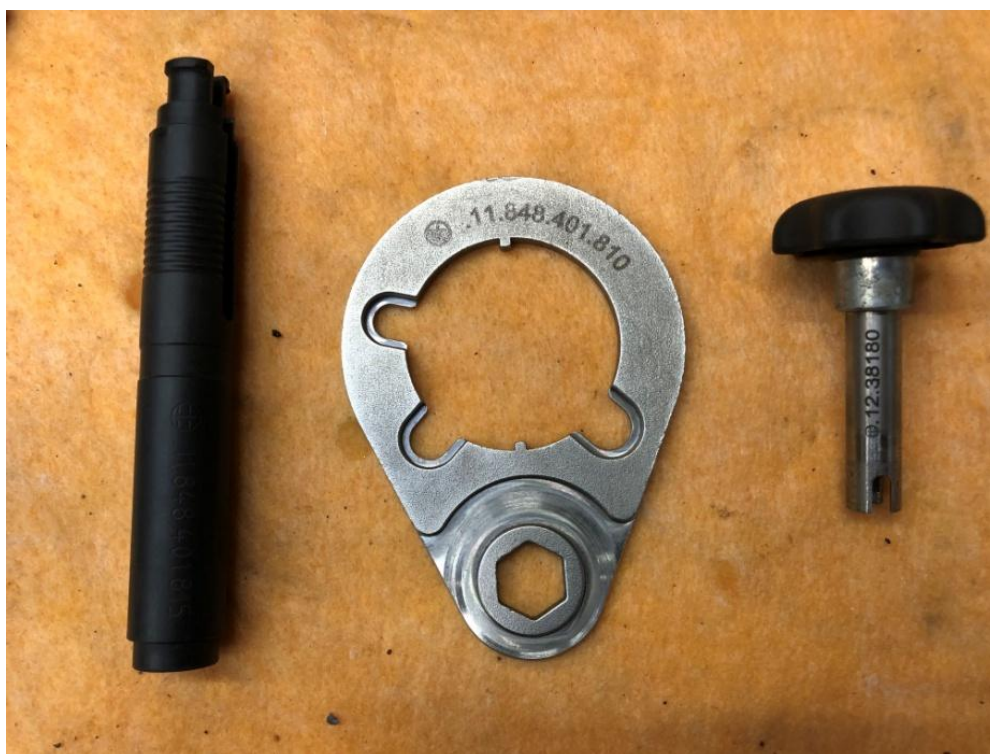
Krytka včetně ochranného krytu chrání všechny spotřební komponenty před roztaveným řezaným materiálem. Avšak krytka jak je dle názvu patrné, má i druhou funkci, a to vířit plazmový plyn. Jelikož krytka vířivého plynu je v bezprostřední blízkosti řezu a taktéž skrze ni proudí plazmový oblouk, je to komponent, který patří mezi nejvíce opotřebované. Tvar a velikost otvoru v krytce je velmi zásadní pro kvalitu řezu, proto je nutné opotřebení kontrolovat. V případě viditelného opotřebení se musí vyměnit. [28]

3.6.8 Ochranná krytka

Ochranná krytka, jak už samotný název napovídá, chrání veškeré spotřební části hořáku před rozstříkáním vznikajícím při samotném řezání. Také pomáhá chladit trysku a přispívá ke kvalitě a vyšší rychlosti řezu. [28]

3.6.9 Speciální montážní nářadí

Při sestavování hořáku je potřeba speciálního nářadí. Toto nářadí slouží jak k utahování, tak i povolování daných komponent na tělo hořáku. Slouží také k tomu, aby byl daný komponent ustaven v přesné poloze vůči ostatním částem hořáku.



Obrázek 14: Montážní nářadí hořáku

Na obrázku č. 15 je ukázán postup pro demontáž jednotlivých komponent z hořáku.



Obrázek 15: Popis jednotlivých kroků při demontáži hořáku

- 1) Nasazení plazmového hořáku na podstavec.
- 2) Ručně odšroubovat ochranný kryt včetně krytky vířivého plynu.
- 3) Vytlačit krytku vířivého plynu.
- 4) Pomocí speciálního klíče odšroubovat krytku trysky.
- 5) Nasunout klíč na trysku a vytáhnout jí ze sestavy.
- 6) Stahovákem vytáhnout z trysky komponent - vedení plynu.
- 7) Odšroubování katody šestihranným klíčem.
- 8) Pomocí nástrčného klíče vytáhnout chladící trubku.
- 9) Následná kontrola, zda nejsou komponenty opotřebovány.

4 Příprava experimentu

Cílem experimentu v rámci DP bylo zjistit, jak se liší provedení řezných hran u různých výkonových sestav plazmových hořáků, které jsou podle výrobce použitelné pro řezání stejné tloušťky materiálu. Pro experiment byly zvoleny dva typy oceli, o tloušťce 10 mm, jako základní materiály pro řezání. Tyto materiály jsou důkladněji popsány v kapitole (4.3 Volba materiálu), jedná se o konstrukční ocel S325 a oťeruvzdornou ocel Hardox 450.

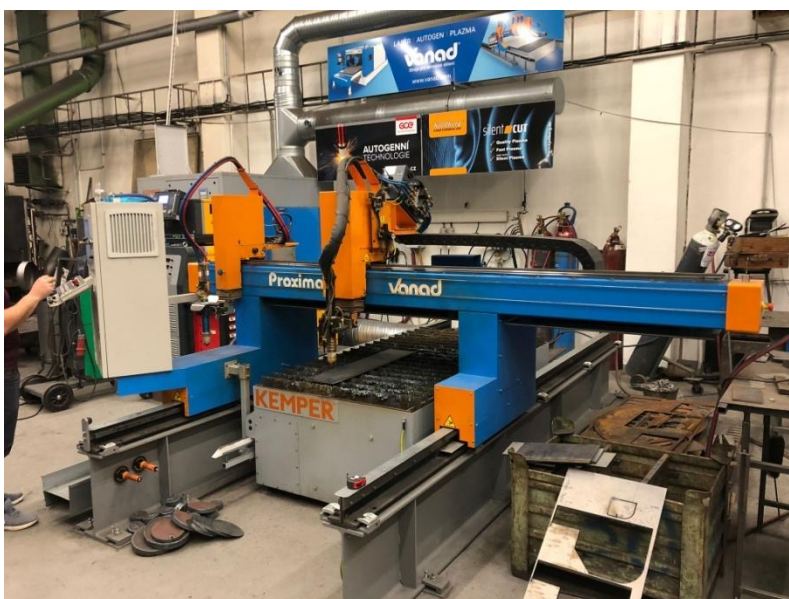
Bylo nutné vybrat takové typy hořáků, aby daná tloušťka materiálu byla v každém z jejich rozsahů použitelnosti. Možnost řezání tloušťky 10mm umožňují 3 výkonové sestavy hořáků, a to pro proudové zatížení: 60A, 130A a také 280A.

Vzorky pro experiment byly řezány dle tvaru doporučeného normou ČSN EN 1090-2 (*Provádění ocelových konstrukcí a hliníkových konstrukcí - Část 2: Technické požadavky na ocelové konstrukce*). A podle stejné normy byly měřeny a vyhodnocovány parametry řezu: drsnost, úchylka kolmosti a tvrdost řezné plochy. Bližší popis je uveden v kapitole 4.4.

4.1 Popis experimentálního zařízení

Zařízení, na kterém bylo TP plazmou realizováno, byl stroj Vanad Proxima s plazmovým zdrojem Kjellberg Hi Focus 280i Neo. Dále jsou popsány jednotlivé části zařízení.

Pohybovou část zajišťoval stroj VANAD PROXIMA 20/20.



Obrázek 16: Pohybová část - Vanad Proxima 20/20

Tabulka 3: Technické parametry stroje Vanad Proxima 20/20 [23]

Motor	370 W – 0,6 Nm
Maximální pracovní rychlost	Podle užití technologie
Max. rychlost	35,4/min
Přesnost polohování	±0,25mm
Opakovaná přesnost	±0,15 mm
Přesnost úhlopříčky	± 0,5 mm na 3 m
Max. zrychlení	1,4m/sec
Počet suportů	1 autogenní jednotka, 1 plazmová jednotka
Rychlost zvedání hořáků	8m/min (plazma)
Kapacita volné paměti pro pálicí plány	Cca 2GB
Přesnost nastavení zapalovací výšky plazmy	± 0,1mm
Rozměr pracovní plochy	Plech 1000x2000 mm

Druhá část stroje je plazmový řezací zdroj Kjellberg HiFocus 280i NEO.



Obrázek 17: Plazmový řezací zdroj Kjellberg HiFocus 280i Neo

HiFocus 280i neo je v dnešní době jeden z nejflexibilnějších a nejvýkonnějších, velmi přesných, plazmových řezacích strojů. Dokáže řezat v rozsahu tlouštěk od 0,5 mm – do 70 mm. Díky moderní inverterové technologii dokáže zajistit nejvyšší kvalitu a funkčnost. Lze ho kombinovat s 2D, ale i 3D CNC stroji, řízenými a naváděcími systémy. Oproti konkurenci HiFocus disponuje vyšší rychlostí při řezání a značení vodivých materiálů a zároveň zaručuje vynikající kvalitu řezu při nízkých nákladech na proces. HiFocus 280i neo je obvykle v dispozici s technologií Contour Cut pro řezání vnějších i vnitřních obrysů a taktéž malých otvorů v měkké oceli. Vývoj Counter Cut došel k nové technologii Silent Cut, která sníží hlasitost řezání až o 15dB (A) při řezání v rozmezí proudu od 60A do 160A. [30]

Tabulka 4: Parametry plazmového zdroje Kjellberg HiFocus 280i Neo [30]

Zdroj energie	HiFocus 280i neo
Síťové napětí	3x 400V, 50Hz
Řezný proud (při 100% pracovním cyklu)	280 A
Označovací proud	5-50 A
Rozsah řezání	0,5-70 mm
Pronikavý řez (Piersing)	Až 40 mm
Rozměry (DxŠxV)	1030x680x1450 mm
Hmotnost	422 kg
Plazmový hořák	PerCut 451

Jako třetí částí je odsávací systém PlasmaFil od výrobce KEMPER. Ten odsává zbytky plynů, které jsou spotřebovány při procesu řezání, ale taktéž prach o velikosti menší než 0,1 μm a především zplodiny a exhalace, které při řezání vznikají.



Obrázek 18: Odsávací systém Kemper - PlasmaFil

4.2 Experimentální pracoviště

První část experimentu byla prováděna v halové laboratoři Ústavu strojírenské technologie, FS, ČVUT v Praze. V těchto prostorách probíhala předpříprava vzorků tryskáním za pomoci automatického tryskače společnosti S.A.F. Praha typ RT1D1000/H/OP2SE (zařízení pro povrchové úpravy) a následné plazmové řezání dle normy ČSN EN 1090-2. Následující metalografická úprava řezaných vzorků a samotné vyhodnocování experimentu (kvality řezu) probíhalo v metalografické laboratoři Ústavu strojírenské technologie, FS, ČVUT v Praze.

4.3 Volba materiálů

Pro experiment byly vybrány dva ocelové plechy z odlišných materiálů. Prvním byl jeden ze základních typů konstrukčních ocelí - S235. Jedná se o nelegovanou konstrukční ocel, jejíž chemické složení a mechanické vlastnosti jsou uvedeny v tabulce č. 4 a č. 5. Podrobnější přehled vlastností oceli S235 lze nalézt v příloze 1.

Tabulka 5: Chemické složení konstrukční oceli S235

Mn (max %)	Si (max %)	C (max %)	P (max %)	S (max %)
1,6	0,05	0,17-0,22	0,05	0,05

Tabulka 6: Mechanické vlastnosti konstrukční oceli S235

Parametry	Značení	Hodnota
Mez pevnosti v tahu	R_m	360-510 MPa
Mez kluzu	$R_{p0,2}$	235 MPa
Tvrdość podle Brinella	HB	100-154
Tažnost	A	22-26 %
Uhlíkový ekvivalent*	CEV	0,35 – 0,40

Druhým materiálem byla vybrána ořuvzdorná ocel Hardox 450. Jedná se o materiál vyráběný společností SSAB. Nejdříve se používal Hardox 400 a ačkoliv jeho vlastnosti byly velmi slušné, zákazníci chtěli větší tvrdość při zachování jeho technologických vlastností. Tak vznikl Hardox 450, který se dnes stává čím dál větším trendem a standardem pro ořuvzdornou ocel. Navýšení tvrdości o 50 HB přináší zvýšení životnosti této oceli v jejím použití, avšak houževnatost oproti Hardoxu 400 klesla o 5J na KV = 40J. Tato ořuvzdorná ocel se nejčastěji využívá pro ocelové konstrukce, ale také pro výrobu sklápěcích korb nákladních automobilů a kamiónů, stavebních lžic a mnoho dalších zařízení, především ve stavební technice, a to právě pro její delší životnost a schopnosti snášet nárazové síly, aniž by se při tom narušila konstrukční integrita. [31], [32]

Porovnávání ořuvzdorných ocelí na základě jejich tvrdości však nestačí. Hardox 450 se oproti běžné ořuvzdorné oceli 450 velmi liší. Jeden z hlavních rozdílů oproti obyčejné ořuvzdorné oceli 450 je už ve fázi jejího kalení a popouštění. Tato odlišnost má za následek, že Hardox 450 má zaručenou tvrdość v celé tloušťce materiálu. Mezi další výhody patří záruky tloušťky, rovinnost a ohýbavost. Díky těmto vlastnostem lze předpovídat, jak se tento materiál bude chovat v dílenském zpracování a zaručí, že každý výrobek z tohoto materiálu bude totožný s tím předchozím. [31], [32]

Chemické složení:

Tabulka 7: Chemické složení ořezávací oceli Hardox 450

C (max %)	Si (max %)	Mn (max %)	P (max %)	S (max %)	Cr (max %)	Ni (max %)	Mo (max %)	B (max %)
0,230	0,500	1,600	0,025	0,010	1,200	0,250	0,250	0,005

Tabulka 8: Mechanické vlastnosti ořezávací oceli Hardox 450

Parametr	Značení	Hodnota
Tvrдость dle Brinella	HB	425-475 (střední hodnota 450)
Mez kluzu	R _{p0,2}	1200 MPa
Mez pevnosti v tahu	R _m	1400 MPa
Tažnost	A	10%
Uhlíkový ekvivalent*	CEV	0,48
Uhlíkový ekvivalent*	CET	0,35

Pozn. Celkový přehled vlastností ořezávací oceli Hardox 450 lze nalézt v příloze 2.

4.3.1 Úprava materiálu

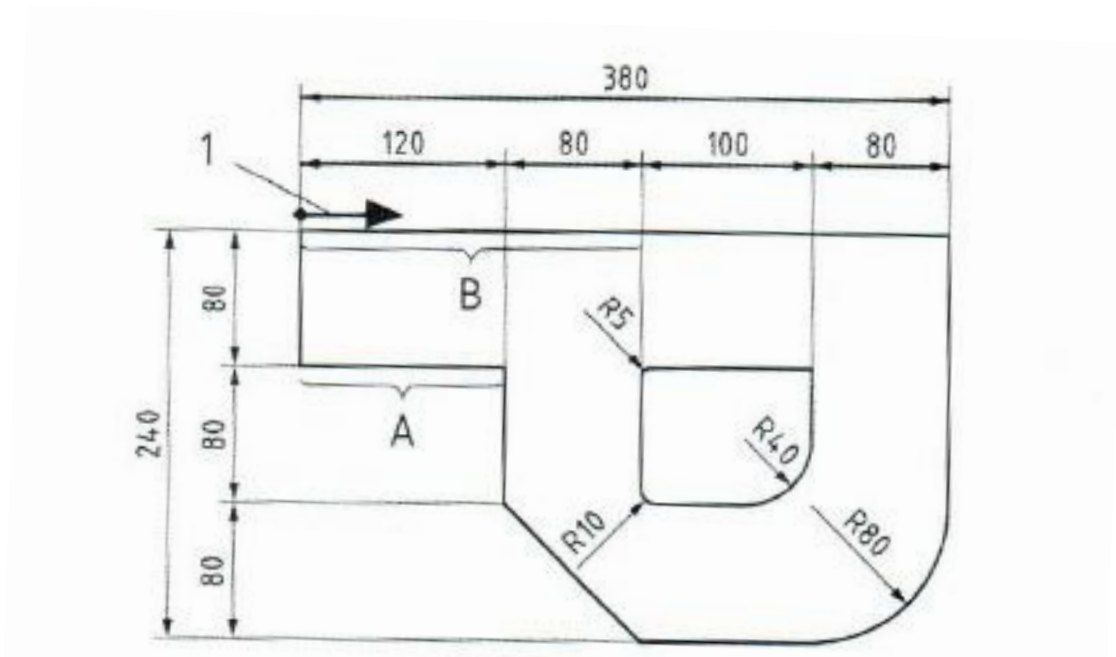
Plech z vybraných materiálů bylo nejprve potřeba nařezat na potřebný formát tak, aby je bylo možné otryskat (viz obr. 19). Tryskání bylo prováděno za účelem úpravy povrchu a zbavení se korozních produktů tak, aby bylo vyhodnocení kvality řezu adekvátní a porovnatelné. Rozměr tabule, která se následně tryskala, byla 880 x 400 mm. Na tento rozměr se vešly 3 potřebné vzorky od daného materiálu. Tryskání se provádělo na stroji zařízení S.A.F. Praha typ RT1D1000/H/OP2SE.



Obrázek 19: Přípravy experimentu, úprava materiálu

4.4 Norma ČSN EN 1090-2

Celý experiment byl naplánován a realizován v souladu s normou ČSN EN 1090-2. Dle této normy jsme schopni vyhodnotit kvalitu řezu a případné ovlivnění materiálu řezné plochy, tj. stanovit úchylku kolmosti a úhlu, průměrnou drsnost řezné plochy a taktéž tvrdost řezných ploch. Zkušební vzorek musí mít předepsaný tvar a rozměry, musí obsahovat přímé řezy o určité délce, ostré rohy, ale taktéž několik radiusů vnitřních i vnějších. Hrany u zakřiveného řezu a rohového úhlu musí mít srovnatelnou či vyšší kvalitu ve vztahu k úchylce kolmosti a úchylce úhlu, resp. k drsnosti povrchu, oproti přímému řezu. Výše uvedené parametry se stanovují v oblastech přímého řezu. Zkouška tvrdosti se provádí v místech, kde je dosažena nejvyšší řezná rychlost a rychlost ochlazení. Tvar a rozměry zkušebního vzorku jsou zobrazeny na obrázku č. 20. [33]



Obrázek 20: Doporučený tvar zkušebního kusu a místa měření [33]

Na vzorku se v souladu s normou ČSN EN 1090 vyhodnocovaly následující parametry (viz detailnější popis v kapitolách 4.4.1 – 4.4.3):

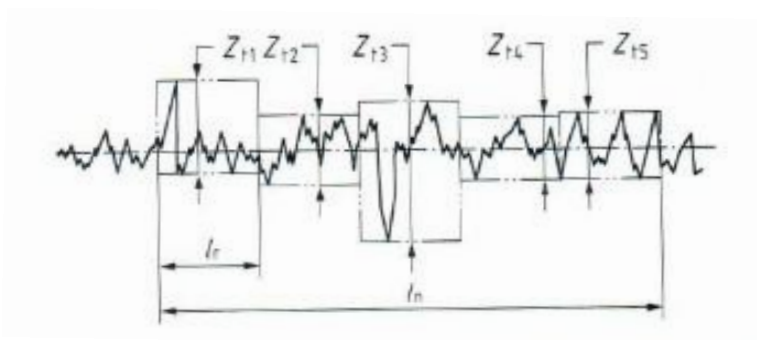
- a) Průměrná výška prvků profilu R_{25} - Drsnost povrchu
- b) Úchylka kolmosti a úhlu „u“
- c) Tvrdost řezné hrany



Obrázek 21: Připravené vzorky

4.4.1 Drsnost povrchu - Průměrná výška prvků profilu R_{z5}

Průměrná výška prvků profilu R_{z5} se stanoví v souladu s normou ČSN EN ISO 9013 (*Tepelné dělení - Klasifikace tepelných řezů - Geometrické požadavky na výroby a úchyly jakosti řezu*). Tento parametr se vyhodnocuje v úseku „B“ viz obrázek č. 20. Měření musí probíhat v přímém řezu a příčně ke kořeni drážky a provádí se v pěti měřených úsecích, které spolu sousedí. Každý jednotlivý úsek musí měřit maximálně 40 mm. Výsledná hodnota R_{z5} vychází z aritmetického průměru jednotlivých měření. Při měření průměru výšky profilu musí být použit vhodný přístroj s velkou citlivostí na měření drsnosti povrchu. [33]

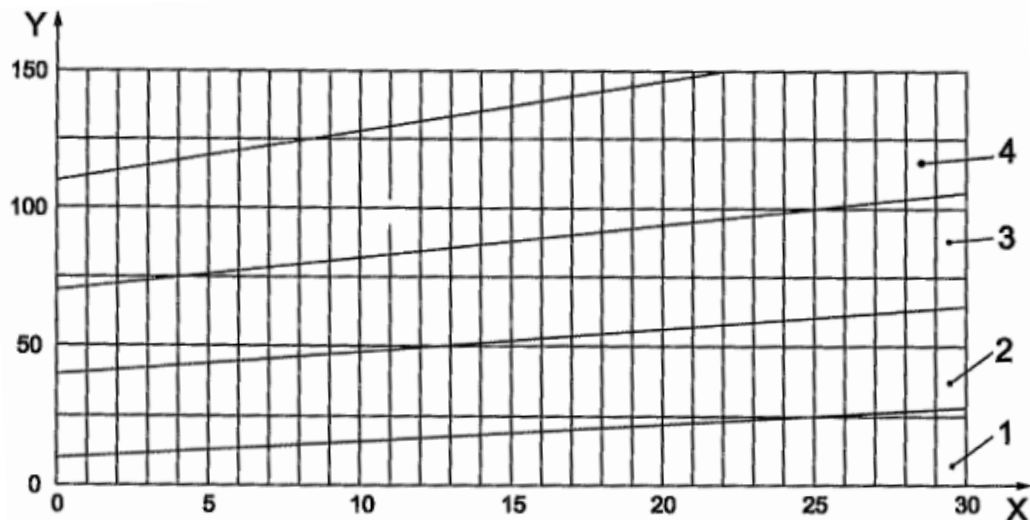


Z_{t1} až z_{t5} – charakterizuje jednotlivé prvky profilu
 l_n – celková délka
 l_r – základní délka (1/5) z l_n

Obrázek 22: Průměrná výška prvků profilu [33]

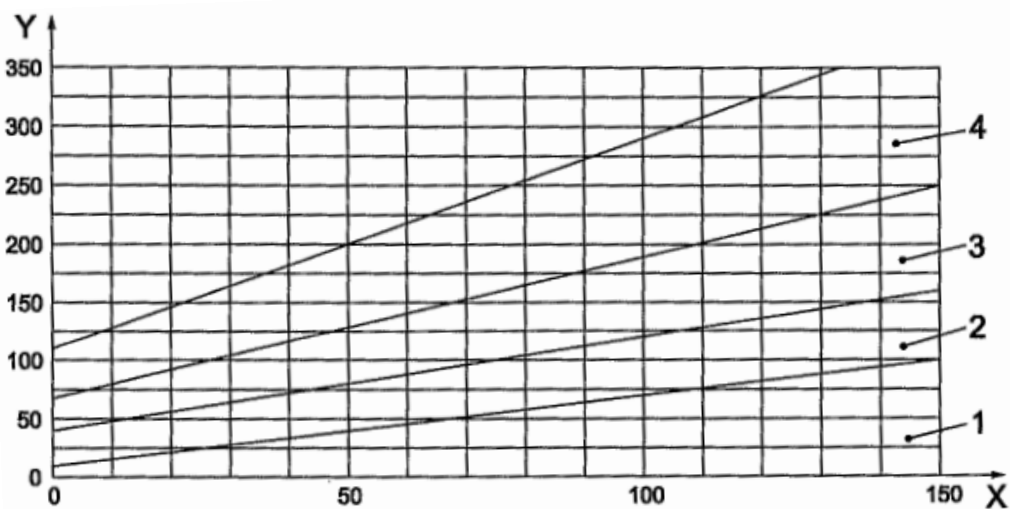
Tabulka 9: Toleranční pole pro průměrnou výšku prvků profilu $Rz5$ [34]

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 23: Průměrná výška prvků profilu, Rz5 – tloušťka zpracovávaného kusu 30mm [34]

1 až 4	4 toleranční pole (viz tabulka 9)
X	řezná tloušťka „a“ [mm]
Y	průměrná výška prvků profilu, Rz5



Obrázek 24: Průměrná výška prvků profilu, Rz5 – tloušťka zpracovávaného kusu 150mm [34]

1 až 4	4 toleranční pole (viz tabulka 9)
X	řezná tloušťka „a“ [mm]
Y	průměrná výška prvků profilu, Rz5

4.4.1.1 Drsnost

Definice drsnosti podle normy ČSN EN ISO 4287 (*Geometrické požadavky na výroby (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Termíny, definice a parametry struktury povrchu*), která popisuje termíny, definice a parametry povrchu zní: „Drsnost

je souhrn nerovností povrchu s relativně malou vzdáleností, které nevyhnutelně vznikají při výrobě nebo jejím vlivem. Tedy drsnost definuje povrchové výškové rozdíly.“

Drsnost můžeme rozdělit do dvou kategorií na makrostrukturu, která popisuje odchylky tvaru a polohy a na mikrostrukturu, která popisuje povrchové zvlnění a drsnost. Vliv na drsnost má mnoho aspektů. Při obrábění to může být tuhost stroje, opotřebení nástroje a jeho parametry jako jsou úhel čela, úhel sklonu, úhel záběru apod. Zároveň ve velké míře záleží i na nastavení řezných podmínek. [35]

U TD plazmou mají největší vliv na kvalitu řezu, tedy zároveň i na drsnost, procesní parametry řezání - proud, napětí a řezná rychlost. Dalšími vedlejšími faktory ovlivňující kvalitu řezu jsou: volba plazmového plynu, ochranné médium, průměr trysky a opotřebení jednotlivých dílů hořáku. V neposlední řadě hraje významnou roli i vzdálenost hořáku od řezaného materiálu. [35], [36]

K vyhodnocení drsnosti povrchu nám slouží základní parametry R_a , R_q a R_{z5} .

- R_a - střední aritmetická odchylka, tedy průměrná hodnota z absolutních hodnot v jedné změřené délce.
- R_q - průměrná kvadratická úchylka profilu v rozsahu základní délky.
- R_z - největší výška profilu drsnosti v dané oblasti.
- R_{z5} - je střední hodnota vzdáleností mezi 5 nejvyššími a 5 nejnižšími body profilu. [41]

Parametr R_a se často využívá při měření dokončeného povrchu. Je vhodným parametrem pro řízení a regulaci výrobního procesu. Samotná hodnota R_a neříká nic o charakteristice povrchu, poněvadž parametr nerozlišuje mezi výstupky a prohlubněmi či jejich tvarem. Proto se častěji můžeme setkat s parametrem R_q , který je citlivější na výstupky a prohlubně kontrolovaného povrchu. Tento parametr zpravidla ukazuje vyšší hodnoty než R_a . [42]

Dalším častým parametrem je R_z , ten pracuje s nejvyšším a zároveň s nejnižším výstupkem. Tedy udává celkovou výšku profilu ve vyhodnocované délce „ l_n “. Hodnota R_{z5} je střední hodnota z 5 měřených hodnot R_z . [42]

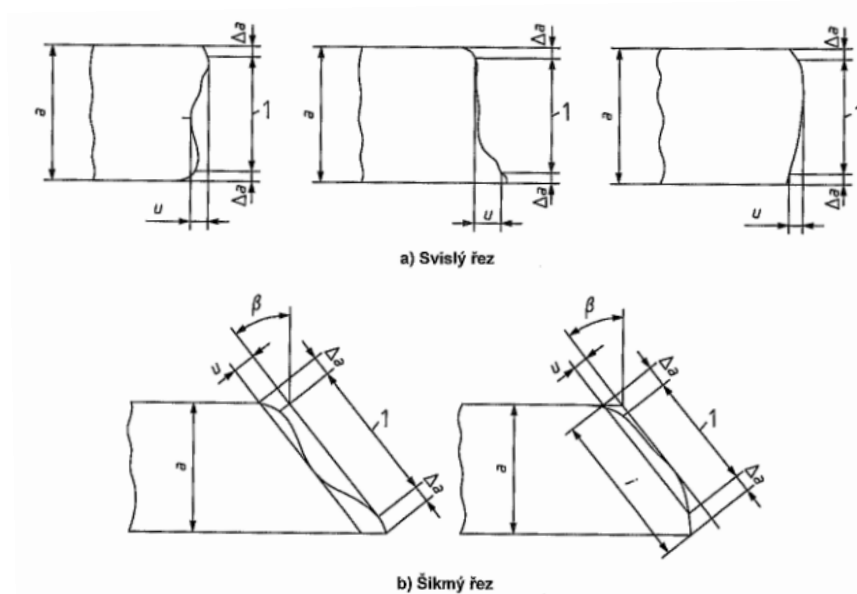
4.4.2 Úchylka kolmosti a úhlu

Úchylka kolmosti a úhlu se taktéž stanovuje podle normy ČSN EN ISO 9013. Během přípravy musí být měřené řezné hrany zbaveny otrěpů vzniklých při TP. Úchylka kolmosti se stanovuje na reprezentativním místě odhadované nejvyšší naměřené hodnoty přímého řezu. [33]

4.4.2.1 Kolmost

Tolerance „ u “ je vzdálenost mezi dvěma rovnoběžnými přímkami dotýkajícími se řezného povrchu, mezi které je vepsán profil povrchu řezu. Přímký svírají s povrchem řezaného materiálu určený úhel (tj. 90° v případě svislých řezů). [34]

Úchylka kolmosti nebo pravoúhlosti zahrnuje nejen úchylky kolmosti, ale také úchylky rovinnosti. Obrázek č. 25 ukazuje oblasti povrchu řezu, které je potřeba vzít v úvahu při měření úchylky kolmosti nebo odchylky tolerance, „ u “, která závisí na použitém procesu řezání. [34]



Obrázek 25: Úchylka kolmosti nebo úchylka úhlu [34]

1	vzdálenost pro výpočet oblasti určení úchylky kolmosti nebo úchylky úhlu
a	tloušťka zpracovaného kusu
Δa	zmenšení tloušťky řezu

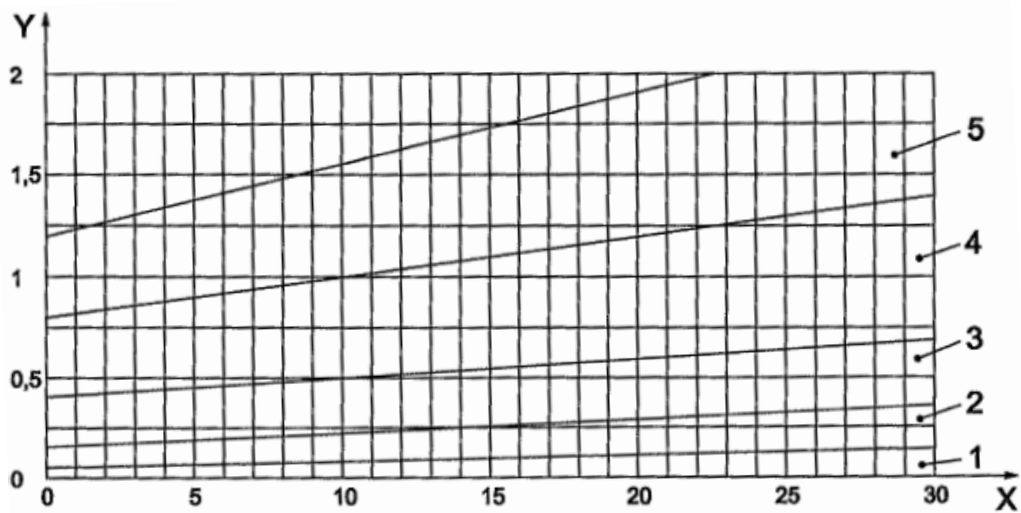
i	tloušťka řezu
u	úchylka kolmosti nebo úchylka úhlu
β	úhel řezu

Tabulka 10: Velikost parametru „ Δa “ pro různé tloušťky řezu [34]

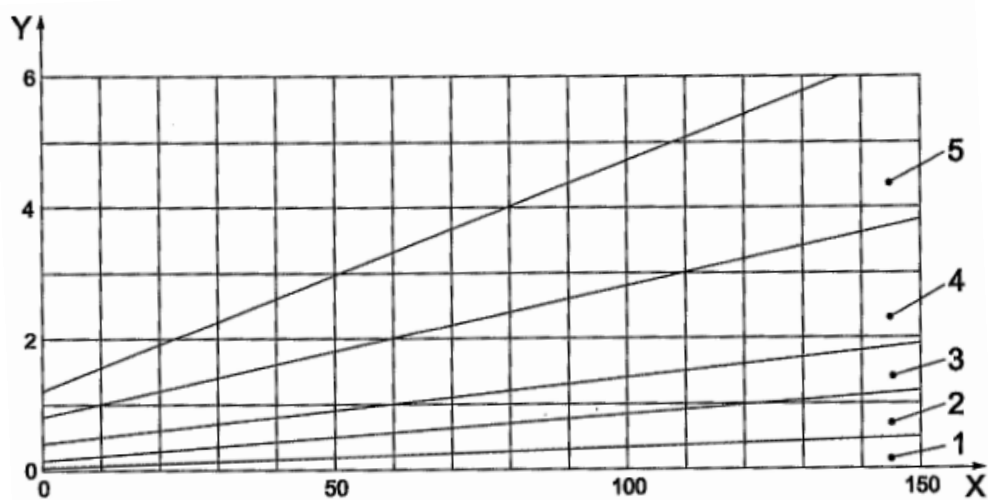
Tloušťka řezu, a [mm]	Δa [mm]
≤ 3	0,1a
$> 3 \leq 6$	0,3
$> 6 \leq 10$	0,6
$> 10 \leq 20$	1
$> 20 \leq 40$	1,5
$> 40 \leq 100$	2
$> 100 \leq 150$	3
$> 150 \leq 200$	5
$> 200 \leq 250$	8
$> 250 \leq 300$	10

Tabulka 11: Toleranční pole pro velikost úchytky kolmosti nebo úhlové úchytky „u“ [34]

Toleranční pole	Úchytky kolmosti nebo úhlová úchytky, 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 26: Úchylka kolmosti nebo úchylka úhlu, u (tloušťka zpracovávaného kusu do 30 mm) [34]

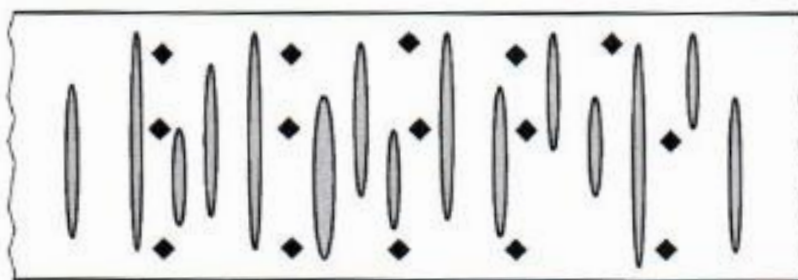


Obrázek 27: Úchylka kolmosti nebo úchylka úhlu, u (tloušťka zpracovávaného kusu do 150 mm) [34]

1 až 5	5 toleranční pole (viz tabulka 11)
X	řezná tloušťka „a“ [mm]
Y	úchylka kolmosti nebo úchylka úhlu, „u“ [mm]

4.4.3 Zkouška tvrdosti

Zkouška tvrdosti na řezné hraně se provádí v souladu s normou ČSN EN ISO 6507-1 (*Kovové materiály - Zkouška tvrdosti podle Vickerse - Část 1: Zkušební metoda*). Vzorky musí být před zkouškou tvrdosti upraveny tak, aby byly rovné a abychom mohli dokonale proměřit řezné hrany. Správné rovinnosti docílíme tím, že vzorky budou broušeny kotoučem o zrnitosti 600 a to takovým způsobem, aby i po broušení zůstaly na povrchu některé rýhy po TD. Měření řezné hrany se provádí v celé výšce řezu, tzn. v blízkosti spodní i horní hrany, ale i uprostřed výšky vzorku viz obrázek č. 28.



Obrázek 28: Místa měření na broušeném páleném povrchu [33]

Tabulka 12: Počet a umístění měření tvrdosti [33]

Tloušťka plechu t (mm)	Měření tvrdosti
$t \leq 5$	5 - krát ve středu tloušťky plechu
$t > 5$	5 – krát v blízkosti horního okraje plechu 5 – krát v blízkosti dolního okraje plechu 5 – krát ve středu tloušťky plechu

Měření tvrdosti je jedna z nejčastějších zkoušek pro analýzu kvality materiálu a zároveň jeho vlastností. U měření tvrdosti jsou nejrozšířenější statické zkoušky, které spočívají v tom, že do zkoušeného materiálu je vtlačováno jiné těleso (tzv. indentor). Jednotlivé typy zkoušek tvrdosti se liší v podobě indentu a jeho zatížení, případně způsobem vyhodnocení vtisku. Máme 3 základní metody: [37]

- Podle Vickerse – vtlačované těleso je jehlan
- Podle Rockwella – vtlačované těleso je kužel
- Podle Brinella – vtlačované těleso je koule

V dalších kapitolách č. 4.4.3.1. - 4.4.3.3 budou důkladněji popsány tyto 3 metody.

4.4.3.1 Zkouška tvrdosti podle Vickerse

Zkouška tvrdosti podle Vickerse je jedna z nejvíce používaných zkoušek v praxi. Indentorem neboli tělesem, které se vtlačuje do zkušebnímu materiálu, je rovnostranný jehlan s vrcholovým úhlem 136° . Hloubka vtisku by měla odpovídat zhruba $1/7$ délky úhlopříčky. [37]

Zkouška tvrdosti podle Vickerse je předepsána normou ČSN EN ISO 6507-1.

Indentor se vtlačuje pod zatížením od 10 gramů, avšak nejčastěji se používá zatížení 0,5 – 1 kg, ale lze zatížit indentor až 50 kg.

Postup zkoušky:

- 1) Zkušební materiál se upne ve svěráku zkušebnímu stroje (tvrdoměru).
- 2) Poté se stolek s upevněným vzorkem přiblíží tak, až bude v okuláru mikroskopu ostře vidět povrch vzorku.
- 3) Posléze se vtiskne indentor do materiálu po dobu 12 vteřin, jak udává norma ČSN EN ISO 6507-1.
- 4) Následně se pomocí mikroskopu změří úhlopříčky vtisknutého obrazce.
- 5) Po naměření úhlopříček se vypočítá jejich průměrná hodnota a následně se dosadí do vzorce 1.1.

$$HV(Y) = 0,102 \frac{F}{S} = 0,102 \frac{2F \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)}{D^2} = 0,1891 \frac{F}{D^2} \quad (1.1)$$

HV	Tvrdoměr podle Vickerse
F	Zatěžovací síla; N
S	Obsah plochy vtisku; mm^2
D	Průměrná hodnota úhlopříček vtisku; mm
θ	Vrcholový úhel indentoru = 136°
Y	Hodnota zkušebnímu zatížení [kg]

4.4.3.2 Zkouška tvrdosti podle Rockwella

Při zkoušce dle Rockwella se vtiskává do zkušebního materiálu diamantový kužel nebo ocelová kulička. Měří se hloubka vtisku při zatížení F_0 a F_1 .

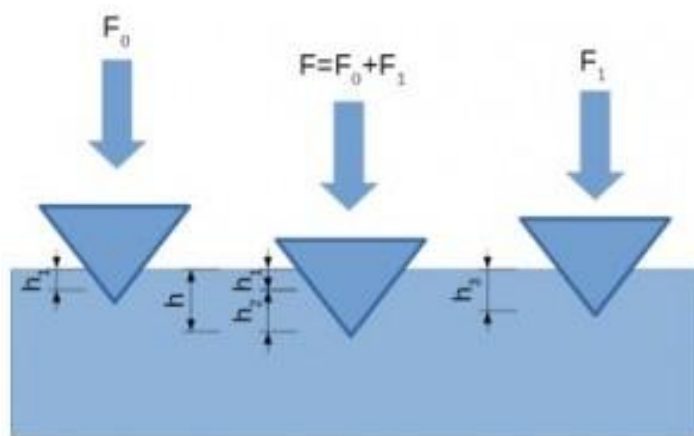
Tato zkouška je popsána normou ČSN EN ISO 6508-1 (*Kovové materiály - Zkouška tvrdosti podle Rockwella - Část 1: Zkušební metoda*)

Postup zkoušky:

- 1) Zkušební materiál se položí na stolek zkušebního stroje a pomalu se začne stolek přibližovat k indentoru.
- 2) Indentor se začne vtlačovat do materiálu až do té doby, než se na stupnici objeví zatížení „ F_0 “, v tu chvíli je hloubka vtisku rovna „ h_1 “.
- 3) Poté se zatížení zvýší o hodnotu „ F_1 “, tedy na F ($F=F_1+F_0$). Hloubka vtisku se zvýší o hodnotu „ h_2 “ na celkovou hloubku vtisku „ h “. Vznikne tak trvalá a pružná deformace v materiálu. Toto zatížení „ F “ se nechá danou dobu působit.
- 4) Následně se zatížení odlehčí na hodnotu zatížení „ F_1 “, v tu chvíli se sníží pružná deformace na minimum a indentor zůstane v hloubce „ h_3 “, ze které se následně vypočítá tvrdost dle Rockwella, podle vzorce (2.1): [37]

$$HR = E - h_3 \quad (2.1)$$

E	Konstanta závislá na druhu indentoru
h_3	Hloubka dosažena po částečném odlehčení indentoru



Obrázek 29: Zkouška tvrdosti podle Rockwella [37]

Tabulka 13: Druhy zkoušek [37]

Označení	Indentor	Zatížení (kg)			Závislost na druhu indentoru (E)	Využití
		předběžné (F ₀)	hlavní (F ₁)	celkové (F)		
A	diamantový kužel	10	50	60	100	20 HRA až 88 HRA
B	1/16" kulička	10	90	100	130	20 HRB až 100 HRB
C	diamantový kužel	10	140	150	100	20 HRC až 70 HRC
D	diamantový kužel	10	90	100	100	40 HRD až 77 HRD
E	1/18" kulička	10	90	100	130	70 HRE až 100 HRE
F	1/16" kulička	10	50	60	130	60 HRF až 100 HRF
G	1/16" kulička	10	140	150	130	30 HRG až 94 HRG
H	1/18" kulička	10	50	60	130	80 HRH až 100HRH
K	1/18" kulička	10	140	150	130	40 HRK až 100 HRK
15N	diamantový kužel	3	12	15	100	70 HR15N až 94 HR15N
30N	diamantový kužel	3	27	30	100	2 HR30N až 86 HR30N
45N	diamantový kužel	3	42	45	100	0 HR45N až 77 HR45N
15T	1/16" kulička	3	12	15	100	7 HR15T až 93 HR15T
30T	1/16" kulička	3	27	30	100	9 HR30T až 82 HR30T
45T	1/16" kulička	3	42	45	100	9 HR30T až 82 HR30T

Tabulka 14: Využití jednotlivých způsobů měření tvrdosti podle Rockwella [37]

HRA	Slinuté karbidy, tenké oceli a případně kalené oceli.
HRB	Slitiny mědi, měkké oceli, slitiny hliníku a tvárné litiny.
HRC	Oceli, tvrdé litiny, případně tvrzené oceli a jiné kovy tvrdší než 100 HRB.
HRD	Ocelové plechy a případně středně tvrzené oceli a perlitické temperované litiny.
HRE	Slitiny hliníku a hořčíku s dalšími kovy.
HRF	Žíhané měkké slitiny, tenké měkké plechy.
HRG	Fosfátové bronzy, slitiny mědi s beryliem, temperované litiny.
HRH	Velmi měkké kovy, plasty a jiné měkké materiály.

4.4.3.3 Zkouška tvrdosti podle Brinella

Další zkouškou tvrdosti je zkouška podle Brinella, která se také používá velmi často. U této zkoušky se zjišťuje, jaký vyvíjí odpor zkoušený materiál při vtlačování kuličky. Tato zkouška se používá spíše u měkčích, heterogenních materiálů s hrubou strukturou. U této zkoušky se měří průměr vtisku. [37]

Zkouška je předepsána normou ČSN EN ISO 6506-1 (*Zkouška tvrdosti podle Brinella - Část 1: Zkušební metoda*).

Výsledná pevnost materiálu se vypočítá ze vztahu (3.1):

$$R_m = k \cdot HB \quad (3.1)$$

R _m	Pevnost materiálu
k	Konstanta dle materiálu

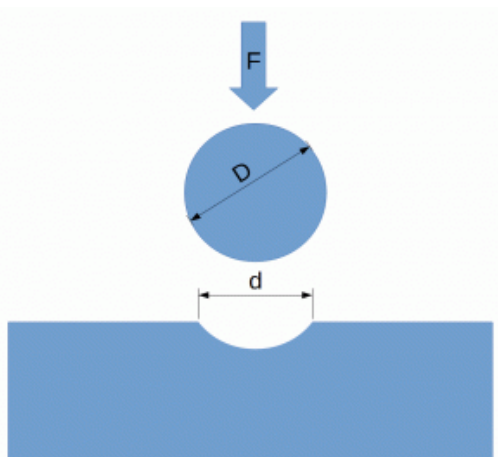
Tvrdość podle Brinella se spočítá dle vzorce (3.2):

$$HB = \frac{F}{S} \quad (3.2)$$

HB	Označení tvrdosti podle Brinella
S	Plocha vytvořeného důlku získaná v průměru vtisku
F	Zatěžovací síla (kp) při znalosti průměru vtlačované kuličky

Plocha S se získá ze vzorce (3.3):

$$S = \pi \cdot D \frac{D - \sqrt{D^2 - d^2}}{2} \quad (3.3)$$



Obrázek 30: Znázornění zkoušky dle Brinella [37]

4.5 Typy použitých plazmových hořáků

Pro experiment byly vybrány ocelové plechy (viz kapitola 4.3) o tloušťce 10 mm, a k tomu byly vybrány 3 sestavy řezacích hořáků tak, aby vybraná tloušťka plechu byla určena pro jejich pracovní rozsah. To odpovídalo hořákům pro proudové zatížení 60 A, 130A a 280A (viz tabulka 15). Byly tedy zvoleny výkonové sestavy, které jsou pro zvolenou řezanou tloušťku na horní, resp. spodní hranici doporučeného rozsahu řezaných tlouštěk, příp. v jeho středu. Cílem DP bylo porovnání, zda se volba výkonové sestavy řezacího hořáku výrazněji promítne na kvalitě řezu.

Jak bude vidět v následujících třech kapitolách (4.5.1 až 4.5.3), kde jsou důkladněji popsány použité sestavy hořáků, včetně výpisu jednotlivých komponent, ze kterých byly hořáky složeny. Je běžné, že několik komponent se může shodovat pro několik výkonových sestav. Nejčastěji se mění katoda, tryska a krytka vířivého plynu. Katoda, zejména proto, aby zvládla proudové zatížení, které přísluší daným hořákům, a tryska s krytkou, jelikož v sobě mají otvory právě pro průchod ionizovaného plynu, tedy plazmatu.








Tabulka 15: Seznam vybraných hořáků

Maximální řezací proud	Rozsah řezaných tlouštěk [mm]
60	4 - 10
130	6 - 20
280	6 - 35

4.5.1 Sestava hořáku – 60 A

Výkonová sestava, resp. hořák o řezném proudu 60A byl vybrán z důvodu, že jeho rozsah použitelnosti je od 6 - 10 mm. Tedy vybraná tloušťka plechu 10 mm je právě v jeho nejvyšší horní hranici použitelnosti.






Tabulka 16: Seznam komponent pro 60A sestavu hořáku

Tloušťka [mm]	Řezací proud [A]	Chladicí trubka	Katoda	Vedení plynu	Tryska	Krytka trysky	Krytka vířivého plynu	Ochranná krytka
								
4 - 10	60	G902Y.11.852 .201.142	G011Y.11.8 48.231.320	G101C.11.8 48.221.145 C	G2008Y.1 1.848.22 1.408	G3028.11.848 .201.1628	G4020.11.848 .201.1520	G502.11.852. 201.081

4.5.2 Sestava hořáku – 130 A

Druhá výkonová sestava hořáku byla vybrána pro řezací proud 130A proto, aby se řezaná tloušťka 10 mm pohybovala cca uprostřed rozsahu použitelnosti, který je zde 6 - 20 mm. Samotný hořák je stejný, ale oproti předchozí sestavě se liší příslušenstvím: katoda, tryska a krytka vířivého proudu (viz tabulka 17).

Tabulka 17: Seznam komponent pro 130A sestavu hořáku








Tloušťka [mm]	Řezací proud [A]	Chladicí trubka	Katoda	Vedení plynu	Tryska	Krytka trysky	Krytka vířivého plynu	Ochranná krytka
								
4 - 15	90	G902Y.11.852 .201.142	G015Y.11.8 48.231.350	G101C.11.8 48.221.145 C	G2010Y.1 1.848.22 1.410	G3028.11.848 .201.1628	G4020.11.848 .201.1530	G502.11.852. 201.081
6 - 20	130				G2012Y.1 1.848.22 1.412			
12 - 25	160				G2014Y.1 1.848.22 1.414			

4.5.3 Sestava hořáku – 280 A

Třetí vybraná výkonová sestava hořáku je určena pro řezací proud 280A. Použitou tloušťku řezaného plechu (10 mm) má ve spodní části rozsahu použitelnosti (6-35 mm).

V tomto případě je taktéž hořák stejný, ale opět se liší vůči 130A sestavě v některém příslušenství - katodě, trysce, dále krytce trysky a taktéž krytce vířivého plynu (viz tabulka 18).

Tabulka 18: Seznam komponent pro 280A sestavu hořáku

Tloušťka [mm]	Řezací proud [A]	Chladicí trubka	Katoda	Vedení plynu	Tryska	Krytka trysky	Krytka vířivého plynu	Ochranná krytka
								
6 - 35	280	G902Y.11.852	G011Y.11.8	G101C.11.8	G2326Y.1	G3249.11.848	G4020.11.848	G502.11.852.
40 - 70		.201.142	48.401.310	48.221.145 C	1.848.42 1.426	.401.1649 G3219.11.848 .401.1619		

5 Vyhodnocení experimentu

Tato část diplomové práce se bude zabývat vyhodnocením zkoušek řezných hran podle normy ČSN EN 1090-2, ale také hodnocením a porovnáním velikosti tepelně ovlivněné oblasti řezných hran při použití vybraných výkonových sestav hořáků.

Jako první vyhodnocovací zkouška bylo realizováno měření drsnosti povrchu na řezné hraně B (viz obrázek č. 20). Poté byly pomocí metalografické pily nařezány vzorky pro metalografický výbrus makrostruktury. Na těchto vzorcích byla změřena tepelně ovlivněná oblast a zároveň se změřila úchylka kolmosti a úhlu. Jako poslední část vyhodnocení kvality řezu bylo provedeno měření tvrdosti na řezané hraně A i B pro vyhodnocení změny mechanických vlastností vlivem řezacího procesu.

Pro přehlednost a srozumitelnost byly odebrané zkušební vzorky očíslovány a označeny v souladu s označením měřených hran na normalizovaných zkušebních vzorcích řezů – viz tabulka č. 19. Řezné parametry byly voleny dle doporučení výrobce plazmového zdroje.

Tabulka 19: Označení vzorků pro vyhodnocovací zkoušky

Označení	Materiál	Rychlost řezání [m/min]	Řezný proud	Měřená hrana
1A	S 235	4,7	280 A	A
1B	S 235	4,7	280 A	B
2A	S 235	3,4	130 A	A
2B	S 235	3,4	130 A	B
3A	S 235	1,8	60 A	A
3B	S 235	1,8	60 A	B
4A	Hardox 450	4,7	280 A	A
4B	Hardox 450	4,7	280 A	B
5A	Hardox 450	3,4	130 A	A
5B	Hardox 450	3,4	130 A	B
6A	Hardox 450	1,8	60 A	A
6B	Hardox 450	1,8	60 A	B

5.1 Měření drsnosti řezu - průměrná výška prvků profilu R_{z5}

V první části experimentu byla změřena drsnost řezných hran v souladu s normou ČSN EN 1090-2 – tzn. na lineárním řezu hrany B (obr. č. 20). Pro lepší přesnost a vypovídající hodnotu bylo měření opakováno 5x (bylo tedy získáno 5 hodnot R_{z5} pro každý vzorek). Pro měření byl použit ruční přenosný drsnoměr s označením Mitutoyo SJ-210 (viz obrázek 31). Drsnoměr zároveň měřil hodnoty R_a a R_q , které jsou také uvedeny v tabulce č. 20.



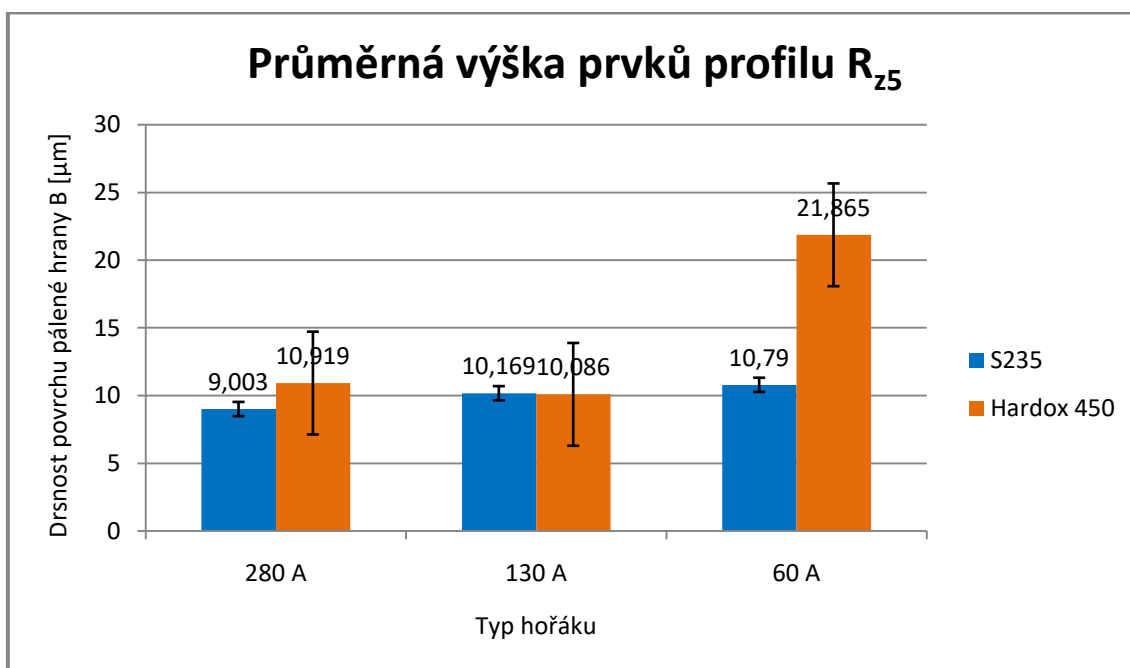
Obrázek 31: Drsnoměr Mitutoyo SJ-210

Měřicí zařízení hodnotu R_{z5} vyhodnocuje pomocí diamantového hrotu o poloměru snímacího hrotu 2 μm . Délka měřeného rozsahu byla 16mm.

V tabulce č. 20 jsou uvedeny průměrné hodnoty měřených parametrů. Všechny jednotlivé naměřené hodnoty jsou uvedeny v příloze 3.

Tabulka 20: Průměrné naměřené hodnoty R_{z5} , R_a , R_q

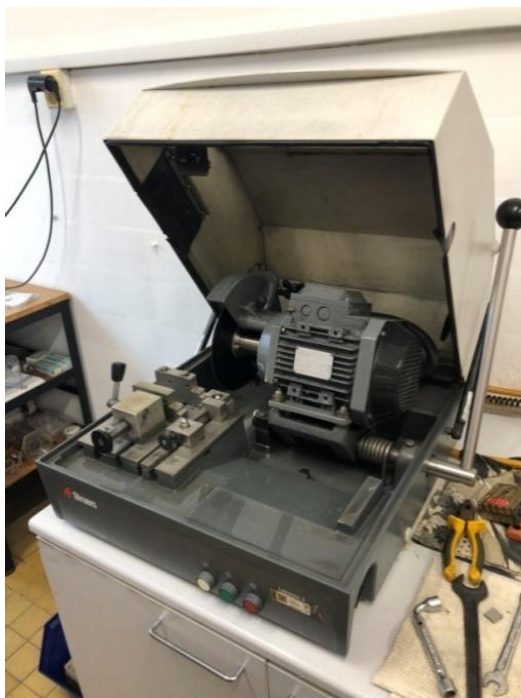
Měření	Průměrná hodnota R_{z5} [μm]	Průměrná hodnota R_a [μm]	Průměrná hodnota R_q [μm]
1B	9,003	2,111	2,544
2B	10,169	2,368	2,741
3B	10,790	2,263	2,665
4B	10,919	2,038	2,409
5B	10,086	1,851	2,550
6B	21,865	1,705	5,499



Obrázek 32: Graf průměrné výšky prvků profilu R_{z5}

5.2 Metalografická analýza

V další části experimentu bylo nejprve nutné vyrobit vzorky pro metalografickou analýzu. Na pásové pile byly ze základního vzorku řezu uříznuty takové části, aby obsahovaly obě měřené hrany (A a B). Z každého vzorku řezu obou materiálů a daném řezném proudu byly tedy odebrány dvě zkušební tělesa řezných hran A a B. Ty byly následně zalisovány do lisovací hmoty.



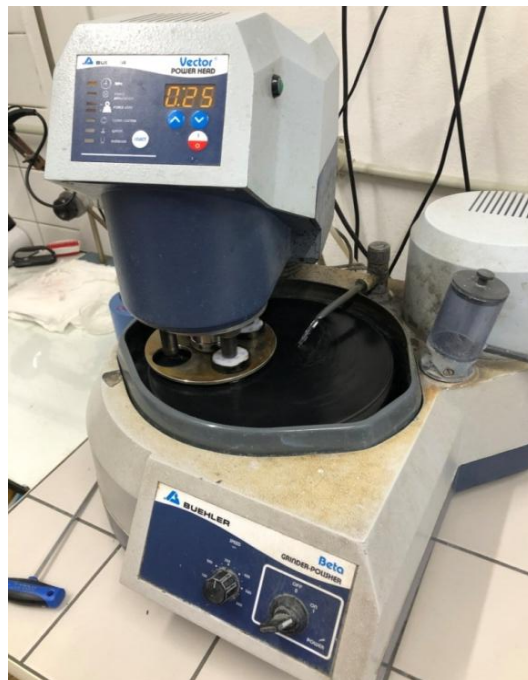
Obrázek 33: Metalografická pila Labotom 3



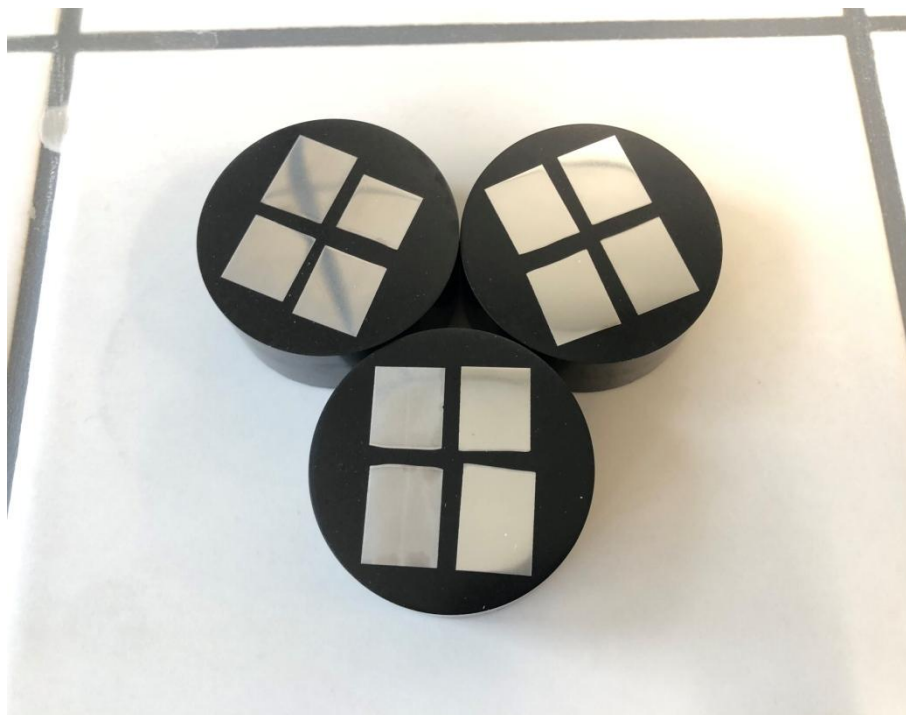
Obrázek 34: Zalévací zařízení Strues CitoPress 10

Následovalo broušení odebraných zkušebních vzorků, které se skládalo ze 3 částí. V první fázi bylo realizováno broušení za pomoci brusného papíru SiC180, poté brusného papíru 1200 a nejjemnější broušení bylo provedeno papírem 2000. Všechny tyto kroky probíhaly následujícími parametry broušení: rychlost otáčení brusného papíru 300 ot/min po dobu 60 vteřin, se zatížením 30N (s jednotlivým přitlakem každého vzorku). Vzorky byly broušeny pomocí automatické hlavy, kdy se pohybovaly kontra rotačním pohybem oproti brusné části. Celé broušení bylo prováděno s přívodem vody. Po broušení následovalo leštění ve dvou fázích, nejprve bylo použito leštící plátno 1 μm s přidavkem leštící emulze diamantu 1 μm a smáčedla. Zatížení vzorků bylo stejné jako u broušení (tzn. 30N/vzorek). Při leštění byl pohyb rotace vzorků a leštícího plátna taktéž kontra, otáčky byly sníženy na 150 ot/min bez přívodu vody. Doba leštění byla nastavena na 3,5 minuty. Poté následovala druhá fáze leštění

pomocí leštícího plátna Master Prep, tedy plátna s emulzí (Al_2O_3) bez vody, drsnost této emulze byla $0,05 \mu\text{m}$, 150 ot/min a taktéž rotace kontra. Pro lepší zvýraznění tepelně ovlivněné oblasti byly vyleštěné vzorky naleptány leptadlem Nital 2%. Uvedený postup přípravy metalografických vzorků probíhal na brusce/leštičce Buehler Grinder-Polisher Beta s automatickou hlavou Vector (viz obr. 35).



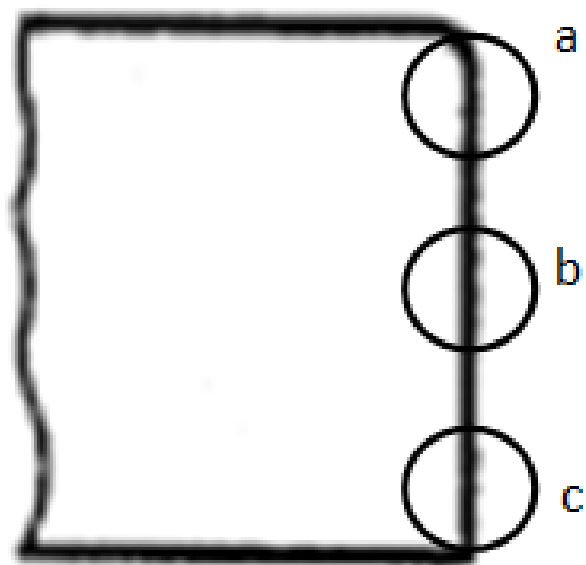
Obrázek 35: Bruska/leštička Beuhler Grinder-Polisher Beta



Obrázek 36: Metalografické vzorky po naleptání

5.3 Měření velikosti tepelně ovlivněné oblasti

Po výrobě metalografických vzorků následovalo vyhodnocení velikosti tepelně ovlivněných oblastí vzniklých na řezných hranách po řezání plazmatem. Celé měření bylo provedeno na mikroskopu Carl Zeiss Observer Axio D1M v sw Zen. Po zvoleném, 200 násobném zvětšení, bylo zjištěno, že se velikost tepelně ovlivněné oblasti v různých výškách řezné hrany liší. Proto bylo měření TOO rozděleno do 3 míst. V horní části řezu (a), tedy nejbližší plazmovému hořáku (přibližně 1mm pod povrchem), uprostřed řezané hrany (b) a ve spodní části řezu (c), jak je vidět na obrázku 37.

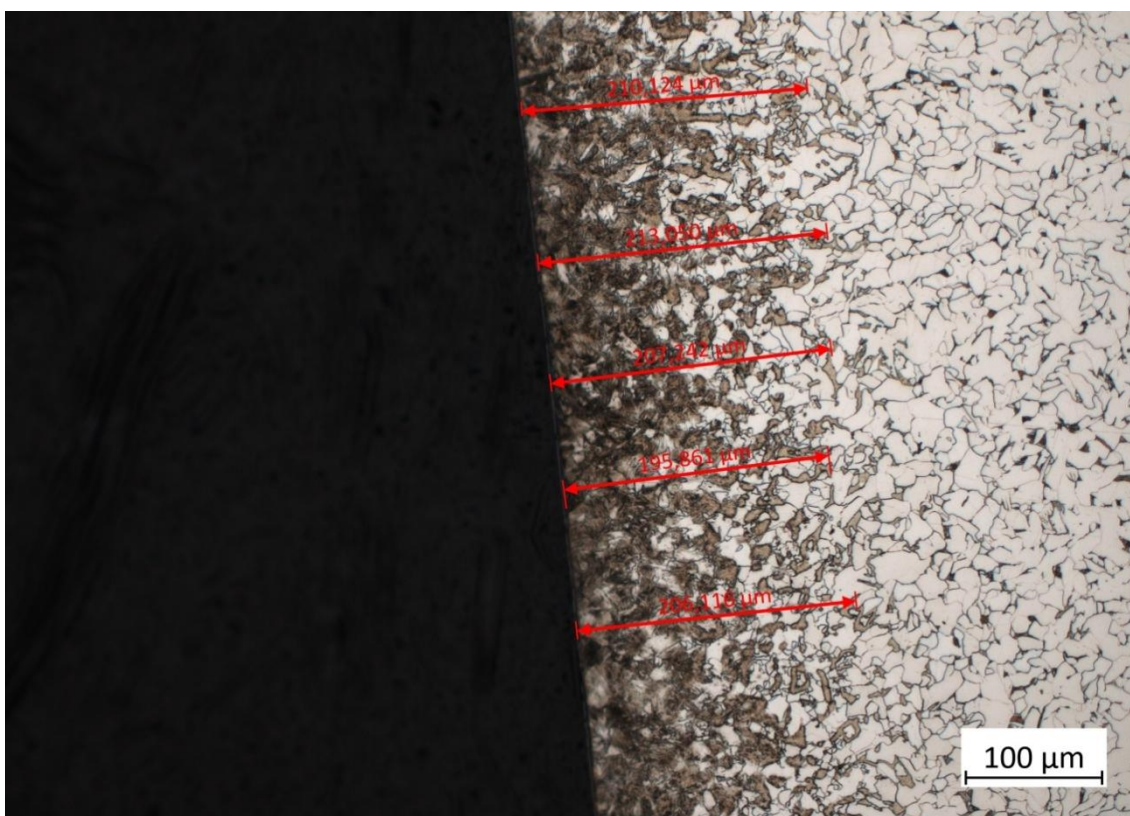


Obrázek 37: Zvolená místa pro měření velikosti tepelně ovlivněné oblasti

Ve všech místech „a“, „b“ i „c“ bylo provedeno 5 měření (viz obr. 38, 39, 40).



Obrázek 38: Měření tepelně ovlivněné oblasti u vzorku 1A v místě "a"

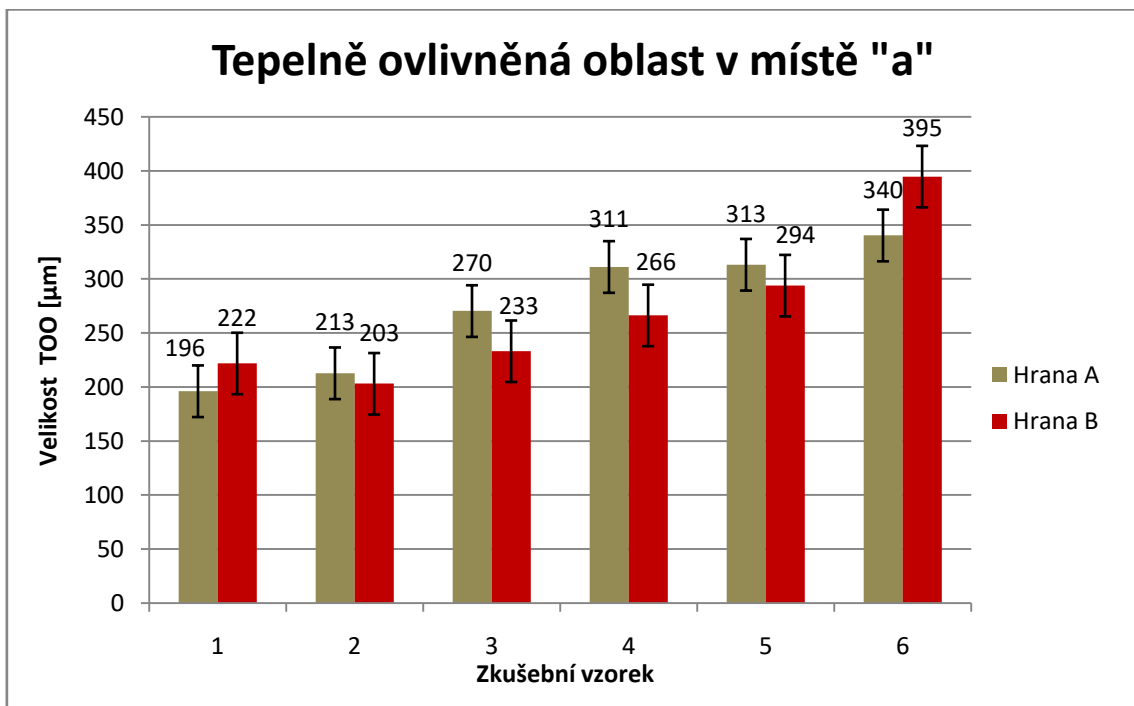


Obrázek 39: Měření tepelně ovlivněné oblasti u vzorku 1A v místě "b"

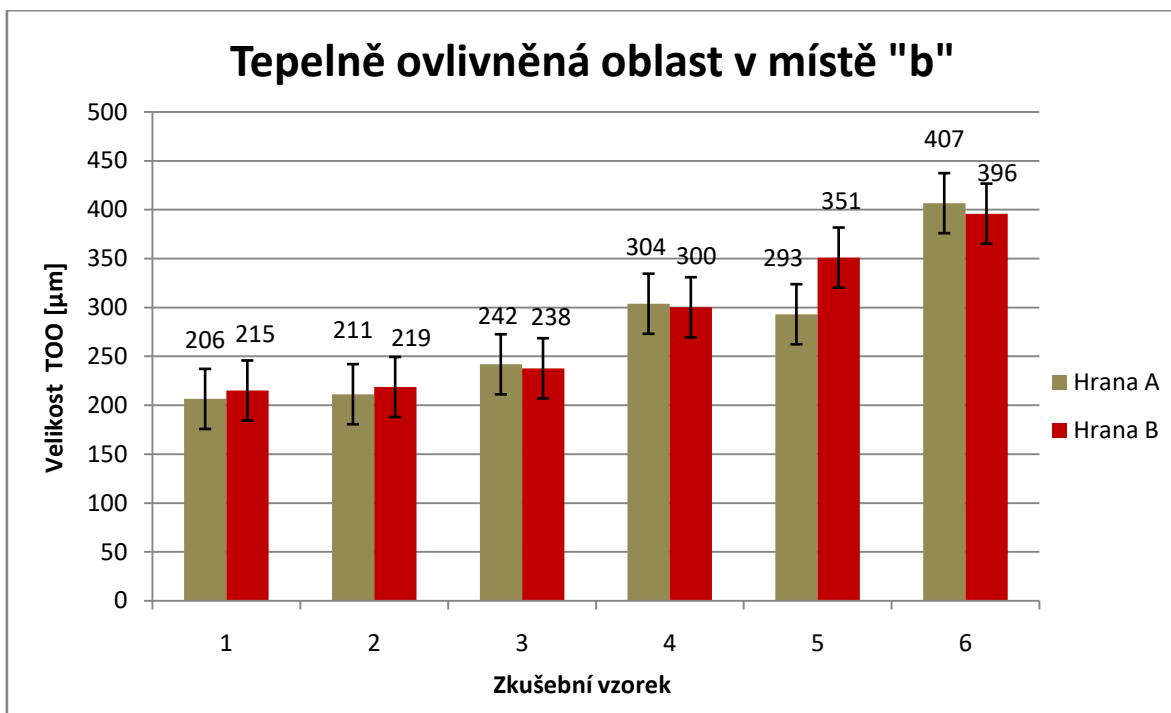


Obrázek 40: Měření tepelně ovlivněné oblasti u vzorku 1A v místě "c"

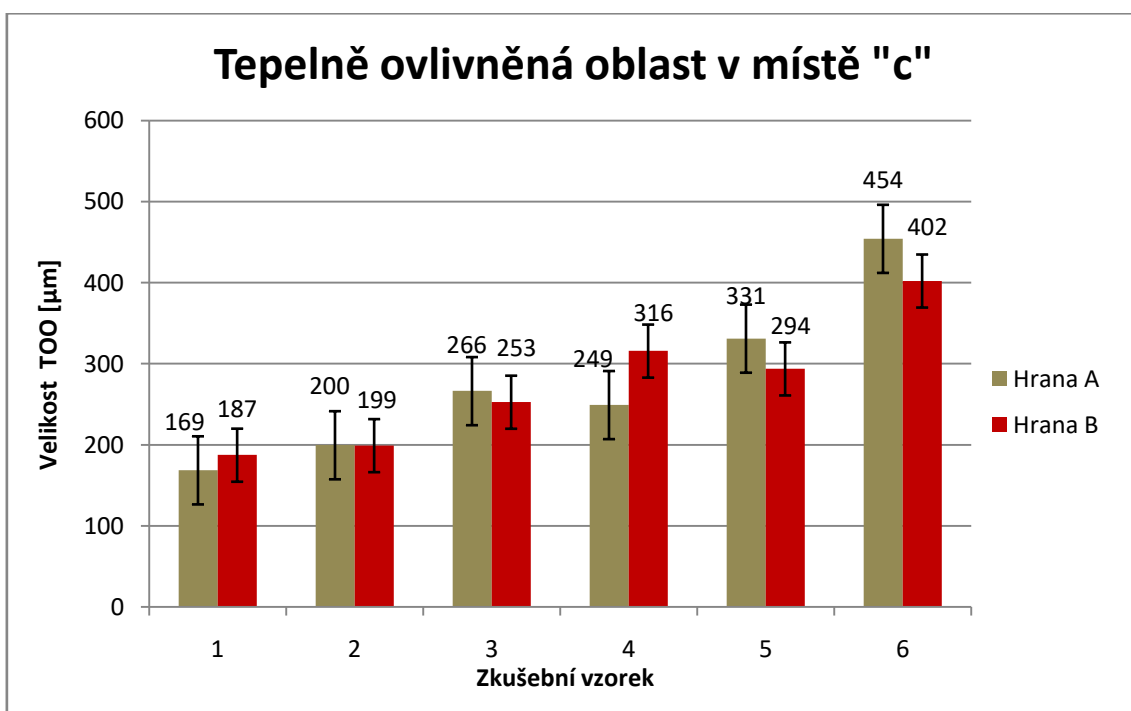
Z těchto pěti naměřených hodnot byly spočítány průměrné hodnoty v daném měřeném místě. Tyto hodnoty byly porovnány, viz obrázky č. 41, 42, 43.



Obrázek 41: Tepelně ovlivněná oblast v místě "a"



Obrázek 42: Tepelně ovlivněná oblast v místě "b"



Obrázek 43: Tepelně ovlivněná oblast v místě "c"

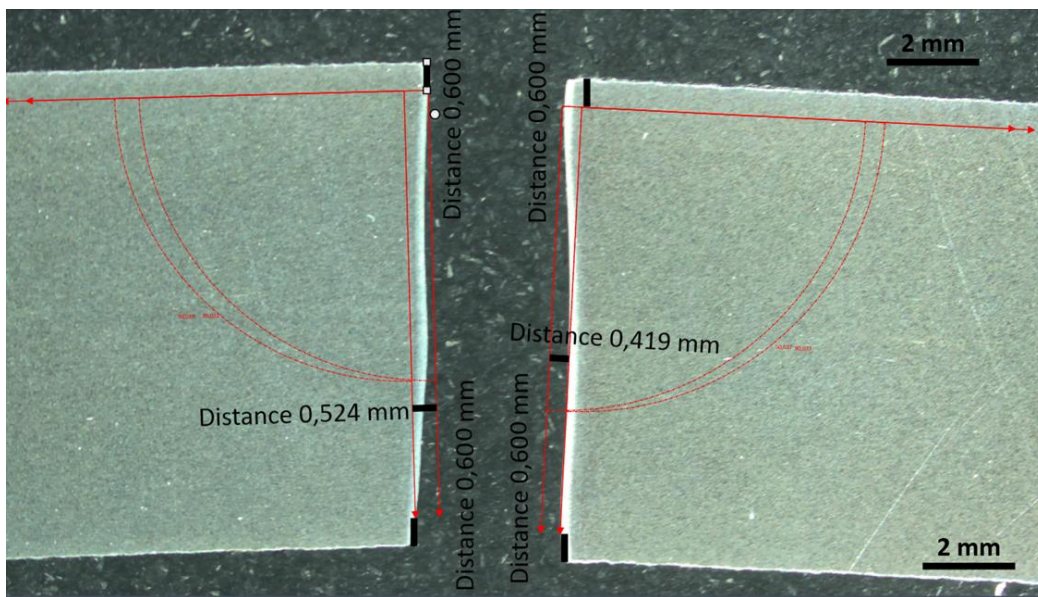
Tabulka 21: Porovnání velikosti tepelně ovlivněné oblasti na jednotlivých vzorcích

Vzorek	Průměrné velikost TOO na obou řezných hranách A a B [μm]		
	Místo „a“	Místo „b“	Místo „c“
1A (S235 – 280A)	196	206	169
1B (S235 – 280A)	222	215	187
2A (S235 – 130A)	213	211	200
2B (S235 – 130A)	203	219	199
3A (S235 – 60A)	270	242	266
3B (S235 – 60A)	233	238	253
4A (Hardox – 280A)	311	304	249
4B (Hardox – 280A)	266	300	316
5A (Hardox – 130A)	313	293	331
5B (Hardox – 130A)	294	351	294
6A (Hardox – 60A)	340	407	454
6B (Hardox – 60A)	395	396	402

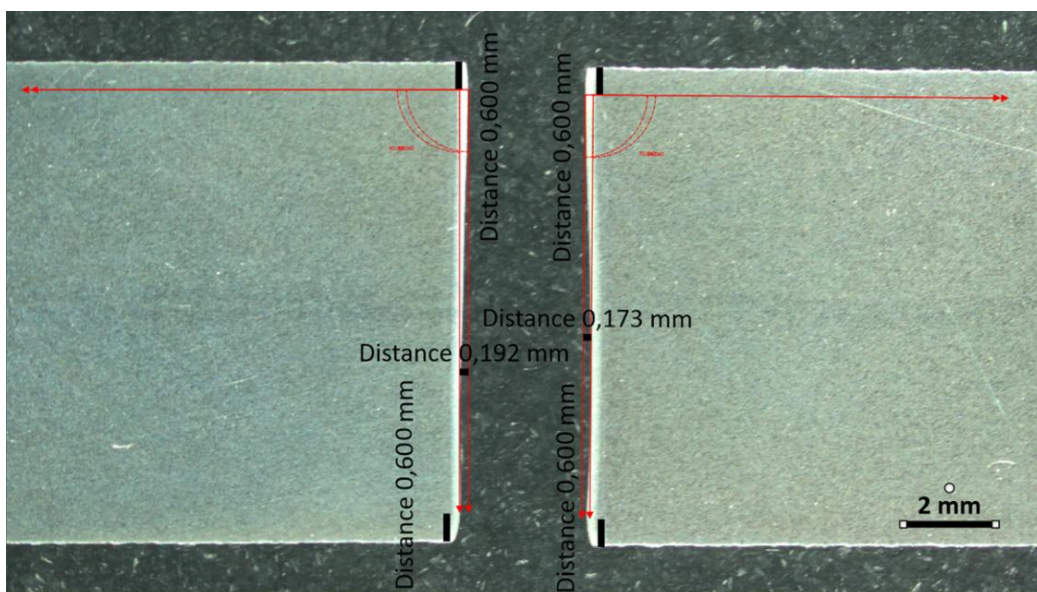
Pozn. Hodnoty TOO uvedené v tabulce 21, jsou spočítány jako průměrná hodnota z 5-ti měření (kompletní výsledky jsou uvedeny v příloze č. 4)

5.4 Měření úchylky kolmosti a úhlu

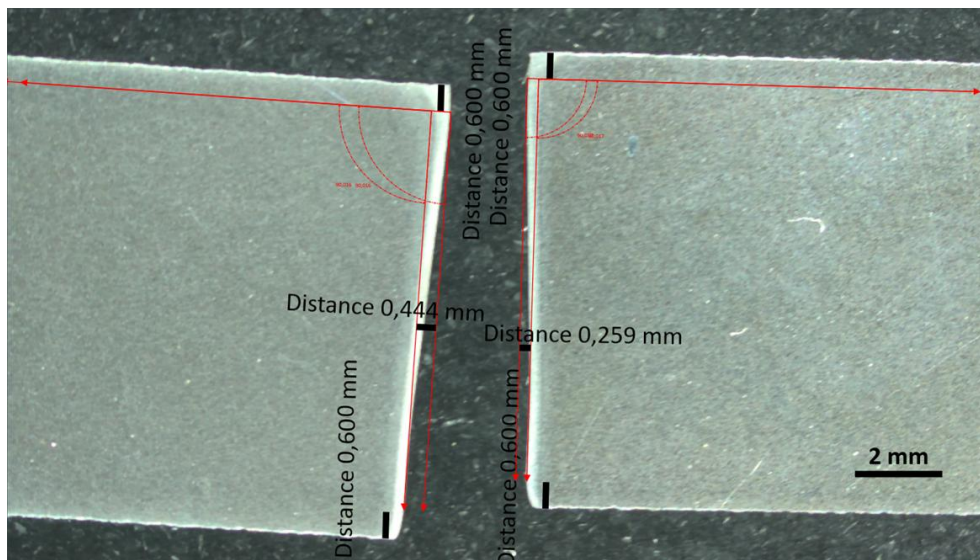
V další části experimentu bylo úkolem naměřit úchylku kolmosti, která se vyhodnocuje na svislém řezu. Měření bylo prováděno v souladu s normou ČSN EN ISO 9013. Úchylka kolmosti se stanovuje dle obrázku č. 24 a tabulky č. 10. Tato úchylka se měří v poli „1“, které se nachází posunuté o hodnotu „ Δa “ od obou hran vzorku. V našem případě to bylo 0,6 mm od hrany. Měření bylo prováděno na metalografických vzorcích pomocí makroskopu Zeiss Stemi 508 a programu Zen 3.0 (blue edition), tzn. elektronicky v počítači, jak je znázorněno na následujících obrázcích č. 44 až 49.



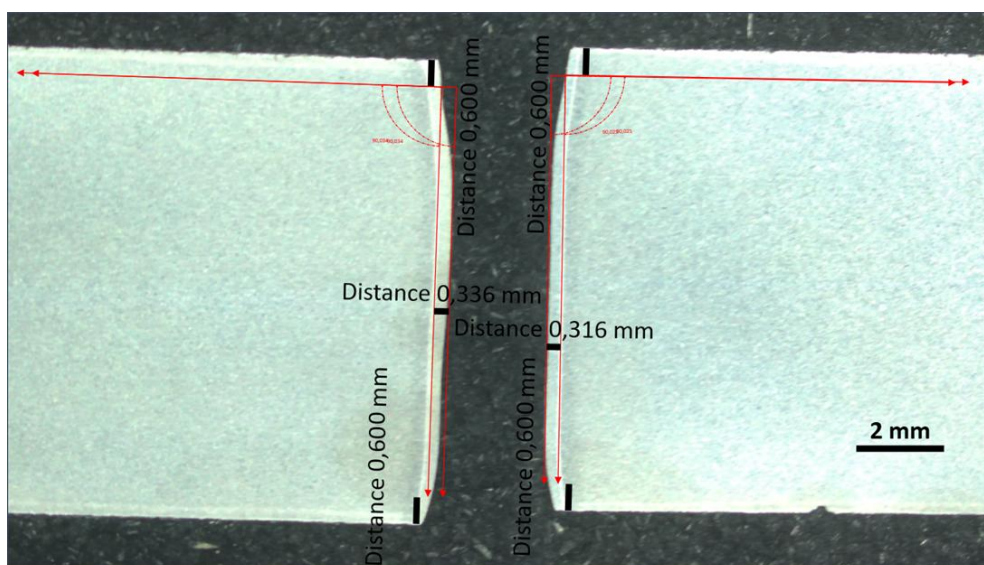
Obrázek 44: Úchylka kolmosti na vzorcích 1B vlevo - 1A vpravo



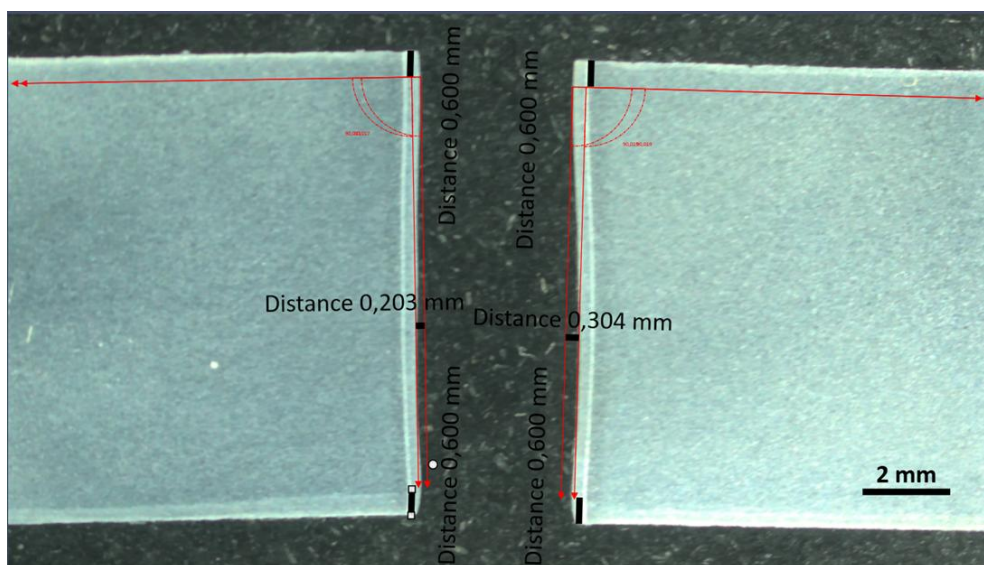
Obrázek 45: Úchylka kolmosti na vzorcích 2B vlevo - 2A vpravo



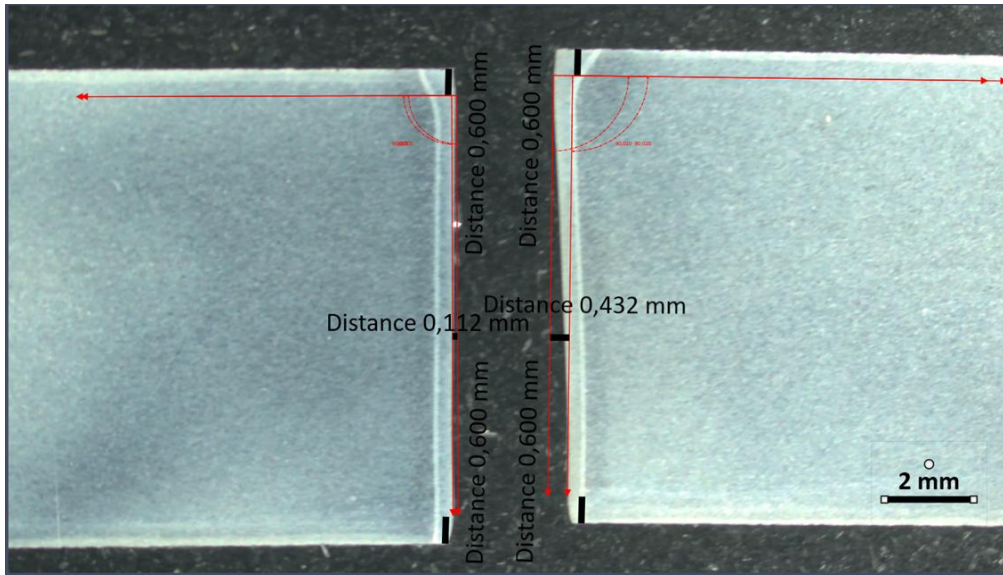
Obrázek 46: Úchylka kolmosti na vzorcích 3B vlevo - 3A vpravo



Obrázek 47: Úchylka kolmosti na vzorcích 4B vlevo - 4A vpravo



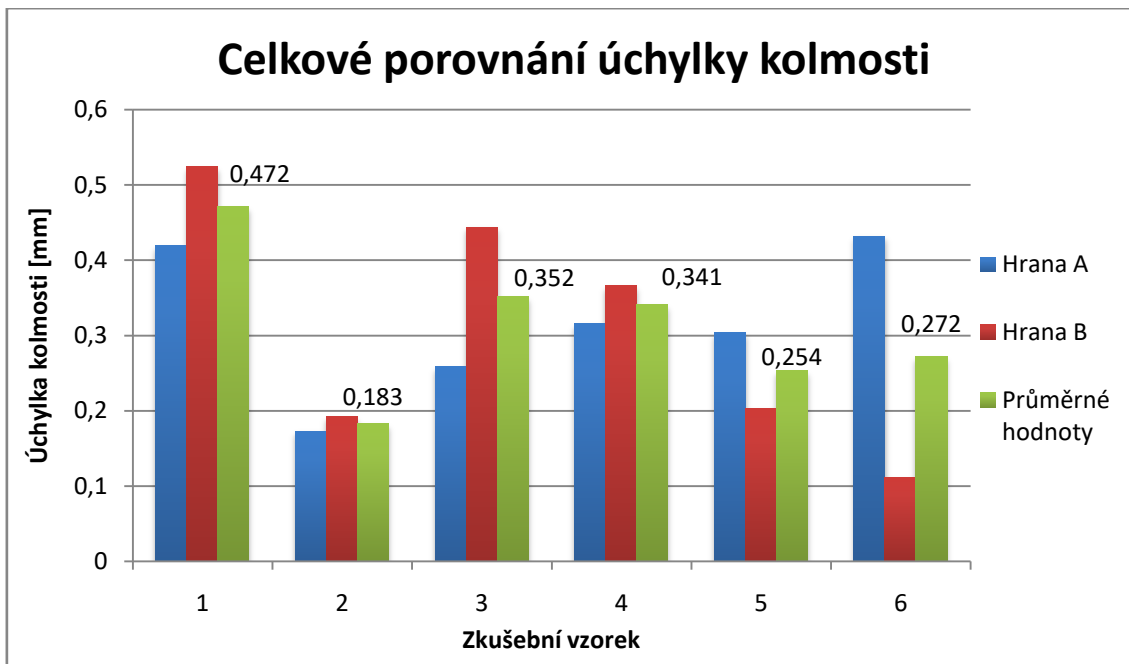
Obrázek 48: Úchylka kolmosti na vzorcích 5B vlevo - 5A vpravo



Obrázek 48: Úchylka kolmosti na vzorcích 6B vlevo - 6A vpravo

Tabulka 22: Naměřené úchylky kolmosti na svislém řezu

Vzorek	Úchylka kolmosti na svislém řezu [mm]	
	Hrana A	Hrana B
1	0,419	0,524
2	0,173	0,192
3	0,259	0,444
4	0,316	0,366
5	0,304	0,203
6	0,432	0,112



Obrázek 49: Graf celkové porovnání úchytky kolmosti

Jak je vidět z grafu na obrázku č. 50, úchytky kolmosti se poměrně liší, nejlépe vychází hodnota „u“ na vzorku č. 2, tedy na konstrukční oceli S235 s použitím sestavy hořáku 130A.

5.5 Měření tvrdosti řezných hran

V poslední části experimentu bylo třeba vyhodnotit tvrdost (podle Vickerse) řezných hran při použití jednotlivých sestav hořáků. Tvrdost se taktéž jako v předchozím měření zkoumala na obou měřených hranách A i B. Měření probíhalo v souladu s normou ČSN EN 1090-2 a taktéž s normou ČSN EN ISO 6507-1. Jak bylo uvedeno v kapitole 4.4.3 a také znázorněno na obrázku č. 28, včetně tabulky č. 12. Na každém vzorku bylo měřeno 15 vpichů (ve třech úrovních vzdáleností od hran). Tvrdost byla vyhodnocována metodou podle Vickerse na tvrdoměru Buehler IndentaMet 1104 (viz obrázek 51). Zatížení bylo 1kg po dobu 12 vteřin, tedy HV1.



Obrázek 50: Tvrdoměr Buehler IndentaMet 1104

Vzorky byly upraveny v souladu s přílohou D normy ČSN EN 1090. Řezné hrany byly zbrušeny brusným papírem se zrnitostí 600 tak, aby na povrchu hrany vznikly rovné plochy, kde je možné měřit tvrdost, ale zároveň, aby na hraně zůstaly rýhy po řezu (viz obr. 28).



Obrázek 51: Vybrúšené vzorky na zkoušku tvrdosti

Na obrázku č. 52 jsou vidět vzorky po broušení připravené na zkoušku tvrdosti. Z úpravy vzorků řezů je patrné, jak plazmový oblouk vytvořil téměř na všech vzorcích jinou strukturu povrchu.

Tvrdost se tedy vyhodnocovala na 15 místech (5x v blízkosti horního okraje plechu, 5x v blízkosti dolního okraje plechu a 5x ve středu tloušťky plechu).

Tabulka 23: Výsledné tvrdosti

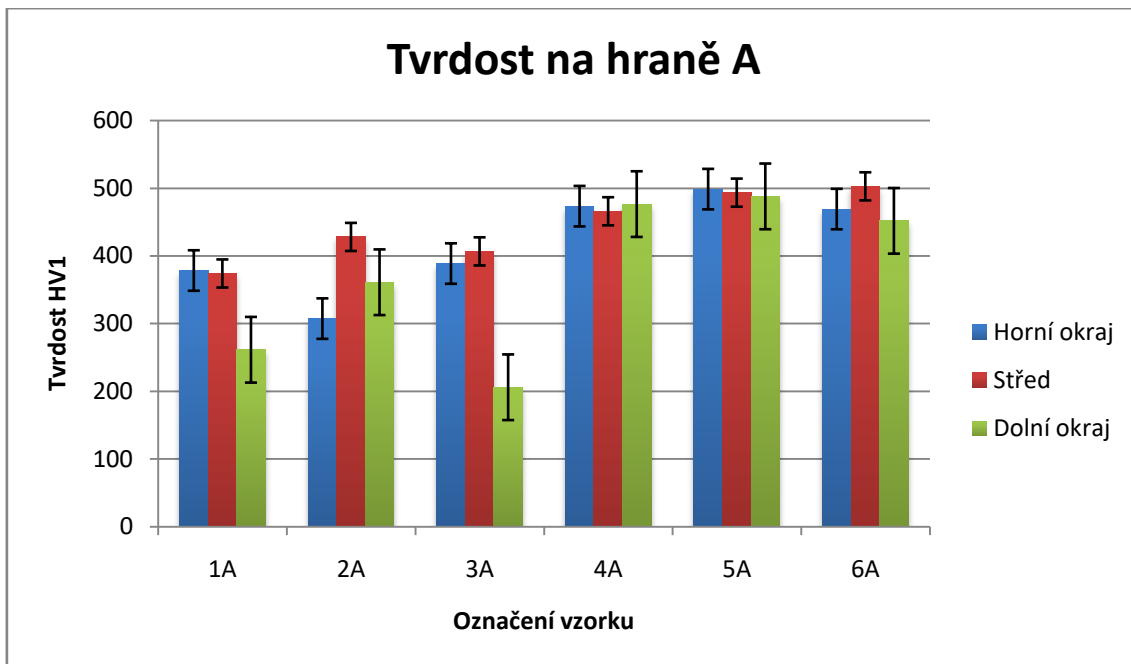
Vzorek	Tvrdost HV1			
	Horní okraj	Střed	Dolní okraj	Průměrná hodnota
1A	378	374	261	338
1B	409	416	385	403
2A	307	428	361	365
2B	437	427	432	432
3A	389	407	206	334
3B	387	410	350	382
4A	473	466	476	472
4B	490	469	469	476
5A	498	493	488	493
5B	506	486	466	486
6A	469	503	452	474
6B	475	500	459	478

Pozn. Hodnoty tvrdost HV1 uvedené v tabulce 23, v prvních třech sloupcích, jsou spočítány jako průměrná hodnota z 5-ti měření (kompletní výsledky jsou uvedeny v příloze č. 5)

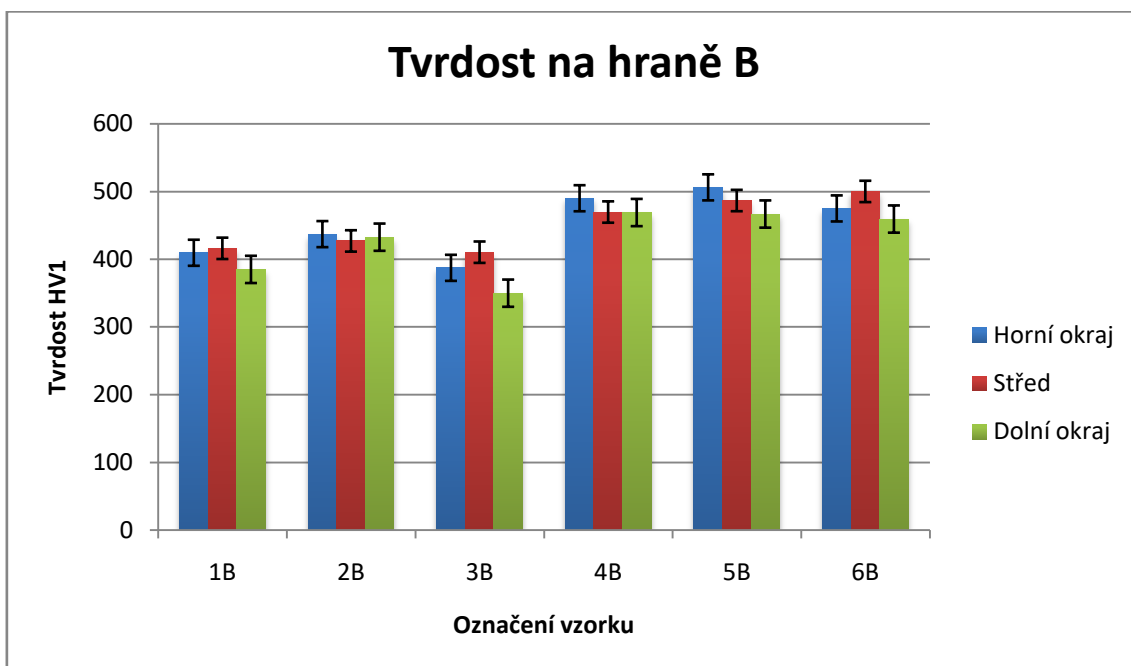
Tabulka 24: Tvrdost základního materiálu

Materiál	Průměrná tvrdost základního materiálu
S235	117
Hardox 450	451

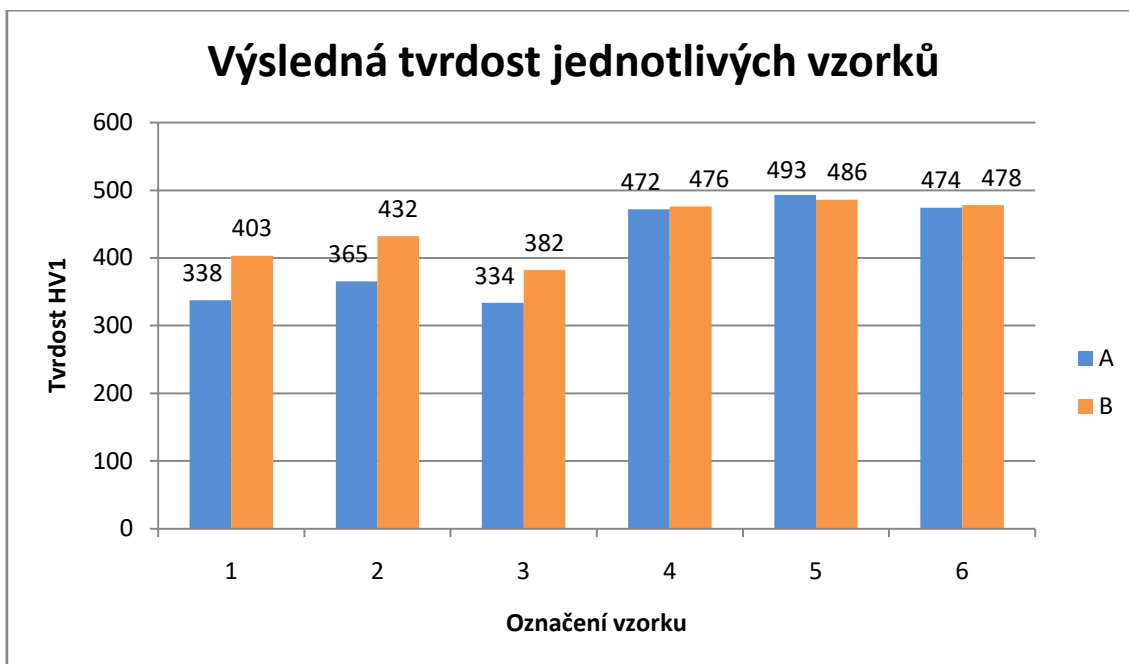
Pozn. Hodnoty tvrdost HV1 uvedené v tabulce 24, jsou průměrné hodnoty z 5 měření.



Obrázek 52: Graf tvrđosti na hraně A



Obrázek 53: Graf tvrđosti na hraně B



Obrázek 54: Graf výsledné tvrdosti jednotlivých vzorků

Pozn. Hodnoty výsledné tvrdosti HV1 uvedené v grafu na obrázku 55 jsou průměrné hodnoty ze všech tří míst měřených hran.

5.6 Vyhodnocení výsledků

V první části měření byla měřena drsnost řezané hrany „B“. Všechny průměrné hodnoty měření R_{z5} bez rozdílu materiálu a zvolené sestavy hořáku se pohybují v rozmezí hodnot 9,003 až 10,919 až na jednu výjimku - tedy vzorek 6B, kde hodnota R_{z5} je rovna 21,865. To mohlo být zapříčiněno špatným vyrováním řezaného plechu při plazmovém řezání a tím způsobených vibrací. Vyhodnocení probíhalo dle normy ČSN EN ISO 1090-2, tedy dle grafu na obrázku č. 23, kde se průměrné naměřené hodnoty R_{z5} vzorku 1B, 2B, 3B, 4B a 5B pohybují v tolerančním poli 1. Průměrná hodnota R_{z5} vzorku 6B se pohybuje v tolerančním poli 2.

Druhým parametrem, který byl dle téže normy vyhodnocován, byla úchylka kolmosti „u“. Naměřené hodnoty byly porovnány s tabulkou č. 11 a taktéž s grafem na obrázku č. 26. Při tomto porovnání většina měření spadá do tolerančního pole 3. Vzorek „dva“, tedy konstrukční ocel S235 řezaná 130A sestavou dopadl ze všech nejlépe. Hodnoty obou dvou měřených hran „A“ i „B“ se pohybují v tolerančním poli 2. Taktéž vzorek 5B a 6B se nachází v poli 2 a pouze jedna naměřená hodnota vzorku 1B se nachází v poli 4. Dle normy ČSN EN 1090-2 z roku 2019, která určuje třídy provedení dle tolerančního pole, spadají všechny vzorky do třídy EXC1, až na vzorek 1B, který spadá do třídy EXC3 a EXC4.

Jako třetí parametr byla dle normy ČSN EN ISO 1090-2 vyhodnocena tvrdost na řezné hraně a také byla měřena na obou hranách „A“ a „B“. Dle naměřených tvrdostí z celkového grafu na obrázku č. 55 lze vidět, že průměrná hodnota tvrdosti HV1 konstrukční oceli S235 je cca o 100 menší než u Hardoxu 450 a to při stejné sestavě hořáku a stejných řezných parametrech. V porovnání se základním materiálem se tvrdost řezané hrany Hardoxu 450 zvýšila o 6%, ale u oceli S235 se tvrdost na hraně „A“ zvýšila o 190% a na hraně „B“ o 240%. Hardox 450 se výrazně liší oproti „měkkým ocelím“, jelikož už od výroby má vysokou tvrdost. Nicméně je vidět, že plazmovým dělením se jeho tvrdost výrazně nezvyšuje, na rozdíl od konstrukční oceli S235, kde její tvrdost po tomto procesu velmi výrazně vzrostla.

Posledním měřeným parametrem byla velikost tepelně ovlivněné oblasti. Toto hodnocení bylo realizováno nad rámec požadavků normy ČSN EN ISO 1090-2, která ho

nevyžaduje. Bylo to ale provedeno pro porovnání tepelně ovlivněné oblasti. Jak je patrné z obr. 41, 42, 43 má Hardox 450 výrazně větší tepelně ovlivněnou oblast oproti konstrukční oceli S235. Při dané sestavě hořáků a stejných řezných parametrech se rozdíl ve velikosti TOO přibližně pohybuje kolem 100 μm . Rozdíly ve velikosti TOO na řezné hraně A a B jsou nahodilé a nevykazují žádný souvislý trend, což může být částečně zaviněno i lidským faktorem a také měřením v nepřesně stejné výšce daného měřeného místa.

6 Závěr

Cílem diplomové práce bylo seznámit se s metodami tepelného dělení. Dále bylo nutno navrhnout experiment, ve kterém se budou moci porovnat dva základní, snadno dostupné materiály (konstrukční ocel S235 a otěruvzdorná ocel Hardox 450). Porovnány byly dle normy ČSN EN ISO 1090 – 2, tedy dle tří parametrů, které tato norma hodnotí.

Naměřené hodnoty drsností R_{z5} byly zaznamenány do tabulky č. 20. Dle těchto hodnot lze jen těžko říci, která sestava hořáku pro oba řezané materiály je vhodnější, jelikož všechny hodnoty jsou si velmi podobné. Až na jeden vzorek 6B, jehož hodnota parametru R_{z5} je vůči ostatním dvojnásobná. Jak bylo v předešlé kapitole zmíněno, mohlo to být způsobené například vibracemi, ale je i možné, že opravdu sestava hořáku 60A pro Hardox 450 není vhodná. Pro toto tvrzení by bylo potřeba udělat více měření a více vzorků.

Ve výsledku samotná volba hořáku pro parametr drsnosti R_{z5} byla vyhodnocena tak, že na tento parametr nemá žádný vliv.

Z naměřených hodnot úchyly kolmosti „u“ je patrné, že nejlépe u obou materiálů vyšla sestava hořáku pro 130 A (tedy sestava, kde řezaná tloušťka byla ve středu doporučeného řezacího rozsahu). Přičemž u materiálu S235 a právě 130 A hořáku vyšly obě dvě hodnoty měřených hran velmi podobně. U druhého materiálu – Hardox 450 se při stejné sestavě hodnoty více liší, avšak u obou materiálů se průměrné hodnoty obou hran pohybují v tolerančním poli č. 2.

Z výše uvedených výsledků vyplývá, že výsledné doporučení pro dosažení nejmenší úchyly kolmosti „u“ je vybrat takovou sestavu plazmového hořáku, aby řezná tloušťka vybraného materiálu byla ve středu rozsahu daného hořáku.

Měření tvrdosti na řezných hranách ukázalo, že u konstrukční oceli S235 se tvrdost v různých výškách řezu poměrně dosti liší. Nejvyšší tvrdost má S235 uprostřed řezu a nejmenší ve spodní části. U materiálu Hardox 450 se pohybují hodnoty tvrdosti v celé výšce řezu podobně. Tvrdost se po řezání plazmou u oceli S235 výrazně zvětšila (cca o 220 - 280 HV1), oproti tomu u Hardoxu 450 se tvrdost řezné hrany pohybuje v rozmezí

běžné tvrdosti tohoto materiálu. Dle normy ČSN EN 1090-2 z roku 2012 jsou tvrdosti u ocelí S235 až S460 stanoveny na max. hodnotu HV 380, a u S460 až S690 na max. hodnotu HV 450. Dle starého vydání této normy téměř žádný vzorek nevyhovoval, avšak nové vydání téže normy z roku 2019 pevnostní třídu S235 až S460 neřeší.

Pro co nejmenší změnu tvrdosti řezaného materiálu (řezaného bez předeřevu a dalších úprav tepelného cyklu procesu dělení) lze z naměřených hodnot konstatovat, že výkonová sestava 130A u obou materiálů vychází výrazně nejhůře. Dle předpokladů má nejmenší vliv na tvrdost materiálu S235 sestava o nejnižším vybraném výkonu, tedy sestava o řezném proudu 60A. U Hardoxu 450 má nejmenší vliv na tvrdost sestava hořáku o výkonu 280A, avšak o zanedbatelný rozdíl oproti výkonové sestavě 60A. Tedy jak se dalo předpokládat, aby byla docílena co nejmenší změna tvrdosti základního materiálu, je ideální volit sestavu hořáku o nejmenším proudovém výkonu.

U tepelně ovlivněné oblasti lze porovnat, jak se chovaly oba dva řezané materiály. Jednotlivé sestavy hořáku nemají až takový vliv na TOO. Avšak lze porovnat TOO v různé výšce řezu obou materiálů. U konstrukční oceli S235 se největší velikost TOO pohybovala spíše uprostřed řezu, tedy v místě „b“ a nejmenší v místě „c“. Proti tomu Hardox měl nejmenší velikost TOO v místě „a“ a největší v místě „c“.

Ze získaných hodnot měření nelze prokázat, který hořák je pro všechny měřené parametry nejlepší, avšak lze doporučit, jakou sestavu hořáku vybrat pro jednotlivé parametry. Pro co nejmenší hodnotu parametru R_{z5} je vhodné vybrat sestavu hořáku s vyššími ampéry, neboli v našem případě to byla 280A a případně 130A sestava. Pro úchylku kolmosti „u“ je nejvhodnější zvolit sestavu hořáku takovou, aby řezaná tloušťka plechu byla uprostřed rozsahu daného hořáku. Pro co nejmenší získanou tvrdost řezné hrany lze doporučit vybírat sestavu hořáku tak, aby tloušťka řezaného materiálu byla na okraji rozsahu daného hořáku. V našem případě nejlépe vyšla tvrdost při použití sestavy hořáku s nejnižším řezným proudem, tedy 60A, ale i s 280A dopadla velmi podobně. Pro poslední měřený parametr, tedy velikost TOO, je vhodné vybrat sestavu hořáku s co největším řezným proudem. Důvodem toho je využití většího řezného proudu, přičemž hořák má vyšší řeznou rychlost oproti nižším výkonovým sestavám, a díky tomu nestačí základní materiál tolik tepelně ovlivnit.

Seznam použitých zdrojů

1. Bc. KUPKA Jakub. *Vliv řezání kyslíkem na vlastnosti základního materiálu*. Praha, 2015. Dostupné také z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/63633>. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE.
2. Tepelné dělení materiálu kyslíkem – porovnání s ostatními metodami a praktické aplikace. *Tydenickyportal.cz* [online]. 2014, 12. červen 2014 [cit. 2023-10-18]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/tepelne-deleni-materialu-kyslikem-porovnani-s-ostatnimi-metodami-a-prakticke-aplikace_25452.html
3. Automatizace řezání. *ESAB* [online]. 2023 [cit. 2023-05-10]. Dostupné z: https://esab.com/cz/eur_cs/esab-university/articles/what-is-oxy-fuel-cutting/
4. ZMYDLENÝ, Tomáš. Tepelné dělení materiálů: Stručný úvod do řezání kyslíkem, plazmou a laserem [online]. VŠB FS Presentace. [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/70572546-Tepelne-deleni-materialu.html>
5. ČESKÁ SVÁŘEČSKÁ SPOLEČNOST ANB ČSN 05 0705 ZK311 1.1 ZP311-2 1.1 Bezpečnostní normy ČSN 05 0600 ČSN 05 0601 ČSN 05 0610 Vyhláška č.87/2000 sb. *Slideserve* [online]. [cit. 2023-12-11]. Dostupné z: <https://www.slideserve.com/zuzela/sva-ov-n-plamenem>
6. Dělení materiálů laserovým paprskem je stále na vzestupu zájmu. *Konstrukce odborný časopis pro stavebnictví a strojírenství* [online]. [cit. 2023-10-17]. Dostupné z: <https://konstrukce.cz/materialy-a-technologie/deleni-materialu-laserovym-paprskem-je-stale-na-vzestupu-zajmu-591>
7. MINAŘÍK, Václav. *Tepelné dělení materiálu*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1993. ISBN 80-01-01028-7.
8. Dělení materiálů laserovým paprskem je stále na vzestupu zájmu. *Konstrukce odborný časopis pro stavebnictví a strojírenství* [online]. [cit. 2023-10-17]. Dostupné z: <https://konstrukce.cz/materialy-a-technologie/deleni-materialu-laserovym-paprskem-je-stale-na-vzestupu-zajmu-591>

9. Co je obloukové plazmové řezání, *ESAB* [online]. 2023 [cit. 2023-05-10]. Dostupné z: https://esab.com/cz/eur_cs/esab-university/blogs/what-is-plasma-arc-cutting/
10. Tvarové vypalování plazmou. *KT MetSteel* [online]. 2020, 14. prosince 2020 [cit. 2023-06-28]. Dostupné z: <https://www.ktmetsteel.cz/tvarove-vypalovani-plazmou>
11. doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D. Řezání, obrábění a jiné způsoby přípravy svarových ploch [online]. Technická univerzita v Liberci. Prezentace. [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: https://elearning.tul.cz/pluginfile.php/535364/mod_folder/content/0/14_TepeIn%C3%A9%20d%C4%9Blen%C3%AD%20materi%C3%A1l%C5%AF.pdf?forcedownload=1
12. Plazmové řezání má své výhody i nevýhody. *Naše zahrada* [online]. 2022, 04. 03. 2022 [cit. 2023-10-08]. Dostupné z: <https://www.nasezahrada.com/plazmove-rezani-ma-sve-vyhody-i-nevyhody-jake-materialy-lze-delit/>
13. Řezání laserem. *TOROTECH* [online]. 2023 [cit. 2023-09-28]. Dostupné z: <https://torotech.cz/rezani-laserem/>
14. 5 důvodů, proč byste měli řezat kovy laserem. *Bystronic* [online]. Zář 2020 [cit. 2023-09-28]. Dostupné z: <https://www.bystronic.com/cze/cs/news/5-d-vod-pro-byste-m-li-ezat-kovy-laserem>
15. Plazma. *Techmania Science Center* [online]. 2022 [cit. 2023-06-25]. Dostupné z: <http://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/skupenstvi/plazma>
16. Obrábění plazmou. *Technickyportal.cz* [online]. 2015, 10. březen 2015 [cit. 2023-06-23]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv-technik/obrabeni-plazmou_29259.html
17. Prodloužení životnosti elektrod pro plazmové řezání. *MM průmyslové spektrum* [online]. 2007, 09. 10. 2007 [cit. 2023-06-23]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prodlouzeni-zivotnosti-elektrod-pro-plazmove-rezani>

18. OPENAI. *Jaké se využívají typy plynů při plazmovém řezání?* [chatbot] In: *ChatGPT-4. AI program.* [online] 28. Června 2023 [cit. 2023-06-28] Dostupné z: <https://openai.com/blog/chatgpt>.
19. Plazmová řezačka. *Schinkmann svářecí technika* [online]. 2023 [cit. 2023-06-28]. Dostupné z: <https://www.schinkmann.cz/plazma>
20. Nekonenční metody obrábění. *MMSpektrum* [online]. 2008, 08. 10. 2008 [cit. 2023-09-23]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nekonecni-metody-obrabeni-8-dil>
21. Složení atmosferického vzduchu. *Tzb-info* [online]. 1980, 2023 [cit. 2023-11-07]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/74-slozeni-atmosferickeho-vzduchu>
22. Vliv obsahu příměsí v Argonu na technologické vlastnosti svařovacího procesu. *Konstrukce* [online]. 2010, 2. 12. 2010 [cit. 2023-11-13]. Dostupné z: <http://old.konstrukce.cz/clanek/vliv-obsahu-primesi-v-argonu-na-technologicke-vlastnosti-svarovaciho-procesu/>
23. Pálicí stroj Vanad PROXIMA. *Vanad* [online]. [cit. 2023-11-13]. Dostupné z: <https://vanad.cz/cs/palici-stroje/nabidka-stroju/vanad-proxima>
24. Řezání kovů. *ELUC* [online]. [cit. 2023-09-15]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1858>
25. Plazma ve strojírenství. *Slideplayer* [online]. [cit. 2023-09-15]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/14456533/>
26. KUBÍČEK, J., KANDUS, B., AMBROŽ, O. *Technologie svařování a zařízení*. 2. vyd. Ostrava: ZERROS, 2001. 395s., ISBN 80-85771-81-0.
27. *Příručka s daty pro řezání: Kjellberg Finsterwalde the fine focus company*. Verze 2. 2016.
28. Plasma Torch Parts. *MultiCam Canada* [online]. 2011, 11. 10. 2011 [cit. 2023-09-20]. Dostupné z: <https://multicamcanada.wordpress.com/2011/10/11/plasma-torch-parts/>
29. HEINRICH, Michal. Plazmové řezání. Svět svárů: časopis o moderních trendech ve svařování a řezání kovů, 2006, roč. 5, č. 3, s. 18-19.
30. HiFocus 280i Neo. *Kjellberg* [online]. [cit. 2023-10-25]. Dostupné z: <https://www.kjellberg.de/catalog-details/hifocus-280i-neo.html>

31. Hardox – otěruvzdorný plech. *Stavební technika* [online]. 2009, 9.4.2009 [cit. 2023-11-13]. Dostupné z: <https://www.stavebni-technika.cz/clanky/hardox-oteruvzdorny-plech>
32. Hardox 450. *SSAB* [online]. [cit. 2023-10-06]. Dostupné z: <https://www.ssab.com/cs-cz/znacky-a-vyrobky/hardox/produktovy-program/450>
33. ČSN EN 1090-2. *Provádění ocelových konstrukcí a kliníkových konstrukcí: Technické požadavky na ocelové konstrukce*. 1. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2019.
34. ČSN EN ISO 9013. *Tepelné dělení - Klasifikace tepelných řezů - Geometrické požadavky na výrobky a úchytky jakosti řezu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018, 32 s. Třídící znak 053401.
35. Měření struktury povrchu. *Accretech* [online]. 2019 [cit. 2023-11-13]. Dostupné z: <https://www.accretech.eu/cs/mereni-struktury-povrchu/>
36. ŠAČIROVIČ, Alen. *Ovlivnění řezných hran při tepelném dělení plazmou*. Praha, 2017. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze.
37. Co je to tvrdost a jak se měří. *Hanyko Praha* [online]. [cit. 2023-11-02]. Dostupné z: <https://www.hanyko-praha.cz/produkty/tvrdomery/co-je-tvrдост-a-jak-se-meri/>
38. Přehled vlastností oceli S235 [online]. 2023 [cit. 2023-12-07]. Dostupné z: <https://bbolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/tycove-oceli-uhlikove-konstrukcni-a-legovane/nelegovane-konstrukcni-oceli-podle-en-10025/prehled-vlastnosti-oceli-s235jrdrive-s235jrg2>
39. Hardox 450 Otěruvzdorná ocel. *GNEE Professional Exported Steel Supplier* [online]. 2023 [cit. 2023-12-07]. Dostupné z: https://cz.coldrolledsteels.com/wear-resistant-steel-plate/hardox-wear-resistant-steel/hardox-450-abrasion-resistant-steel.html?fbclid=IwAR126jt1-7Q9_hGwuxR3oXvkBDS9e8mBrmZI8_zeq0ZrpDnIYQxChueZElS
40. Hlavní typy laserů používaných v průmyslu. *Mega blog* [online]. 2013, 28.2.2013 [cit. 2023-12-12]. Dostupné z: <https://www.mega-blog.cz/lasery/hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu/>

41. PODANÝ, Petr. *POROVNÁNÍ DRSNOSTI ŘEZNÝCH HRAN PŘI DĚLENÍ MATERIÁLU CO₂ A YBYAG LASEREM*. Brno, 2016. Dostupné také z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=12900
6. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.
42. Zvýšení kvality hodnocení textury povrchu. *MM průmyslové spektrum* [online]. 2021, 22. 11. 2021 [cit. 2023-12-12]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/zvyseni-kvality-hodnoceni-textury-povrchu>

Seznam obrázků

Obrázek 1: Strojní řezání kyslíkem – firma ESAB [3]	12
Obrázek 2: Schéma moderního řezacího hořáku se směšováním v hubici [4].....	13
Obrázek 3: Princip injektorového řezacího hořáku [5].....	13
Obrázek 4: Schéma vláknového laseru [8]	15
Obrázek 5: Závislost absorpce materiálu na vlnové délce záření [8]	16
Obrázek 6: Řezání 3D tvaru pomocí laseru [8]	16
Obrázek 7: Strojní řezání plazmou (firma KT MetSteel) [10]	17
Obrázek 8: Graf závislosti rychlosti řezání na tloušťce materiálu pro různé metody řezání [11].....	18
Obrázek 9: Porovnání zápalné teploty a teploty tavení na obsahu uhlíku v materiálu [11].....	19
Obrázek 10: Vliv tepelné vodivosti plynů v závislosti na teplotě [22].....	24
Obrázek 11: Schéma řezání plazmovým hořákem [24]	28
Obrázek 12: Plazmový hořák s vodní stabilizací [25].....	28
Obrázek 13: Komponenty hořáku a nářadí [27]	29
Obrázek 14: Montážní nářadí hořáku.....	31
Obrázek 15: Popis jednotlivých kroků při demontáži hořáku	32
Obrázek 16: Pohybová část - Vanad Proxima 20/20	33
Obrázek 17: Plazmový řezací zdroj Kjellberg HiFocus 280i Neo.....	34
Obrázek 18: Odsávací systém Kemper - PlasmaFil.....	36
Obrázek 19: Přípravy experimentu, úprava materiálu	39
Obrázek 20: Doporučený tvar zkušebního kusu a místa měření [33]	40
Obrázek 21: Připravené vzorky.....	40
Obrázek 22: Průměrná výška prvků profilu [33].....	41
Obrázek 23: Průměrná výška prvků profilu, Rz5 – tloušťka zpracovávaného kusu 30mm [34].....	42
Obrázek 24: Průměrná výška prvků profilu, Rz5 – tloušťka zpracovávaného kusu 150mm [34]	42
Obrázek 25: Úchylka kolmosti nebo úchylka úhlu [34]	44

Obrázek 26: Úchylka kolmosti nebo úchylka úhlu, u (tloušťka zpracovávaného kusu do 30 mm) [34]	46
Obrázek 27: Úchylka kolmosti nebo úchylka úhlu, u (tloušťka zpracovávaného kusu do 150 mm) [34]	46
Obrázek 28: Místa měření na broušeném páleném povrchu [33]	47
Obrázek 29: Zkouška tvrdosti podle Rockwella [37]	49
Obrázek 30: Znázornění zkoušky dle Brinella [37]	51
Obrázek 31: Drsnoměr Mituoyo SJ-210.....	55
Obrázek 32: Graf průměrné výšky prvků profilu Rz5	56
Obrázek 33: Metalografická pila Labotom 3	57
Obrázek 34: Zalévací zařízení Strues CitoPress 10	57
Obrázek 35: Bruska/leštička Beuhler Grinder-Polisher Beta.....	58
Obrázek 36: Metalografické vzorky po naleptání.....	58
Obrázek 37: Zvolená místa pro měření velikosti tepelně ovlivněné oblasti	59
Obrázek 38: Měření tepelně ovlivněné oblasti u vzorku 1A v místě "a"	60
Obrázek 39: Měření tepelně ovlivněné oblasti u vzorku 1A v místě "b"	60
Obrázek 40: Měření tepelně ovlivněné oblasti u vzorku 1A v místě "c"	61
Obrázek 41: Tepelně ovlivněná oblast v místě "a"	61
Obrázek 42: Tepelně ovlivněná oblast v místě "b"	62
Obrázek 43: Tepelně ovlivněná oblast v místě "c"	62
Obrázek 44: Úchylka kolmosti na vzorcích 1B vlevo - 1A vpravo	64
Obrázek 45: Úchylka kolmosti na vzorcích 2B vlevo - 2A vpravo	64
Obrázek 46: Úchylka kolmosti na vzorcích 3B vlevo - 3A vpravo	65
Obrázek 47: Úchylka kolmosti na vzorcích 4B vlevo - 4A vpravo	65
Obrázek 48: Úchylka kolmosti na vzorcích 5B vlevo - 5A vpravo	65
Obrázek 49: Úchylka kolmosti na vzorcích 6B vlevo - 6A vpravo	66
Obrázek 50: Graf celkové porovnání úchylky kolmosti	67
Obrázek 51: Tvrdoměr Buehler IndentaMet 1104	68
Obrázek 52: Vybroušené vzorky na zkoušku tvrdosti	69
Obrázek 53: Graf tvrdosti na hraně A.....	71
Obrázek 54: Graf tvrdosti na hraně B.....	71
Obrázek 55: Graf výsledné tvrdosti jednotlivých vzorků.....	72

Seznam tabulek

Tabulka 1: Složení vzdušné atmosféry [21]	26
Tabulka 2: Využití kombinace plynů pro jednotlivé materiály [10], [19]	27
Tabulka 3: Technické parametry stroje Vanad Proxima 20/20 [23].....	34
Tabulka 4: Parametry plazmového zdroje Kjellberg HiFocus 280i Neo [30]	35
Tabulka 5: Chemické složení konstrukční oceli S235	37
Tabulka 6: Mechanické vlastnosti konstrukční oceli S235	37
Tabulka 7: Chemické složení ořezavzdorné oceli Hardox 450	38
Tabulka 8: Mechanické vlastnosti ořezavzdorné oceli Hardox 450	38
Tabulka 9: Toleranční pole pro průměrnou výšku prvků profilu Rz5 [34].....	41
Tabulka 10: Velikost parametru „ Δa “ pro různé tloušťky řezu [34]	45
Tabulka 11: Toleranční pole pro velikost úchylky kolmosti nebo úhlové úchylky „ u “ [34]	45
Tabulka 12: Počet a umístění měření tvrdosti [33]	47
Tabulka 13: Druhy zkoušek [37]	50
Tabulka 14: Využití jednotlivých způsobů měření tvrdosti podle Rockwella [37]	50
Tabulka 15: Seznam vybraných hořáků	52
Tabulka 16: Seznam komponent pro 60A sestavu hořáku	53
Tabulka 17: Seznam komponent pro 130A sestavu hořáku	53
Tabulka 18: Seznam komponent pro 280A sestavu hořáku	54
Tabulka 19: Označení vzorků pro vyhodnocovací zkoušky	55
Tabulka 20: Průměrné naměřené hodnoty Rz_5 , R_a , R_q	56
Tabulka 21: Porovnání velikosti tepelně ovlivněné oblasti na jednotlivých vzorcích	63
Tabulka 22: Naměřené úchylky kolmosti na svislém řezu.....	66
Tabulka 23: Výsledné tvrdosti	70
Tabulka 24: Tvrdost základního materiálu	70

Seznam příloh

Příloha 1: Přehled vlastností konstrukční oceli S235 [38]

Příloha 2: Přehled vlastností otěruvzdorné oceli Hardox 450 [39]

Příloha 3: Naměřené hodnoty R_{z5} , R_a , R_q

Příloha 4: Tepelně ovlivněná oblast

Příloha 5: Měření tvrdosti podle Vickerse

Příloha 6: Specifikace postupu řezání

Příloha 1: Přehled vlastností oceli S235 [38]

Přehled vlastností oceli S235JR							1.0038		
Druh oceli	Nelegovaná jakostní konstrukční ocel								
TDP	ČSN EN 10025-2: 2005								
Dřívější označení	S235JRG2 podle EN 10025: 1990 + A1: 1993; RSt 37-2 podle DIN 17100; 11 375 podle ČSN								
Chemické složení v % hmot. (rozbor tavby)	C max. pro tloušťku v mm			Mn max.	Si max.	P max.	S max.	N max.	
	≤16	>16≤40	>40 ¹⁾	1,40	-	0,035	0,035	0,012	
Složení hotového výrobku	0,19	0,19	0,23	1,50	-	0,045	0,045	0,014	
Mechanické vlastnosti pro zkoušky v podélném směru	Minimální mez kluzu R_{eH} MPA pro výrobky jmenovité tloušťky v mm :								
	≤16	>16≤40	>40≤63	>63≤80	>80≤100	>100≤150	>150≤200	>200≤250	
	235	225	215	215	215	195	185	175	
	Pevnost v tahu R_m MPA pro výrobky jmenovité tloušťky v mm :								
	≥ 3 ≤ 100		> 100 ≤ 150		> 150 ≤ 250				
	360-510		350-500		340-490				
	Minimální tažnost v % ($L_0 = 5.65\sqrt{S_0}$) pro výrobky jmenovité tloušťky v mm ⁵⁾ :								
	> 3 ≤ 40		> 40 ≤ 63		> 63 ≤ 100		> 100 ≤ 150		> 150 ≤ 250
	26		25		24		22		21
	Minimální nárazová práce KV (J) při 20° C pro výrobky jmenovité tloušťky v mm : ^{2),5)}								
≤150		>150≤250							
27 ⁴⁾		27 ⁴⁾							
Maximální hodnota CEV ³⁾	Pro výrobky jmenovité tloušťky v mm:								
	≤ 30		> 30 ≤ 40		> 40 ≤ 150		> 150 ≤ 250		
0,35		0,35		0,38		0,40			
Technologické vlastnosti									
Svařitelnost	Vhodná ke svařování všemi obvykle používanými způsoby svařování. S rostoucí tloušťkou výrobku a rostoucí hodnotou uhlíkového ekvivalentu se zvyšuje riziko výskytu trhlin za studena v oblasti sváru. Je účelné dbát doporučení stanovující podmínky pro svařování, jak je ku příkladu uvádí ECSC IC 2 (EN 1011).								
Tváření za tepla	Jsou-li dodávané výrobky dále tvářeny za tepla, splňují uvedené mechanické vlastnosti pouze po následném normalizačním žitání.								
Tvařitelnost za studena	Ocel určená pro tváření za studena musí být označena písmenem C (S235JRC). To se týká i tažení za studena.								
¹⁾ pro profily o jmenovité tloušťce nad 100 mm se obsah C stanoví po dohodě. ²⁾ pro profily o jmenovité tloušťce nad 100 mm je hodnota nutno dohodnout ³⁾ hodnota uhlíkového ekvivalentu CEV se vypočte z rozboru tavby podle vzorce : $CEV = C + Mn : 6 + (Cr+Mo+V) : 5 + (Ni+Cu) : 15$ CEV je volitelný požadavek. ⁴⁾ průměrná hodnota vypočtená z výsledků tří stanovení musí splňovat předepsané požadavky. Jedna hodnota může být nižší, než předepsaná minimální průměrná hodnota za předpokladu, že nebude nižší než 70% této hodnoty. V opačném případě se odebírají ze zkušebního vzorku další 3 zkušební tělesa. Průměrná hodnota ze 6 zkoušek pak nesmí být nižší než předepsaná minimální hodnota, přičemž 2 výsledky mohou být nižší, ale pouze jeden s hodnotou nižší, než 70% předepsané minimální hodnoty. ⁵⁾ pro podélný směr zkoušení.									

Příloha 2: Přehled vlastností ořeruvzdorné oceli Hardox 450 [39]

Chemické složení desek Hardox 450

C *)	Si *)	Mn *)	P	S	Cr *)	Ni *)	Mo *)	B *)
Max. %	Max. %	Max. %	Max. %	Max. %	Max. %	Max. %	Max. %	Max. %
0,26	0,7	1,6	0,025	0,01	1,40	1,50	0,6	0,005

Ocel je rafinovaná zrnem. *) Úmyslné legovací prvky.

Hardox 450 Maximální ekvivalent uhlíku (CEV)

Tloušťka mm	-5	5 - (10)	10 - (20)	20 - (40)	40 - 80	(80) - 130
CET (CEV) Max	0,37 (0,48)	0,38 (0,49)	0,39 (0,52)	0,41 (0,60)	0,43 (0,74)	0,41 (0,67)
CET (CEV) Typické	0,29 (0,39)	0,33 (0,45)	0,36 (0,48)	0,38 (0,56)	0,38 (0,61)	0,39 (0,64)

Mechanické vlastnosti pro Hardox 450 High Tens Plate Plate

Tloušťka	Tvrdość HBW	Typická mez kluzu MPa,
mm	min - max. 1)	není zaručena
3 - 80	425 - 475	1100 - 1300
(80) - 100	410 - 475	1050 - 1300
(100) - 130	390 - 475	1000 - 1300

Příloha 3: Naměřené hodnoty R_{z5} , R_a , R_q

	Měřené parametry	1 měření	2 měření	3 měření	4 měření	5 měření	Průměr naměřených hodnot
S235 (280A)	R_{z5}	7,425	10,995	10,399	8,187	8,011	9,003
	R_a	1,825	2,56	2,302	2,045	1,825	2,111
	R_q	2,206	3,186	2,755	2,35	2,222	2,544
S235 (130A)	R_{z5}	7,558	9,197	11,145	9,168	13,775	10,169
	R_a	1,736	2,142	2,832	2,037	3,091	2,368
	R_q	2,029	2,502	3,216	2,396	3,562	2,741
S235 (60A)	R_{z5}	12,424	10,978	11,986	9,389	9,173	10,790
	R_a	2,605	2,583	2,48	1,967	1,682	2,263
	R_q	3,193	2,637	3,017	2,395	2,084	2,665
Hardox (280A)	R_{z5}	13,939	10,772	12,51	8,633	8,746	10,920
	R_a	2,816	1,654	2,219	1,399	2,103	2,038
	R_q	3,31	2,024	2,621	1,686	2,405	2,409
Hardox (130A)	R_{z5}	11,986	9,435	9,81	8,848	10,353	10,086
	R_a	2,232	1,968	1,846	1,549	1,658	1,851
	R_q	2,802	2,276	2,169	2,035	3,469	2,550
Hardoc (60A)	R_{z5}	26,531	26,984	21,897	19,973	13,939	21,865
	R_a	5,77	5,714	4,794	4,433	2,816	4,705
	R_q	6,836	6,641	5,528	5,181	3,31	5,499

Příloha 4: Tepelně ovlivněná oblast

	Tepelně ovlivněná oblast [μm]					
Místo "a"	1 měření	2 měření	3 měření	4 měření	5 měření	průměr měření
1A - a	191,220	182,569	202,657	201,202	203,486	196
1B - a	214,147	229,729	222,904	218,783	223,798	222
2A - a	210,986	204,194	216,208	214,680	218,011	213
2B - a	212,323	211,253	198,879	199,796	193,220	203
3A - a	268,812	276,000	262,201	272,921	271,916	270
3B - a	232,187	234,320	234,657	228,494	236,331	233
4A - a	300,995	307,550	313,869	316,650	316,721	311
4B - a	250,897	265,859	268,445	270,902	275,521	266
5A - a	313,354	310,114	315,096	316,281	311,105	313
5B - a	291,820	291,836	296,966	299,744	289,021	294
6A - a	326,249	327,537	340,065	354,456	353,009	340
6B - a	393,753	398,733	398,194	393,284	389,675	395
Místo "b"	1 měření	2 měření	3 měření	4 měření	5 měření	průměr měření
1A - b	210,124	213,05	207,242	195,861	206,116	206
1B - b	218,85	230,466	220,171	194,69	211,145	215
2A - b	202,194	206,807	212,893	221,862	212,868	211
2B - b	220,613	213,526	215,31	225,08	218,956	219
3A - b	227,623	227,278	246,97	256,46	251,2	242
3B - b	241,874	241,642	235,636	232,211	237,707	238
4A - b	300,34	307,581	307,213	303,033	301,018	304
4B - b	300,189	298,445	302,615	297,737	301,919	300
5A - b	290,893	293,94	289,746	294,407	296,591	293
5B - b	347,729	348,813	354,232	352,178	352,117	351
6A - b	411,327	409,435	400,753	401,842	410,11	407
6B - b	395,841	392,515	390,513	400,193	400,744	396
Místo "c"	1 měření	2 měření	3 měření	4 měření	5 měření	průměr měření
1A - c	163,238	158,357	165,601	175,038	181,659	169
1B - c	196,374	205,655	180,039	172,893	182,391	187
2A - c	198,989	199,352	198,852	197,818	203,564	200
2B - c	213,381	193,644	194,632	196,353	198,166	199
3A - c	259,178	268,093	271,931	268,929	264,167	266
3B - c	260,151	240,251	249,482	256,354	257,716	253
4A - c	258,503	253,894	250,395	244,305	239,272	249
4B - c	316,888	320,91	326,6	303,726	310,989	316
5A - c	334,3	329,722	334,244	326,335	331,366	331
5B - c	291,82	291,836	296,966	299,744	289,021	294
6A - c	445,605	452,08	461,734	469,26	442,602	454
6B - c	397,338	400,533	404,773	401,4	407,247	402

Příloha 5: Měření tvrdosti podle Vickerse

Vzorek	Místo měření	Tvrdost HV 1					Průměrná hodnota
		1 měření	2 měření	3 měření	4 měření	5 měření	
1A	horní	367,9	356,7	391,2	391,2	384,5	378
1A	střed	379	382,3	365,3	356,7	386,1	374
1A	dolní	256,1	266,9	269,5	240	273,8	261
1B	horní	382,3	427	405,8	401,6	429,6	409
1B	střed	432,9	410,6	425,7	400,4	409,4	416
1B	dolní	421,2	372	392,3	371	366,8	385
2A	horní	297,9	298,6	304,8	319,4	315,6	307
2A	střed	434,2	446,4	424,4	421,9	412,5	428
2A	dolní	373,1	386,1	362,2	335,9	347,5	361
2B	horní	444,4	449,9	430,9	433,6	425,1	437
2B	střed	423,1	434,2	416,8	438,9	420,6	427
2B	dolní	429	431,6	435,6	432,2	432,9	432
3A	horní	399,9	380,6	390,1	398,1	374,2	389
3A	střed	388,4	405,2	415	428,3	395,8	407
3A	dolní	220	186,9	212,8	193,9	215,8	206
3B	horní	368,9	387,8	391,2	400,4	386,7	387
3B	střed	425	399,9	395,2	393,5	436,9	410
3B	dolní	334,1	332,3	353,8	363,3	364,3	350
4A	horní	462,8	476,2	477,8	450,6	499,2	473
4A	střed	454,9	468	480,9	468,7	456,3	466
4A	dolní	462,1	477	473,2	500	469,5	476
4B	horní	495,9	487,1	500	473,2	492,7	490
4B	střed	473,2	470,2	474	477	452,7	469
4B	dolní	450,6	480,1	483,2	457,7	471,7	469
5A	horní	447,1	504,1	521,2	511,7	508,3	498
5A	střed	489,5	487,9	484,8	499,2	505	493
5A	dolní	480,9	495,1	496,7	464,3	501,8	488
5B	horní	506,6	505,8	502,5	516	498,4	506
5B	střed	480,1	492,7	483,2	479,3	496,7	486
5B	dolní	446,4	462,1	467,2	469,5	487,1	466
6A	horní	468,7	483,2	454,2	459,9	479,3	469
6A	střed	499,2	495,1	508,3	488,7	521,8	503
6A	dolní	459,2	479,3	451,3	436,2	432,2	452
6B	horní	477,8	474,7	489,5	469,5	462,1	475
6B	střed	488,7	519,4	471,7	516	503,3	500
6B	dolní	449,9	479,3	454,9	454,9	456,3	459

Příloha 6: Specifikace postupu řezání

ČSN EN 1090-2

Tabulka D.4 – Příklad předběžné specifikace postupu řezání

Specifikace postupu řezání	
Proces řezání:	PLAZMOVÉ
Výrobce pálicího stroje:	KJELLBERG H; Focus 2P0; NEO
Typ řezu:	SKLÍVÝ (KOLMÝ)
Označení řezacího hořáku	# 60A / 130A / 2P0A
Označení řezací trysky:	G200PT (60A); G2012T (130A); G2326Y (2P0A)
Výrobce řezacího hořáku/trysky:	THERMACUT
Norma:	ČSN EN ISO 1090-2
Materiálová skupina:	S235 / HARDOX 450
Tloušťka materiálu (mm):	10
Typ použitého plynu:	O ₂ / VZDUCH
Tlak topného kyslíku*:	2,5 bar
Tlak použitého plynu*:	2,5 bar
Tlak řezného kyslíku*:	—
Nastavení řezného plamene	—
Rychlost řezání:	1,8 m/min (60A) / 3,4 m/min (130A) / 4,7 m/min (2P0A)
Vzdálenost trysky:	ZAPALENÍ 4,00 mm / PRACOVNÍ 2,5 mm
Teplota předehřevu:	—
Úhel řezu (pokud řez není kolmý)	—
Následné tepelné zpracování:	—
Typ hořáku pro předehřev/dohřev	—
Označení ohřívacího hořáku:	—
Výrobce ohřívacího hořáku:	—
Typ topného plynu:	—
Tlak kyslíku/stlačeného vzduchu:	—
Tlak topného plynu:	—
* Tlak je měřený na vstupu hořáku	—