

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

FAKULTA STROJNÍ



**BAKALÁŘSKÁ
PRÁCE**

**Kubec
Šimon**

2020

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kubec** Jméno: **Šimon** Osobní číslo: **466569**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Vliv plazmového řezání na vlastnosti základních materiálů

Název bakalářské práce anglicky:

The influence of plasma cutting on base materials properties

Pokyny pro vypracování:

Rozdělení metod tepelného dělení a popis problematiky plazmového řezání konstrukčních ocelí
Způsoby ovlivnění řezných hran po tepelném dělení a popis způsobu hodnocení podle ČSN EN 1090
Návrh experimentu a jeho realizace
Vyhodnocení dosažených výsledků a závěr

Seznam doporučené literatury:

- [1] Šačirovič, 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) bakalářské práce:

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

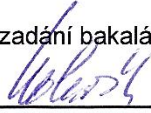
Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:


Ing. Tomáš Panáček, IWE, ústav strojírenské technologie FS


Datum zadání bakalářské práce: **29.04.2020**

Termín odevzdání bakalářské práce: **31.07.2020**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2020**


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


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



prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

30.6.2020

Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Anotační list

Jméno autora: Šimon Kubec

Název bakalářské práce: Vliv plazmového řezání na vlastnosti základních materiálů

Anglický název bakalářské práce: The influence of plasma cutting on base materials properties

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Ladislavu Kolaříkovi, Ph.D., IWE

Ústav: Ústav strojírenské technologie

Rok vyhotovení: 2020

Bibliografické údaje: počet stran: 73

počet obrázků: 71

počet tabulek: 17

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá vlivem plazmového řezání na vlastnosti základních materiálů. Teoretická část popisuje základní rozdělení metod tepelného dělení, výhody a nevýhody plazmového řezání oproti ostatním metodám tepelného dělení, principy technologie řezání plazmou, problémy s kvalitou řezu, strojní zařízení pro řezání plazmou a normu ČSN EN 1090, která předepisuje nutnou kontrolu ovlivnění řezných hran po tepelném dělení u vybraných materiálů. Experimentální část je zaměřena na zmapování ovlivnění řezné hrany po řezání plazmatem vysokopevné konstrukční oceli S960QL, zejména pak tvrdosti řezných hran. Cílem této práce je vyhodnotit, zdali daný proces plazmové řezání vyhovuje podmínkám dle výše uvedené normy a zjistit, k jakému výsledku vedou optimální parametry řezání podle výrobce strojního zařízení.

Klíčová slova:

Plazmové řezání, řezná hrana, tvrdost, vysokopevná konstrukční ocel, řezná rychlost

Abstract

This bachelor thesis deals with the influence of plasma cutting on base materials properties. The theoretical part describes the basic distribution of thermal cutting methods, advantages and disadvantages of plasma cutting compared to other methods of thermal cutting, principles of plasma cutting, problems with plasma cut quality, CNC plasma cutting machine and also the ČSN EN 1090 standards, which regulate necessary control of influence of the cutting edges after thermal cutting of selected materials. The experimental part focuses on influence of the cutting edge after plasma cutting of high-strength structural steel S960QL, especially on cutting edge hardness. The outcome is to evaluate whether the process of plasma cutting complies with the conditions of the standards and to evaluate the results of the optimal cutting parameters according to the machine manufacturer.

Keywords:

Plasma cutting, cutting edge, hardness, high-strength structural steel, cutting speed

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci na téma **Vliv plazmového řezání na vlastnosti základních materiálů** vypracoval samostatně a veškeré literární prameny a zdroje informací, které jsem použil, cituji a uvádím v seznamu použité literatury a zdrojů informací.

Dále prohlašuji, že 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

.....

Jméno, Příjmení

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat panu doc. Ing. Ladislavu Kolaříkovi, Ph.D., IWE za cenné rady a připomínky při tvorbě této bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Tomáši Panáčkovi, IWE za pomoc při vytváření vzorků na řezacím stroji a paní doc. Ing. Marii Kolaříkové, Ph.D., IWE za pomoc při vyhodnocování experimentu.

Obsah

1. Úvod.....	10
2. Technologie dělení materiálu	11
2.1. Metody tepelného dělení.....	11
2.1.1. Řezání plazmou	11
2.1.2. Řezání kyslíkem.....	13
2.1.3. Řezání laserem	15
2.2. Značení metod tepelného dělení podle normy ČSN EN ISO 4063	19
2.3. Výhody a nevýhody vybraných metod tepelného dělení	21
3. Historie plazmového řezání	21
4. Proces plazmového řezání	23
4.1. Vznik startovacího oblouku	23
4.2. Vznik hlavního oblouku	24
4.3. Lokalizované zahřívání a tavení.....	25
4.4. Vyfukování materiálu	25
4.5. Pohyb oblouku	25
5. HD plazma	26
6. Vady řezů a jejich příčiny [21].....	27
6.1. Úhel řezu	27
6.2. Rovina řezu.....	27
6.3. Kvalita povrchu.....	28
6.4. Struska.....	28
7. Strojní zařízení pro dělení plazmou	29
7.1. Plazmový hořák.....	29
7.2. Plazmový zdroj	31

8.	Kvalita řezu při tepelném dělení.....	32
8.1.	Průměrná výška profilů Rz5 [32] [33].....	32
8.2.	Úchylka kolmosti a úhlu [32] [33]	33
8.3.	Zkouška tvrdosti [32].....	35
9.	Praktická část	36
9.1.	Podmínky vyhotovení řezů.....	36
9.1.1.	Řezací stroj Vanad PROXIMA 20/20.....	37
9.1.2.	Plazmový zdroj Kjellberg HiFocus 280i neo	38
9.1.3.	Plazmový hořák PerCut 451	40
9.1.4.	Základní materiál pro experiment	40
9.1.5.	Doporučený tvar zkušebního vzorku a místa měření [32].....	41
9.1.6.	Výsledný tvar vzorků	42
9.1.7.	Popis experimentu	42
9.2.	Úprava nařezaných vzorků	44
9.2.1.	Příprava metalografických vzorků	45
9.3.	Měření průměrné výšky profilu Rz5	49
9.3.1.	Vyhodnocení průměrné výšky profilu Rz5	50
9.4.	Měření úchylky kolmosti u	51
9.4.1.	Vyhodnocení úchylky kolmosti u	53
9.5.	Vyhodnocení geometrických požadavků [32]	55
9.6.	Měření tvrdosti	56
9.6.1.	Vyhodnocení tvrdosti [32]	57
9.7.	Tepelně ovlivněná oblast	57
9.7.1.	Vyhodnocení tepelně ovlivněné oblasti	64
10.	Závěr	65
	Použité zdroje	66

Seznam obrázků.....	70
Seznam tabulek.....	73

1. Úvod

Obsahem této bakalářské práce je seznámení se s technologií řezání plazmou a následné stručné porovnání výhod a nevýhod, oproti ostatním metodám tepelného dělení (řezání kyslíkem a laserem). Dále se tato práce bude zabývat problémy s kvalitou řezu, popisu strojního zařízení pro řezání plazmou a následně normou ČSN EN 1090, která předepisuje nutnou kontrolu ovlivnění řezných hran po tepelném dělení u vybraných materiálů. Motivací ke vzniku této bakalářské práce je vydání novelizace této normy, která výrazně upravuje problematiku přípravy svarových ploch pomocí tepelného dělení a zpřesňuje ji.

Praktická část bakalářské práce se zabývá zmapováním ovlivnění řezné hrany po řezání plazmatem vysokopevné konstrukční oceli S960QL a má za cíl vyhodnotit, zdali daný proces plazmového řezání vyhovuje podmínkám dle výše zmíněné normy.

2. Technologie dělení materiálu

Technologie dělení materiálů můžeme obvykle rozdělit do tří základních skupin: tepelné, mechanické a dělení vodním paprskem. První skupina využívá k dělení materiálu různé formy tepelných zdrojů, zatímco druhá z těchto skupin využívá různé typy mechanických strojů a nástrojů (řezání, frézování, děrování atd.). Metody tepelného dělení jsou obecně produktivnější než běžné způsoby dělení a řezání materiálu. Tato bakalářská práce se bude zabývat pouze technologiemi tepelného dělení (v podobě plazmového řezání), proto dále bude pozornost věnována těmto metodám.

2.1. Metody tepelného dělení

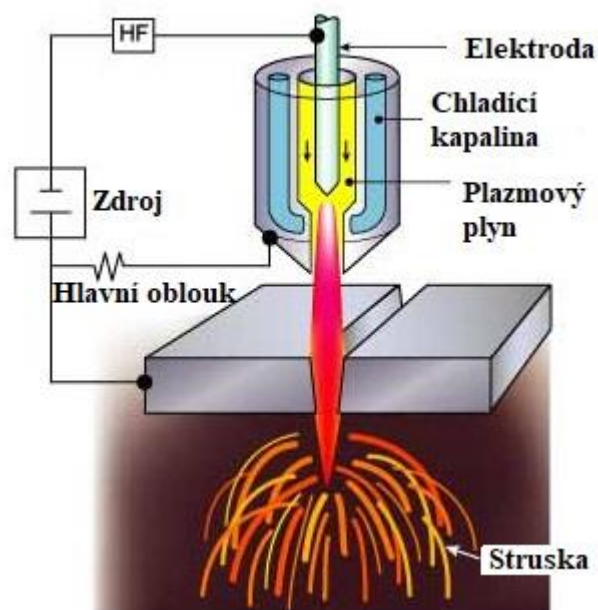
Technologie tepelné dělení materiálu se už v dnešní době nevyužívají pouze pro výrobu jednotlivých dílů svařovaných konstrukcí nebo pro dílčí operace (jako je např. příprava svarových ploch apod.), ale slouží také k tvorbě zcela nových konstrukčních variant. Mezi hlavní technologie tepelného dělení patří: řezání plazmou, kyslíkem a laserem. [1]

2.1.1. Řezání plazmou

Řezání plazmou je proces, při kterém se využívá úzký oblouk ve formě vysokorychlostního paprsku ionizovaného (elektricky vodivého) plynu, k roztavení a rozdělení kovu v poměrně malé, úzké oblasti řezu. Plazmový plyn (resp. medium), jako je například inertní plyn nebo stlačený vzduch, je tlačěn pod velkým tlakem skrz malý otvor v přední části řezacího hořáku. Tento hořák je připojen ke stejnosměrnému (DC) zdroji napájení. V hořáku se část plazmového plynu přemění na plazmu (plyn dosáhne vyššího stupně ionizace), teplem vytvořeným výbojem vysokonapěťového oblouku ze zdroje energie. Tento oblouk vzniká mezi elektrodou v hořáku, která je zapojena jako katoda (-) a špičkou (tryskou) hořáku, skrz kterou plyn proudí.

Když se na tento vysokonapěťový oblouk použije malé množství stejnosměrného proudu z napájecího zdroje, vznikne pomocný startovací oblouk (tzv. pilotní oblouk), který může vystupovat až 13 mm, jako plazmový „paprsek“ ze špičky otvoru. Pilotní oblouk je zapálen nezávisle (není propojen s řezaným materiálem do obvodu) a funguje jako cesta, kterou je přiváděn hlavní řezný oblouk k obrobku (viz. obrázek 1). Když dojde ke kontaktu pilotního oblouku s kovovým obrobkem, který je zapojen jako anoda (+), dojde k přenesení hlavního řezného oblouku a pilotní oblouk je následně odpojen. S řezacím hořákem se obvykle pracuje ve vzdálenosti 3 a 10 mm od obrobku.

V některých situacích však lze řezat kontaktním tažením, kdy je hrot hořáku v kontaktu s obrobkem. Přenesený plazmový oblouk zahřívá kov kombinovanými účinky elektrického oblouku a vysokoteplotní plazmy, vytvořené zúžením oblouku a reakcí molekul plynu s obrobkem. Roztavený kov je následně vyfukován z řezu vysokorychlostním plazmovým paprskem, což má za následek rychlý a čistý řez. [2]



Obrázek 1 - Schéma řezání plazmou [3]

2.1.2. Řezání kyslíkem

Předpokladem této technologie je chemická reakce čistého kyslíku a řezaného materiálu za vzniku oxidu železa. Řezání kyslíkem lze obecně rozdělit do tří fází:

1) Ohřev materiálu na zápalnou teplotu

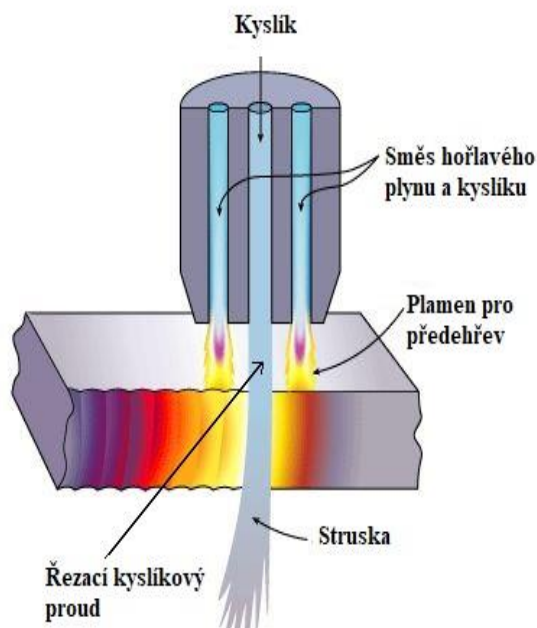
Vhodným hořlavým plynem ve směsi se zahřeje malá oblast na povrchu kovu, na tzv. zápalnou teplotu. Po dosažení této teploty bude povrch kovu jasně červený.

2) Oxidace kovu

Řezný proud kyslíku je poté směřován na předehřáté místo, což způsobí prudkou a rychlou oxidaci zahřátého kovu, při níž se vyvine velké množství tepla spalující zahřátý kov. Tímto procesem dochází ke vzniku řezné spáry. Vzniklé teplo nadále podporuje oxidaci kovu a proces řezání pokračuje.

3) Vyfukování produktů spalování z řezné spáry

Produkty spalování jsou z řezné spáry vyfukovány tlakovým proudem kyslíku ve formě roztaveného oxidu železa a strusky. [4]



Obrázek 2 - Schéma řezání kyslíkem [5]

Jako hořlavý plyn se nejčastěji používá Acetylen, Propan, zemní plyn a MAPP (směs methylacetylenu a propadienu). 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. [1]

Aby bylo možné řezat kov kyslíkem, musí splňovat tzv. podmínky řezatelnosti:

- 1) Při hoření kovu je zapotřebí vyvinout takové množství tepla, aby mohlo být možné krýt ztráty a proces dělení mohl pokračovat.
- 2) Zápalná teplota kovu musí být nižší nebo maximálně stejně vysoká, jako teplota tavení řezaného kovu.
- 3) Teplota tavení oxidů musí být nižší než teplota tavení řezaného materiálu.
- 4) Je zapotřebí, aby zplodiny hoření (oxidy) byly dostatečně tekuté.

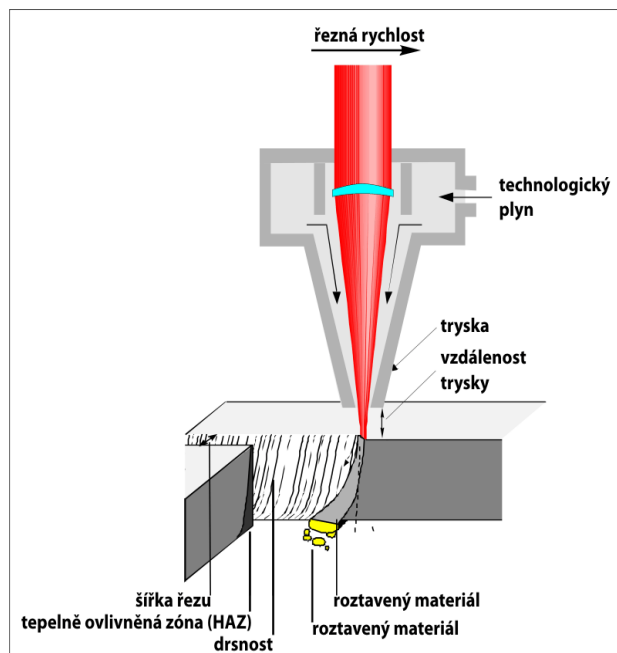
Díky těmto podmínkám můžeme kyslíkem dělit nelegované a podmíněně i nízkolegované oceli. Nelegované oceli lze řezat kyslíkem do tloušťky i více než 1000 mm, avšak dobrou kvalitu řezu lze zaručit, komerčně prodávanými zařízeními, do tloušťky cca 300 mm. Za optimálních podmínek je možné dosáhnout rychlosti řezu až $800 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Tato rychlost je, ale v porovnání s ostatními metodami dělení, zejména dělením laserem a plazmou, velmi nízká. Je tedy zřejmé, že dělení kyslíkem se využívá především tam, kam rozsah ostatních metod a technologií nedosahuje. Tato metoda se využívá především na dělení nelegovaných ocelí velkých tlouštěk (tzn. především tloušťky nad 150 mm) a lze použít jak v ruční, tak i ve strojní podobě.

Oblast použití kyslíkového dělení lze rozšířit metodou kyslíkového řezání s přídavkem prášku. Principem je přívod železného prášku samostatnou trubičkou do proudu řezného kyslíku. Existují však i řezné trysky, které v sobě mají kanálek pro přímý přívod prášku do plamene hořáku. Železný prášek podporuje exotermickou reakci za vzniku oxidů železa, které pomáhají ředit vznikající těžkotavitelné oxidy řezaného materiálu. Touto metodou lze dělit vysokolegované oceli, litiny a neželezné kovy. [6] [7]

2.1.3. Řezání laserem

Základem této technologie pro řezání je zdroj laserového paprsku. Optickým kabelem nebo systémem zrcadel je paprsek přiveden od zdroje do řezací hlavy. Poté se v řezné hlavě zaostří (fokusuje) paprsek do přesně definovaného ohniska, které se před tím nastaví podle typu a tloušťky řezaného materiálu. Materiál je následně řezán působením soustředěné energie laserového paprsku. Řezán může být několika způsoby:

- Oxidační řezání – řezaný materiál je taven a spalován za přítomnosti asistenčního plynu (kyslíku). U vzniklých řezů můžeme pozorovat patrné známky oxidace.
- Tavné řezání – řezaný materiál je taven. Spára, která vzniká při řezání je profukována inertním plynem (např. dusík). Tímto způsobem docílíme čistých nezoxidovaných lesklých řezů.
- Sublimační řezání – řezaný materiál je taven a zároveň odpařován. [8]



Obrázek 3 - Princip laserového řezání [9]

Tato technologie zajišťuje vynikající kvalitu řezu a vysokou produktivitu pro různé druhy materiálů. V dnešní době se v průmyslu používají především pevnolátkové a plynové lasery. Průmyslové lasery můžeme rozdělit na:

- 1) Pevnolátkové
- 2) Plynové

Aktivní prostředí má schopnost zesilovat záření, které jím prochází kvůli stimulované emisi. Hlavní charakteristika laserových paprsků je vlnová délka, kterou určuje druh daného aktivního prostředí.

Materiál pohlcuje efektivně laserové záření pouze s určitou vlnovou délkou. Nejvíce využívané vlnové délky jsou:

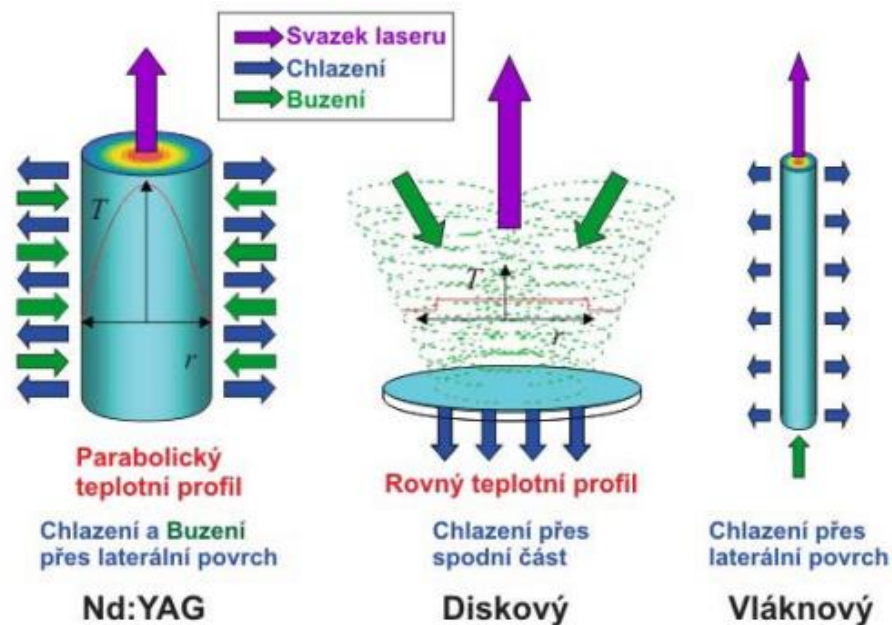
- Vlnová délka 1064 nm – pro dva typy pevnolátkových laserů (vláknový laser a pevnolátkový Nd:YAG laser).
- Vlnová délka 10 600 nm – pro plynový CO₂ laser.

Záření o vlnové délce 1064 nm se využívá pro řezání různých typů kovů, které mají v této oblasti vlnových délek vysokou absorpci záření. Než se zlevnily vláknové lasery, používaly se k řezání kovů i CO₂ lasery, které však mají větší vlnovou délku a proto byl zapotřebí k dosažení požadovaného efektu, mnohem větší výkon. Využití této vlnové délky k řezání plastů není úplně vhodné, protože může docházet k lokálnímu zčernání povrchu plastu.

Při použití vlnové délky 10 600 nm lze účinně řezat nejenom ocel, ale především organické látky, jako je dřevo, keramika nebo polymery. Využití CO₂ může být o něco náročnější, protože laserový svazek je veden pomocí soustavy zrcadel, které jsou náročnější na údržbu. Kvalitou řezu však můžou tyto lasery, i v dnešní době, konkurovat laserům vláknovým. [10]

V současnosti se používají hlavně tyto tři typy pevnolátkových laserů:

- Tyčové Nd:YAG lasery
- Diskové lasery
- Vlákňové lasery



Obrázek 4 - Rozdílné typy aktivního prostředí u pevnolátkových laserů [11]

Aktivní prostředí u těchto laserů je tvořeno pevnou látkou především v podobě krystalů, oxidů či skel. U pevnolátkových laserů je buzení nejčastěji optické. Pro řezání se využívají lasery s výkonem od 200 W do 5 kW.

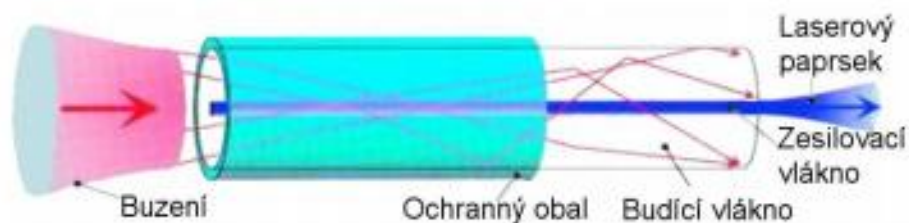
- Nd:YAG :
Jedná se o poměrně častého představitele pevnolátkových laserů. Jeho aktivní prostředí tvoří pevné krystaly z materiálu YAG (yttrito-hlinitý-granát), dopované ionty neodymu (Nd).

- Diskový laser:

Tento laser je jednou z modifikací Nd:YAG laseru. Podle typu aktivního prostředí je laserový paprsek vytvářen s různou vlnovou délkou, Nd:YAG má vlnovou délku 1064 nm, další typy mohou vyzařovat paprsek až v oblasti UV záření. Aktivní prostředí je ve tvaru disku (viz obr. 4), díky čemuž má mnohem lepší schopnost chlazení a dosahuje tak vyšší účinnost.

- Vlákňové lasery:

Tato laserová technologie, je díky svému širokému využití, považována za velmi perspektivní. Aktivní prostředí zde není tvořeno pevnolátkovým krystalem, ale optickým vláknem, které tvoří také vedení laserového paprsku a dochází v něm k buzení a vytváření laserového paprsku. Výhoda optického vlákna je jeho délka, která může být i několik desítek metrů dlouhá a tím dochází k zesilování paprsku.



Obrázek 5 - Zjednodušené schéma vlákňového laseru [11]

Aktivní prostředí u plynových laserů je tvořeno plynem nebo směsicí plynů. Nejpoužívanějším představitelem z této kategorie bývají CO₂ lasery, dále se využívají excimerové či Helium – neonové lasery. Plynové lasery bývají nejčastěji kontinuální, ale v ojedinělých případech lze vidět použití i v pulzním režimu.

CO₂ laser je jedním z nejstarších používaných laserů v průmyslu. Tento typ laseru je jeden z nejvýkonnějších (až 20 kW) a díky svým vlastnostem velmi rozšířený. Využívá se hlavně při zpracování plechů, kde je díky své vlnové délce 10600 nm a možnosti řezání oceli skoro nenahraditelný. Nevýhodou této vlnové délky je vedení laserového paprsku, kdy nelze použít vlákno, které se velmi často používá na robotické aplikace.

Záření u excimerových laserů se pohybuje v ultrafialové oblasti od 157 do 351 nm. Kvůli tomu, že jsou tyto vlnové délky velmi dobře absorbovány i ve vzduchu, je nutné pracovat s touto vlnovou délkou ve vakuu. Aktivní prostředí je směs plynů (xenon a argon), které určuje vlnovou délku záření. Buzení elektrickým výbojem způsobuje, že se molekuly plynu do stanou do excitovaného stavu.

Jako aktivní prostředí pro kapalinové lasery se využívají roztoky organických barviv. Tento typ laseru má velkou výhodu v nastavení vlnové délky od 300 nm do 1500 nm, avšak v průmyslové oblasti není příliš rozšířen. [12]

2.2. Značení metod tepelného dělení podle normy ČSN EN ISO 4063

Značení metod tepelného dělení lze nalézt v mezinárodní normě ČSN EN ISO 4063. Tato norma obsahuje přehled metod svařování, pájení a příbuzných procesů a jejich číselné označení. Norma zahrnuje hlavní skupiny metod (svařování, tepelné dělení a pájení), které se označují jednou číslicí. Dále pak norma zahrnuje i skupiny (druhá číslice) a podskupiny (třetí číslice) těchto metod. Z toho vyplývá, že číslo metody může mít maximálně tři číslice. Tento systém slouží jako pomůcka pro označování metod v písemné dokumentaci, na technických výkresech, pracovních podkladech, stanovení postupů svařování atd.

V přílohách této normy lze nalézt i některé metody svařování, které již nejsou všeobecně používány a jsou považovány za zastaralé. Součástí této normy je také označení, které se obvykle používá v USA. [13]

Tabulka 1 - Značení metod tepelného dělení [13]

Metoda	Značení dle ČSN EN ISO 4063	Anglické značení metod
Řezání plazmou	83	PBC (plasma beam cutting)
Řezání kyslíkem	81	FOC (fuel oxygen cutting)
Řezání laserem	84	LBC (laser beam cutting)

2.3. Výhody a nevýhody vybraných metod tepelného dělení

Tabulka 2 - Výhody a nevýhody vybraných metod tepelného dělení

Metoda	Výhody	Nevýhody	Maximální tloušťka řezaného materiálu
Řezání plazmou	Řezání všech el. vodivých materiálů, řezání vysokolegované oceli a hliníkových materiálů ve střední a větší tloušťce, vysoká řezná rychlost, vynikající schopnost dělit slabé a střední tloušťky oceli (do 30 mm), velmi dobrá automatizace	Omezené použití do tloušťky 160 mm (180 mm) při suchém řezání a do 120 mm při řezání pod vodou, mírně širší řezná spára, relativně vysoká spotřeba energie, problémy s kolmostí řezu [14]	Až 180 mm, běžně 25-50 mm
Řezání kyslíkem	Vhodné pro dělení středně velkých a velkých tlouštěk materiálů, nízké investiční a spotřební náklady, ekonomické využití několika hořáků	Primárně vhodné pro řezání pouze měkkých, nelegovaných a nízkolegovaných ocelí s hmotnostním podílem C do 1,6 %, vysoký přívod tepla, velká tepelně ovlivněná oblast, pokud je tloušťka plechu menší než 5 mm vznikají nekvalitní řezy, nízká řezná rychlost [15]	Do 2000 mm, běžně do 300 mm
Řezání laserem	Vysoká přesnost řezaných dílů u malých a středních tlouštěk materiálů, řezání velmi malých otvorů, pravouhlá řezná hrana, dobrá automatizace, malá šířka řezné spáry (0,2 - 0,4 mm), vysoká řezná rychlost u tenkých materiálů	Vysoké investiční provozní náklady, Omezená tloušťka materiálů: konstrukční ocel 25 mm, vysokolegovaná ocel 15 mm, Nutné přesné řízení vzdálenosti k povrchu obrobku [16]	Do tloušťky 25 mm

3. Historie plazmového řezání

Historie plazmového řezání sahá do konce 50. let minulého století. Tehdy byly poprvé použity jednoduché vysoce výkonné plazmové systémy. První patent získala společnost Union Carbide Corporation. Společnost Thermal Dynamics později vylepšila tento proces o technologii dvojplynového dělení ("Dual flow"). K uříznutí materiálu tlustého půl palce (1,27 cm), bylo tehdy zapotřebí přes 350 A.

V dnešní době nám k tomu postačí pouze 50 A. Prakticky všechny řezy vyžadovaly broušení, aby došlo k odstranění nečistot. Kvalita řezu na uhlíkové oceli byla velmi nízká. Od té doby prošlo plazmové řezání řadou inovací, které budou dále uvedeny v datech:

1968 – Společnost Hypertherm vynalezla technologii dělení plazmovým obloukem se vstřikováním vody. Výhodou byla vyšší rezná rychlost, méně nečistot a delší životnost.

1972 – Vynalezení metody dělení plazmovým obloukem s vodní clonou. Vodní hladina v tomto případě slouží k zachycení horkých částic kovu. Vodní štít, který obklopuje plazmový hořák, slouží k redukci hluku a eliminuje vzniklý kouř.

1985 – Nízkonákladové vzduchové plazmové systémy se stávají populárními, díky vylepšené technologii napájení.

1987 – V tomto roce byl vyvinut tzv. "Contact Start" systém, který dokázal snížit náklady na vzduchové plazmové systémy a úplně eliminovat rušení elektrickým šumem, které bylo spojováno s vysokofrekvenčními plazmovými startovacími systémy.

1992 – Tento rok je považován za jeden z nejlepších roků v historii plazmového řezání. V tomto roce byly představeny hned tři důležité technologie: technologie řezání kyslíkem s dlouhodobou životností, technologie vířivé trysky s vysokým průtokem a technologie "High Definition" plazmy. Všechny tyto technologie způsobily revoluci v plazmovém řezání. Díky těmto technologiím se snížily provozní náklady, výrazně se zlepšila ostrost hran a celková kvalita.

1996 – Vznikl automatizovaný systém řízení toku plynu, který byl schopen se propojit s CNC stroji. To mělo za následek, snížení počtu chyb při manuálním nastavování parametrů obsluhou stroje.

1996 až 2006 – V tomto období došlo ke zlepšení kvality řezu, produktivity a automatizaci mnoha parametrů rezného procesu. To zahrnovalo např. CAM software, plazmové zdroje nebo řízení toku plynů.

V současné době se plazmové řezání stále vyvíjí. V dnešní době si už řezací stroje dokáží dle zadané tloušťky a typu materiálu sami zvolit optimální rezné podmínky nebo dokáží v průběhu procesu automaticky regulovat množství plynu. [17]

4. Proces plazmového řezání [18]

Řezání plazmovým obloukem je proces tepelného dělení, který využívá zúžený, přenesený plazmatický oblouk k řezání širokého spektra kovů, jako je konstrukční ocel, legovaná ocel, hliník, měď a jejich slitiny. I když existuje několik různých variací tohoto procesu, základní principy a nezbytné komponenty zůstávají vesměs stejné. Základní proces řezání plazmovým obloukem zahrnuje následující fáze:

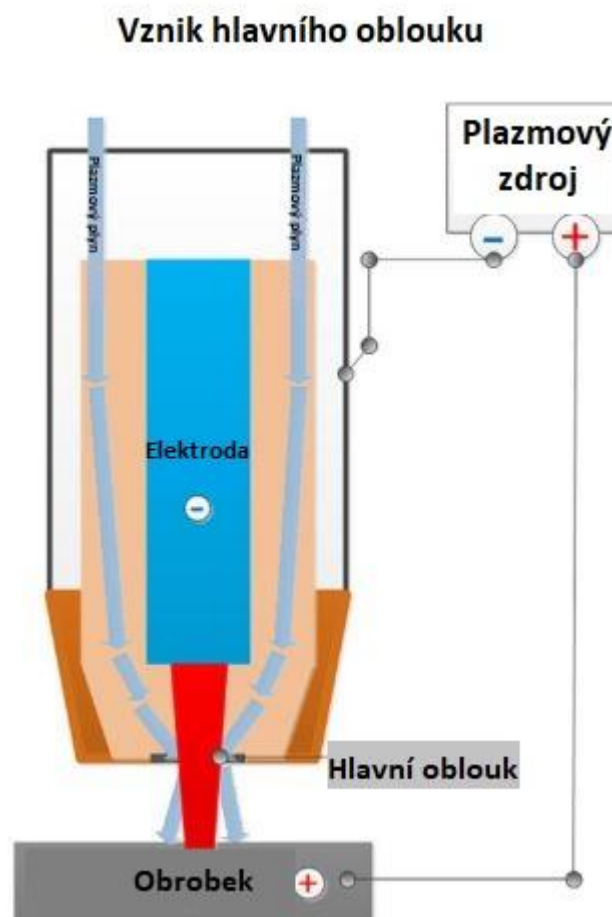
- Vznik startovacího (pilotního) oblouku
- Vznik hlavního oblouku
- Lokalizované zahřívání a tavení
- Vyfukování materiálu
- Pohyb oblouku

4.1. Vznik startovacího oblouku

Proces začíná u zdroje energie, který vygeneruje až 400 V stejnosměrného napětí bez zátěže. Toto napětí zajistí přívod stlačeného plazmového plynu do sestavy plazmového hořáku, který obsahuje elektrodu a plazmovou trysku. Přivedením záporného napětí ze zdroje na elektrodu, vznikne katoda startovacího oblouku. Následně zdroj napětí uzavře obvykle otevřené kontakty obvodu trysky, přičemž dočasně umístí na trysku kladné napětí. Tryska poté slouží jako anoda startovacího oblouku. Oblouková spouštěcí konzole pak vytváří vysokofrekvenční vysokonapěťový potenciál mezi elektrodou a tryskou, která vytváří vysokofrekvenční jiskru. Jiskra následně ionizuje plazmový plyn, který se stane elektricky vodivým a vytváří tak nízkoproudovou cestu mezi elektrodou a tryskou. Podél této proudové cesty se vytváří počáteční nízkoenergetický oblouk (pomocný startovací oblouk – tzv. pilotní oblouk).

4.2. Vznik hlavního oblouku

Vytvořený startovací oblouk proudí společně s plazmovým plynem skrz otvor trysky směrem k uzemněnému elektricky vodivému obrobku, který částečně ionizuje oblast a vytváří novou proudovou cestu s nízkým odporem. Jak proud plynu tlačí startovací oblouk dále skrz otvor, dojde nakonec ke kontaktu oblouku s obrobkem a oblouk se automaticky přenesse na řezaný kus materiálu. Tento přenos vytváří hlavní (plazmový) oblouk, který provádí skutečnou operaci řezání. Přenos oblouku má také za následek, že se obrobek spolu s elektrodou stanou součástí nově vytvořeného obvodu hlavního oblouku. Následně po přenosu oblouku, zajistí zdroj energie znovu otevření běžně otevřených kontaktů trysky, odpojením trysky z obvodu startovacího oblouku. Poté dojde v hlavním oblouku ke zvýšení proudu na optimální řeznou hodnotu.



Obrázek 6 - Schéma vzniku hlavního oblouku [18]

4.3. Lokalizované zahřívání a tavení

Ionizovaný plyn spolu s hlavním obloukem proudí skrz otvor trysky, čímž dochází k jejich stlačení, což má za následek zvýšení hustoty a rychlosti plazmatu. Plazma, kterou vytvářejí plazmové řezací stroje, může dosáhnout teploty až 20 000 °C a její rychlost směrem k obrobku může být až třikrát větší než rychlost zvuku. Tato tepelná a kinetická energie se využívá k řezání. Jakmile plazma dopadne na povrch obrobku, materiál obrobku absorbuje tepelnou energii oblouku a plazmového plynu. Tím dojde ke zvýšení vnitřní energie a vytvoření tepla, což oslabuje materiál a umožňuje jeho odstranění za účelem dosažení požadovaných řezů.

4.4. Vyfukování materiálu

Materiál obrobku je vytlačen z řezu kinetickou energií použitého plazmového plynu. Optimální průtok plazmového plynu určuje proud a tryska. Příliš nízká nebo naopak příliš vysoká hladina plazmového toku může vést k méně přesným řezům a selhání komponentů.

4.5. Pohyb oblouku

Jakmile je zahájeno zahřívání, tavení a odpařování obrobku, plazmový oblouk se začne ručně nebo automaticky pohybovat po povrchu obrobku, aby došlo k vytvoření celého řezu. V případě ručních plazmových řezacích systémů obsluha ručně zahájí proces a pohybuje hořákem po povrchu, aby došlo k vytvoření požadovaného řezu. U automatických plazmových řezacích systémů je stroj naprogramován tak, aby se hlava hořáku pohybovala optimální rychlostí, což má za následek přesný a kvalitní řez.

5. HD plazma

Celým názvem “High definition class plasma” je automatizovaný proces plazmového řezání, který využívá speciálního tvaru trysky, který zužuje plazmový oblouk a zvyšuje hustotu energie. Díky vyšší energii oblouku dosahuje tento typ plazmy vynikající kvality řezu a ostrosti hrany na materiálech do 50 mm. Tato technologie pracuje s vyššími řeznými rychlostmi a je schopna vytvořit užší řez než konvenční technologie plazmového řezání. Dnešní systémy, které využívají technologii HD plazmy umožňují velmi vysokou úroveň automatizace a jsou určeny pouze pro automatizované aplikace. V moderních systémech odvádí prakticky veškerou práci operátora software CAM, který dokáže téměř sám řídit řezací operace.

U řezání děr a otvorů nedochází při použití HD plazmy k prakticky žádnému zúžení, hrany jsou pravouhlé a bez strusky. Díky zkrácení doby cyklu, umožňuje tato technologie zvýšení úrovně produktivity. Tento systém disponuje plazmovým hořákem, který dokáže nejenom dělit, ale také značit daný materiál. [19]



Obrázek 7 - Řezání HD plazmou [20]

6. Vady řezů a jejich příčiny [21]

Při řezání plazmou, stejně tak jako u jiných druhů tepelného dělení můžou vznikat vady řezu. Nejzávažnější problémy jsou:

- Úhel řezu
- Rovina řezu
- Hrubost povrchu
- Struska

6.1. Úhel řezu

Pokud se stane, že horní rozměr součásti je větší než spodní, jedná se o negativní úhel řezu. To může způsobit například nesprávně nastavený hořák, opotřebované spotřební materiály, příliš nízká řezná rychlost nebo nízké napětí oblouku.

Pokud je však horní rozměr součásti naopak menší než spodní, jedná se o pozitivní úhel řezu. Příčiny vzniku pozitivního úhlu řezu mohou být totožné, jako u negativního úhlu, s tím rozdílem, že problémem může být naopak příliš velká rychlost nebo nesprávné nastavení elektrického proudu.

6.2. Rovina řezu

Problémem, který může nastat v rovině řezu, jsou zaoblené hrany. K tomuto jevu však dochází obvykle pouze při řezání tenkých materiálů o tloušťce menší než 6 mm. Příčinou může být např. příliš velký elektrický proud. Dalším problémem, který může nastat, je podpal horní hrany. To může být způsobeno tím, že se hořák nacházel příliš blízko materiálu.

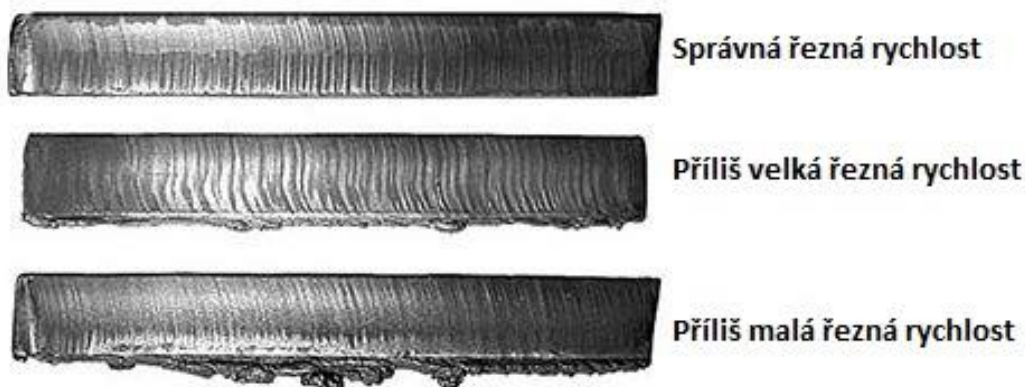
6.3. Kvalita povrchu

Jedním z nežádoucích jevů je hrubost na povrchu řezu. Ta může být zaviněna buď procesem nebo zařízením. Pokud se na ploše řezu vytvoří konzistentní nepravidelnosti, které jsou viditelné jen ve směru jedné osy, vznikly pravděpodobně během procesu. Příčinou pak mohou být opotřebované, poškozené spotřební díly nebo příliš vysoký průtok plynu. Pokud se, ale na ploše vytvoří nekonzistentní nepravidelnosti viditelné převážně ve směru jedné osy, je pravděpodobné, že hrubost byla způsobena pohybem zařízení. Problém pak může být v kolejích (vedení) stroje nebo uvolněných ložiscích.

6.4. Struska

Převážně moderní plazmové stroje umožňují řadu typů řezání, při nichž struska nevzniká. Proto, když se struska na součásti vytvoří, pravděpodobně je „něco špatně“. Pokud je strusky málo a je natavena na spodním povrchu řezané součásti, problém bude nejspíše v příliš velké řezné rychlosti. K odstranění této strusky je většinou zapotřebí broušení. Příliš velká řezná rychlost bude i příčinou strusky ve formě rozstříku na povrchu materiálu. Tu lze však obvykle snadno odstranit.

Pokud se na spodní straně řezu vytvoří velké kapky, které jdou lehce odstranit, viníkem bude naopak nízká řezná rychlost. Je-li struska nekonzistentní a vytváří se na horní i spodní straně součásti, problém bude pravděpodobně v opotřebování spotřebních dílů.



Obrázek 8 - Jak řezná rychlost ovlivňuje kvalitu řezu [22]

7. Strojní zařízení pro dělení plazmou

Moderní strojní zařízení pro dělení plazmou obsahuje výkonný plazmový zdroj, odsávaný pracovní stůl, kompresor, filtraci, řezací strojní hořák a řídicí systém. Proces řezání plazmou je nastavován automaticky podle typu a tloušťky materiálu včetně řízení procesních plynů v různých fázích řezání. Vysoká nosnost ramene stroje dává možnost použití několika suportů, což zvyšuje produktivitu práce. Výkon zdroje udává maximální možnou tloušťku děleného materiálu a má přímý vliv na kvalitu výsledného řezu. Rychlost dělení závisí na výkonu plazmového zdroje, tloušťce a druhu řezaného materiálu a jeho fyzikálních vlastnostech. CNC plazmovou řezačkou se dělí nejčastěji materiály středních tlouštěk, u nelegovaných ocelí nejčastěji do tloušťky 30 mm a u vysokolegovaných ocelí až do tloušťky 100 mm (extrémně až do tloušťky 180 mm). Na efektivitu procesu dělení plazmou má vliv zejména použitý proudový zdroj, konstrukce hořáku a použitý plazmový a vířivý plyn. Nevýhodu těchto strojů může být vyšší hlučnost a vznik většího množství škodlivých emisí, které může být vyřešeno například odsáváním přímo v pracovním stole. [23] [24]

7.1. Plazmový hořák

Všechny plazmové hořáky mají stejné základní komponenty. Tyto komponenty jsou z důvodu omezené životnosti vyměnitelné. Tryska hořáku obsahuje otvor, který slouží k zúžení (fokusaci) plazmy do koncentrovaného oblouku. Velikost průměru otvoru, se pohybuje od 1 do 6,4 mm a udává maximální řezný proud, který může procházet skrz tuto trysku. Čím je otvor větší, tím může skrz něj procházet větší proud. Trysky jsou navrženy tak, aby otvor poskytoval maximální zúžení oblouku. Jejich chlazení je zajištěno buď vodou přes vnitřní průchody nebo jsou chlazeny nepřímo jinými částmi hořáku, které jsou chlazeny vodou nebo plynem. Skrz elektrodu, která bývá nejčastěji zapojena jako katoda, je přiváděn proud do oblouku. Elektroda musí být stejně jako ostatní části hořáku chlazená, protože je ze všech součástí hořáku největším zdrojem tepla.

Chlazení hořáku, který pracuje při menší hodnotě proudu než je 150 A, lze jednoduše zajistit správným vedením plynů používaných při provozu hořáku. Nejčastěji se k tomuto účelu využívá vzduch. Vysoce výkonné systémy vyžadují vodní chladicí systém. [2] [25]

Tělo hořáku tvoří několik vyměnitelných součástí. Úplně navrchu hořáku nalezneme ochranný kryt, který chrání ostatní součásti hořáku před jiskrami a roztaveným kovem. Další důležitou součástí je kryt trysky, který má za úkol chránit trysku a další spotřební materiál a držet tyto součásti pohromadě. Tryskou hořáku proudí inertní plyn, případně vzduch. Součástí trysky je katoda, anodou může být řezaný materiál, pokud je vodivý. V ostatních případech je anoda součástí hořáku. Mezi elektrodami se vytváří elektrický oblouk, který zahřeje proudící plyn na vysokou teplotu, což vede k tomu, že se část plynu přemění na plazmu. K zadní straně katody je připojeno skrz chladicí trubku, chladicí zařízení, které pomáhá odvádět teplo. Součástí hořáku je také vířivý kroužek, který skrz spirálu rozvádí plazmový i chladicí plyn (případně vodu) z řezacího stroje dále do hořáku. [26] [27]



Obrázek 9 - Schéma řezacího hořáku [28]

7.2. Plazmový zdroj

Plazmové napájení přeměňuje jednofázové nebo třífázové střídavé napětí na stálé stejnosměrné napětí v rozsahu od 200 do 400 V. Toto stejnosměrné napětí udržuje v chodu plazmový oblouk po celou dobu řezu. Reguluje také požadovaný výkon na základě typu a tloušťky základního materiálu. Moderní plazmové zdroje splňují nejvyšší nároky na kvalitní řezání a značkování. Zúžením oblouku silně se otáčejícím vířivým plynem lze dosáhnout prakticky bezotřepových a pravoúhlých řezných ploch. Díky velmi vysokým rychlostem řezání a značkování, jsou tyto zdroje ekonomicky velmi výhodné, protože uživatel profituje z nízkých procesních nákladů. Jde o univerzální zařízení, které může být použito na všech běžných CNC řídicích strojích, řezačkách trubek, robotech apod. Moderní zdroje obsahují automatickou plynovou konzoli, což znamená, že plyn může být automaticky regulován přímo z CNC stroje, bez nutnosti zásahu operátora. [29] [30]



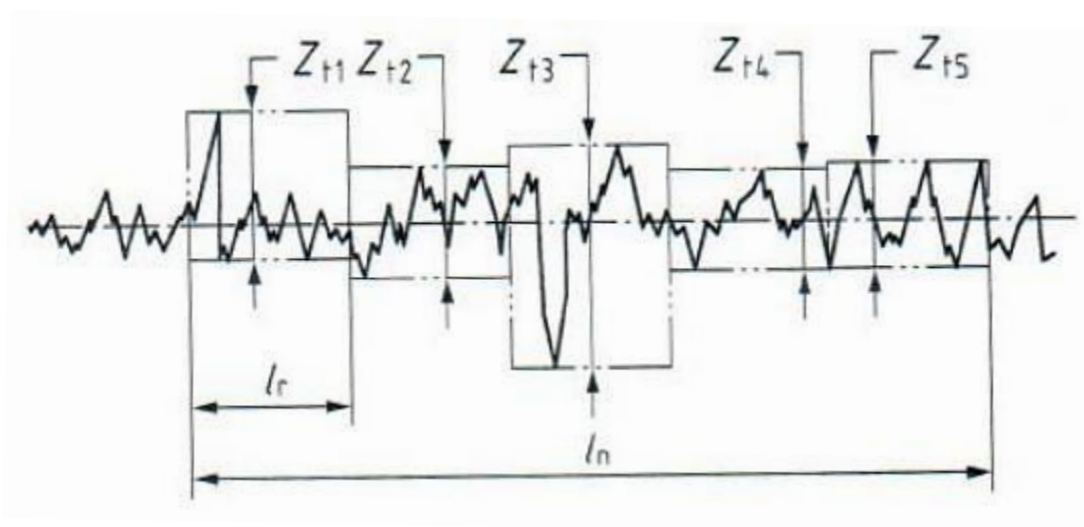
Obrázek 10 - Plazmový zdroj HiFocus 280i neo [31]

8. Kvalita řezu při tepelném dělení

Při tepelném dělení materiálu dochází ke vzniku nežádoucího jevu, čímž je vznik tepelně ovlivněné oblasti. To může mít za následek zejména nárůst tvrdosti na řezné hraně, což může mít nepříjemný vliv na řezání a hlavně na další zpracování řezaných materiálů (např. následné svařování). Proto je potřeba kontrolovat, jestli řezání pomocí tepelného dělení neovlivnilo vzrůst tvrdosti. Problém může nastat zejména u ocelí vyšších pevností. Tuto problematiku popisuje norma ČSN EN 1090-2, která mimo jiné vyhodnocuje kvalitu řezu podle geometrických požadavků a podle ovlivnění tvrdosti řezných hran. Dle této normy se hodnotí následující kritéria:

8.1. Průměrná výška profilů R_{z5} [32] [33]

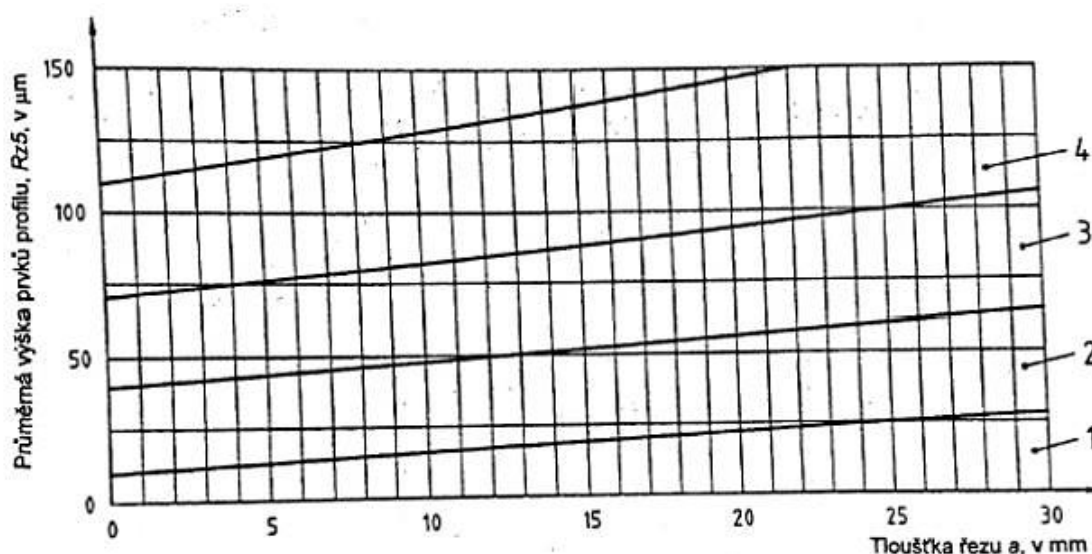
Průměrná výška profilů se musí stanovit dle normy ČSN EN ISO 9013. Tento parametr drsnosti povrchu se měří příčně ke kořeni drážky, přímo na ploše řezu, v délce maximálně 40 mm. V této oblasti se musí provést aritmetický průměr jednotlivých prvků profilu pěti sousedních jednotlivých měření (Z_{t1} až Z_{t5}), aby bylo možné vypočítat průměrnou výšku profilu R_{z5} (viz. obr. 11).



Obrázek 11 - Stanovení průměrné výšky prvků profilu R_{z5}

Tabulka 3 - Toleranční pole pro průměrnou výšku prvků R_{z5}

Toleranční pole	Průměrná výška prvků profilu, R_{z5} μm
1	$10 + (0,6a \text{ mm})$
2	$40 + (0,8a \text{ mm})$
3	$70 + (1,2a \text{ mm})$
4	$110 + (1,8a \text{ mm})$



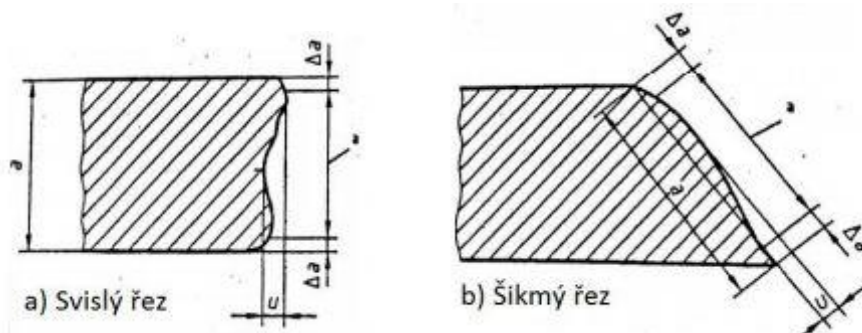
Obrázek 82 - Toleranční pole pro průměrnou výšku prvků profilů R_{z5} pro řezy do 30 mm

8.2. Úchylka kolmosti a úhlu [32] [33]

Úchylka kolmosti a úhlu (u) se stanovuje také v souladu s normou ČSN EN ISO 9013 s ohledem na svislé a šikmé řezy. Úchylka se určuje na reprezentativním místě (nejvyšší naměřené hodnotě, kterou lze očekávat) přímého řezu. Norma zavádí parametr Δa , který je definován, jako zmenšení tloušťky řezaného materiálu (a) na jeho horní a spodní hraně, které není zahrnuto při posuzování parametru u . Velikost parametru Δa je uvedena v normě, v závislosti na tloušťce řezu. Podle příslušné velikosti úchylky (u) je poté daný řez zařazen do tolerančního pole, které udává stupeň kvality řezu. Povrch zkušební vzorku se může před měřením naleptat vhodným prostředkem, aby se docílilo lepšího kontrastu.

Tabulka 4 - Stanovení parametru Δa pro různé tloušťky

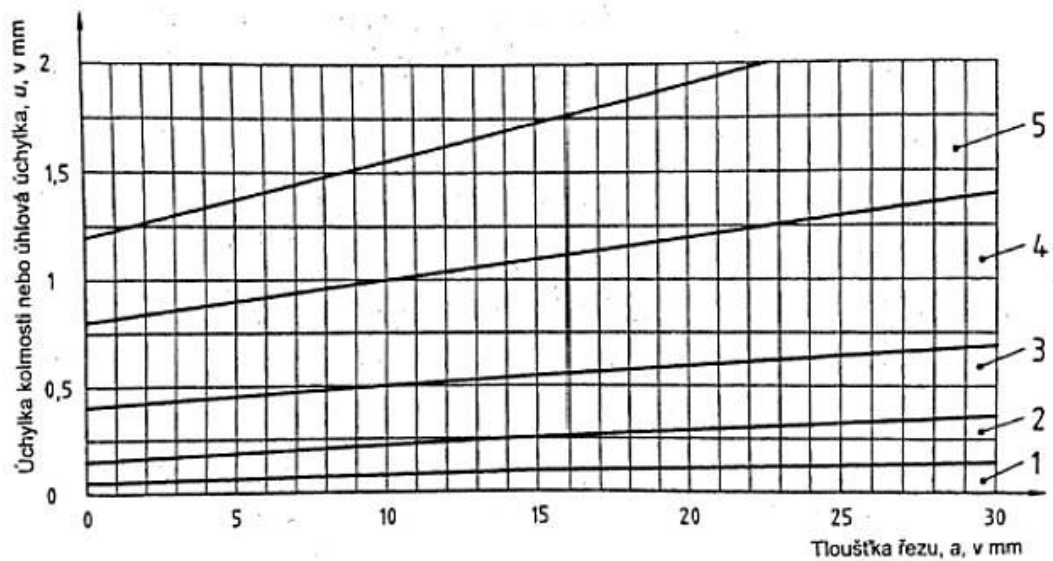
Tloušťka řezu, a mm	Δa mm
≤ 3	$0,1a$
$> 3 \leq 6$	0,3
$> 6 \leq 10$	0,6
$> 10 \leq 20$	1
$> 20 \leq 40$	1,5
$> 40 \leq 100$	2
$> 100 \leq 150$	3
$> 150 \leq 200$	5
$> 200 \leq 250$	8
$> 250 \leq 300$	10



Obrázek 13 - Stanovení úchylek kolmosti a úhlu

Tabulka 5 - Toleranční pole pro velikosti úchylky kolmosti nebo úhlové úchylky u

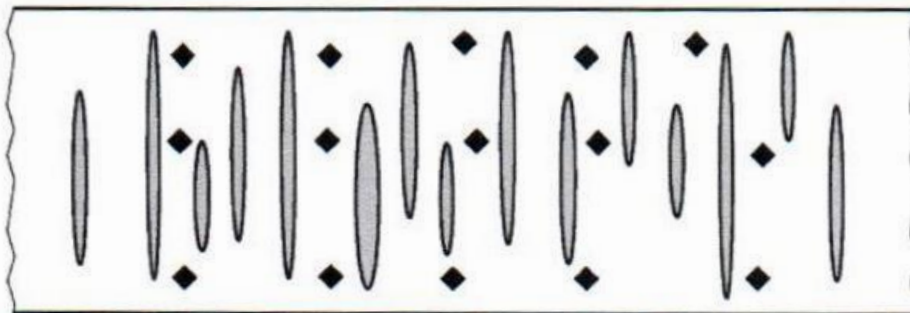
Toleranční pole	Úchylka kolmosti nebo úhlová úchylka, u mm
1	$0,05 + 0,003a$
2	$0,15 + 0,007a$
3	$0,4 + 0,01a$
4	$0,8 + 0,02a$
5	$1,2 + 0,035a$



Obrázek 10 - Toleranční pole pro úchylku kolmosti a úchylku úhlu u pro řezy do 30 mm

8.3. Zkouška tvrdosti [32]

Zkouška tvrdosti musí být provedena v souladu s normou ČSN EN ISO 6507-1. Zkušební kusy musí být rovné a musí mít rovnoběžné kontaktní plochy. Broušení „pálených“ hran je zapotřebí provádět brusnými kotouči se zrnitostí 600. Měření tvrdosti musí být provedeno ve třech oblastech: v blízkosti horního kraje, v blízkosti dolního kraje a ve středu tloušťky plechu (viz obr. 15). V závislosti na tloušťce plechu se musí provést buď 5 nebo 15 měření tvrdosti, které jsou rozloženy na řezu. Během zkoušky se musí dodržet minimální vzdálenost od hran, včetně nataveného povrchu, podle normy ČSN EN ISO6507-1.



Obrázek 115 - Místa měření na broušeném páleném povrchu

Tabulka 6 - Počet a umístění měření tvrdosti podle tloušťky plechu

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

9. Praktická část

V praktické části bakalářské práce byl navržen a realizován experiment, který se zabývá ovlivněním řezných hran po tepelném dělení materiálu z vysokopevné oceli S 960QL, při použití moderního strojního zařízení s výkonným plazmovým zdrojem, kde proces řezání plazmou je nastavován automaticky podle typu a tloušťky materiálu. V průběhu experimentu byla vyhodnocena kvalita řezu, změřením parametrů drsnosti R_{z5} a R_a , úchyly kolmosti u a změna tvrdosti řezných hran. Součástí experimentu bylo také vyhodnocení velikosti tepelně ovlivněné oblasti (TOO) vzniklé po řezání. Naměřené hodnoty byly následně vyhodnoceny dle normy ČSN EN ISO 1090-2.

9.1. Podmínky vyhotovení řezů

K vyhotovení řezů byl použit CNC portálový řezací stroj pro tepelné dělení od firmy Vanad s názvem PROXIMA 20/20. Jako plazmový zdroj bylo použito zařízení firmy Kjellberg s názvem HiFocus 280i neo s automatickou regulací plynů. Základní materiál pro tento experiment byl zvolen plech z vysokopevnostní oceli S960QL o tloušťce 10 mm. K vyhodnocení experimentu byly použity tři vzorky, které byly nařezány třemi různými rychlostmi: 1,6 m/min; 2,1 m/min a 1,1 m/min. Pro všechny tři rychlosti byl použit stejný proud 90 A. Řezná rychlost 1,6 m/min byla použita z toho důvodu, protože se jedná o optimální rychlosti pro zvolenou tloušťku řezu (dle doporučení výrobce řezacího zařízení). Tato optimální rychlost byla porovnána s cca o 30 % vyšší a o 30 nižší hodnotou, aby bylo možné zjistit vliv řezné rychlosti na kvalitu řezu.

9.1.1. Řezací stroj Vanad PROXIMA 20/20

Jde o řezací automatický stroj od firmy Vanad PROXIMA 20/20 pro dělení materiálů kyslíkem a plazmou. Součástí stroje je řídicí a ovládací systém Vanad B&R s oboustranným pohonem portálu, včetně software pro řízení pálicího stroje a protikolizního systému.

Stroj obsahuje jeden samostatný autogenní suport a jeden samostatný plazmový suport včetně plazmového zdroje Kjellberg HiFocus 280i neo (s automatickou regulací plynu) pro kvalitní řez do tloušťky min. 40 mm. Dále stroj disponuje odsávacím a filtračním zařízením (s filtrem pro tepelné dělení kovových materiálů) s objemovým průtokem 5 040 m³/hod a s ochranou proti explozi. Stroj je vybaven odsávaným sekčním stolem 10/20 (rozměr pro plechy 1 000 x 2 000 mm, únosnost stolu odpovídá maximální možné řezací tloušťce materiálu) a sadou spotřebních dílů pro autogenní a plazmové hořáky. Pro praktickou část této bakalářské práce byla použita pouze technologie plazmového řezání, proto se dále budeme zabývat pouze ní. [34] [35]

Tabulka 7 - Technické údaje stroje Vanad PROXIMA 20/20

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



Obrázek 126 - Řezací stroj Vanad PROXIMA 20/20

9.1.2. Plazmový zdroj Kjellberg HiFocus 280i neo

Plazmový zdroj HiFocus 280i neo od německé firmy Kjellberg Finsterwalde je zařízení s automatickou regulací plynů a vysokým výkonem. Jedná se o moderní a vysoce flexibilní zdroj, určený k řezání el. vodivých materiálů v rozmezí tlouštěk od 0,5 mm až po 70 mm (doporučená tloušťka 0,5 – 50 mm). Tento zdroj je uzpůsoben ke kvalitnímu řezání různých typů materiálů, jakými jsou např. konstrukční ocel, korozivzdorná vysokolegovaná ocel, hliník a jeho slitiny apod. Nejvyšší kvalitu řezu a úspornost provozu zajišťuje invertorová technologie společně s hořákem PerCut 451. Součástí dodávky plazmového zdroje HiFocus 280i neo je technologie Contour Cut, což je patentovaná technologie plazmového řezání pro řezání konstrukčních ocelí, která umožňuje řezání malých děr v poměru 1:1 z hlediska průměru otvoru ke tloušťce materiálu. Součástí tohoto zdroje je i doplňková technologie plazmového značení materiálů. [30]

Tabulka 8 - Technické údaje HiFocus 280i neo [30]

Technické údaje:	HiFocus 280i neo
Síťové připojení:	3x 400 V, 50 Hz
Pojistka, pomalá:	T 100 A
Max příkon:	67 kVA (zatěžovatel 100 %)
Řezací proud:	280 A
Značkovací proud:	5 - 50 A
Plazmové plyny:	O_2 , N_2 , vzduch, Ar, H_2 , formovací plyn F5 (95 % N_2 , 5 % H_2)
Vířivé plyny:	O_2 , N_2 , vzduch, formovací plyn F5 (95 % N_2 , 5 % H_2)
Rozměry:	1030 x 680 x 1450 mm
Hmotnost:	422 kg



Obrázek 17 - Plazmový zdroj HiFocus 280i neo

9.1.3. Plazmový hořák PerCut 451

Tento hořák dosahuje vysoké řezné rychlosti při podstatně nižším průtoku plynů. PerCut hořáky mají unikátní systém chlazení kapalinou až po špičku hořáku. To vede k velmi vysoké hustotě energie a výborným výsledkům řezání s velmi úzkými řeznými spárami. Tento hořák obsahuje sadu spotřebních dílů, jako jsou například elektrody, trysky, distanční kroužky apod. pro různé tloušťky a typy materiálů (viz. obr. 9). [30]



Obrázek 18 - Výměna spotřebních dílů u plazmového hořáku PerCut 451

9.1.4. Základní materiál pro experiment

Jako základní materiál byl použit plech z vysokopevnostní konstrukční oceli S960QL o tloušťce 10 mm. Konkrétně se jednalo o ocelový plech od firmy SSAB Strenx 960 E, který splňuje požadavky na tloušťku a jakost oceli S960QL v souladu s normou EN 10 025-6. Tento typ oceli se běžně používá u komplexních nosných konstrukcí. Tato ocel má minimální mez kluzu až 960 MPa, přičemž tato hodnota závisí na tloušťce materiálu. Velká výhoda této oceli je vysoká houževnatost zajišťující dobrou odolnost vůči zlomení a svařitelnost s vynikající houževnatostí a pevností tepelně ovlivněné oblasti. [36] [37]

Tabulka 9 - Mechanické vlastnosti oceli S960QL [36]

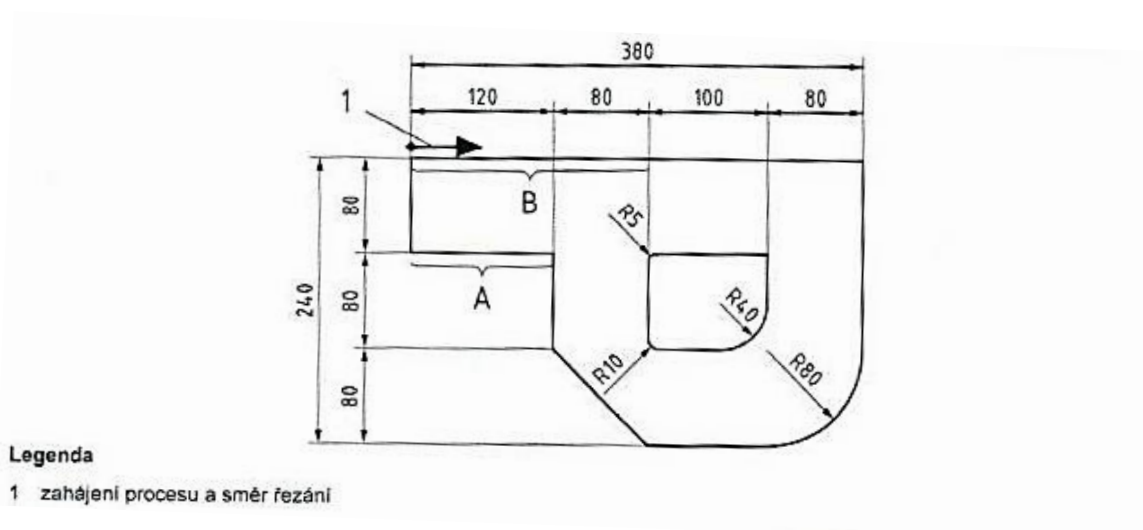
Mechanické vlastnosti			
Označení	Mez kluzu $R_{p0,2}$ [Mpa] pro jemnovitou tl. [mm]	Pevnost v tahu R_m [Mpa] pro jemnovitou tl. [mm]	Tažnost A_5 [%]
	4.0 – 53.0	4.0 – 53.0	
S 960 QL	960	980 - 1150	12

Tabulka 10 - Chemické složení oceli S960QL [36]

Chemické složení (pánevní analýza)										
Označení	Obsah prvků - ve hmotnosti [% max.]									
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Ni	Mo	B
S 960 QL	0,20	0,50	1,60	0,020	0,010	0,80	0,30	2,0	0,70	0,005

9.1.5. Doporučený tvar zkušební vzorku a místa měření [32]

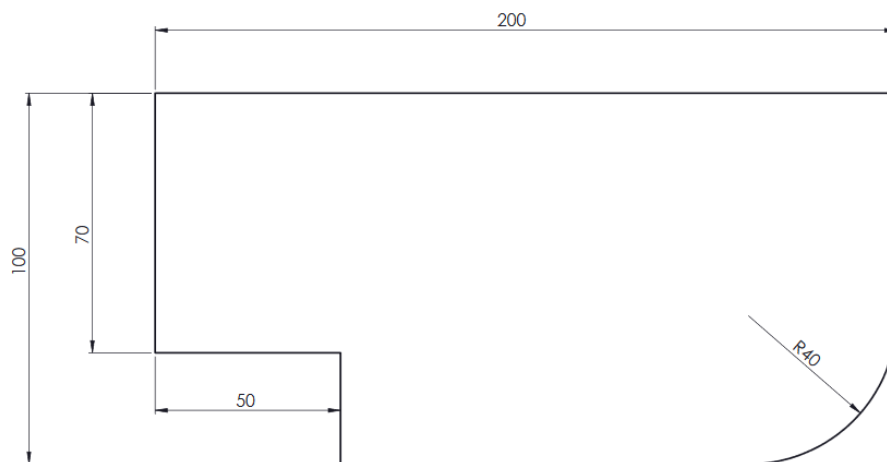
Dle normy ČSN EN 1090-2 musí mít zkušební vzorek řez přímý, ostrého rohového úhlu a zakřiveného oblouku. Hrany řezu u zakřiveného oblouku a ostrého rohového úhlu musí mít srovnatelnou nebo vyšší kvalitu, ve vztahu k úchylce kolmosti a úchylce úhlu. Měření se provádí na přímé ploše B (viz obr. 19) v délce nejméně 200 mm. V oblastech A a B se na každém vzorku měří tvrdost a kontroluje se požadované toleranční pole (viz. obr.19). Zakřivené a ostré rohové oblasti vzorků se kontrolují vizuálně.



Obrázek 19 - Doporučený tvar zkušební vzorku

9.1.6. Výsledný tvar vzorků

Norma ČSN EN 1090–2 uvádí již výše zmíněný doporučený tvar vzorku. Vzhledem k časovým možnostem a dostupným rozměrům plechu, byl tvar zkušební vzorku lehce zjednodušen, nicméně požadavky normy byly zachovány. Výsledný tvar vzorku zahrnuje všechny požadované řezy: přímý řez v délce minimálně 200 mm, řez rohového ostrého úhlu a řez zakřiveným obloukem.



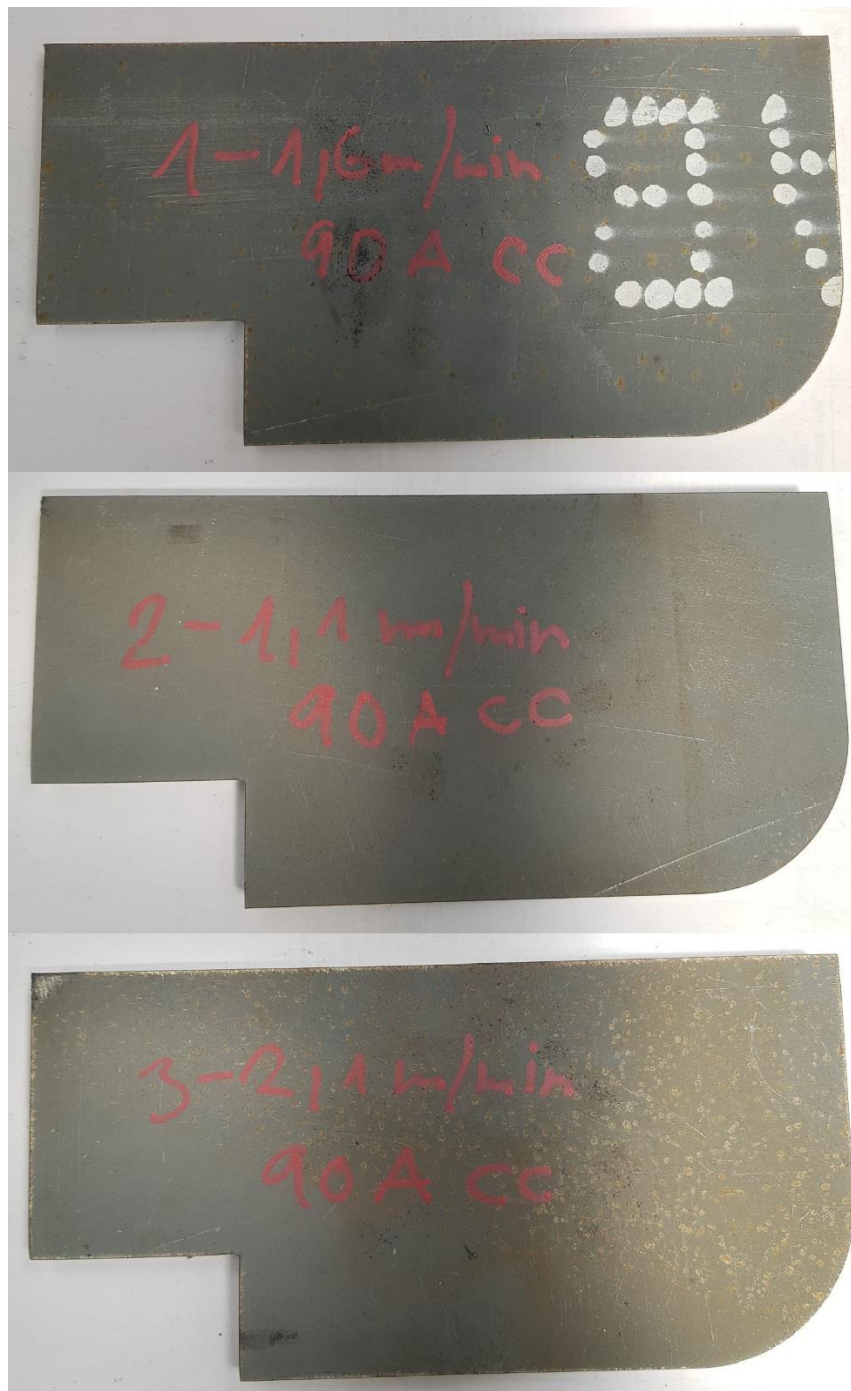
Obrázek 20 - Tvar a rozměry řezaného vzorku (mm)

9.1.7. Popis experimentu

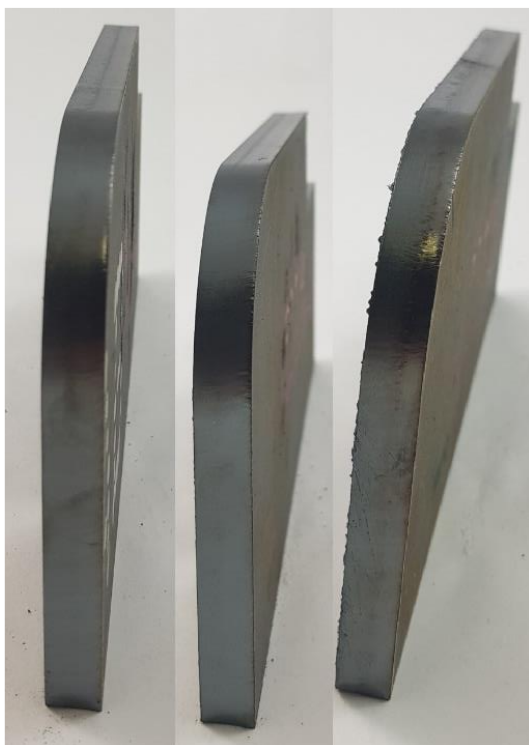
Experiment probíhal v laboratoři Ústavu strojírenské technologie, Fakulty strojní ČVUT v Praze, na již výše zmíněném řezacím stroji Vanad PROXIMA 20/20. Na tomto stroji byly zhotoveny tři vzorky řezů z plechu Strenx 960 E o tloušťce 10 mm. Na každý vzorek byla použita jiná řezná rychlost, a to optimální řezná rychlost 1,6 m/min udávaná výrobcem stroje, rychlost 1,1 m/min a rychlost 2,1 m/min. Důvodem pro použití různých řezných rychlostí, byl záměr zmapovat vliv řezné rychlosti na změnu vlastností řezných hran. Všechny tři vzorky byly řezány technologií Contour Cut pro jemné řezání vnitřních a vnějších obrysů do oceli. [38]

Tabulka 11 - Nastavení pálicího stroje Vanad PROXIMA 20/20

Číslo vzorku	Proud [A]	Řezná rychlost [m/min]	Technologie	Tloušťka materiálu [mm]
1	90	1,6	Contour Cut	10
2	90	1,1	Contour Cut	10
3	90	2,1	Contour Cut	10



Obrázek 21 - Výsledné vzorky



Obrázek 23 - Řez obloukem (1,2,3)



Obrázek 22 - Přímý řez (1,2,3)

9.2. Úprava nařezaných vzorků

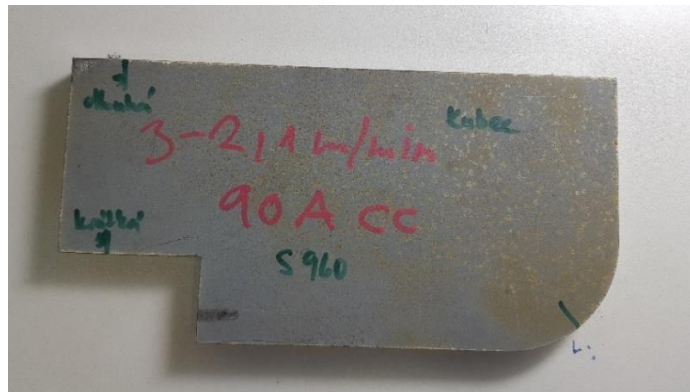
Na spodní straně řezu nebyla prakticky žádná ulpělá struska, proto bylo nutné vzorky pouze lehce okartáčovat ocelovým kartáčem, aby se před měřením zbavily nečistot a oxidů. Následně probíhalo dělení vzorků na metalografické pile, zalisování části vzorků za tepla, broušení a leštění vzorků, leptání a následné opětovné dělení vzorků před měřením tvrdosti z důvodu omezeného rozměru tvrdoměru.



Obrázek 24 - Drátěný ocelový kartáč [39]

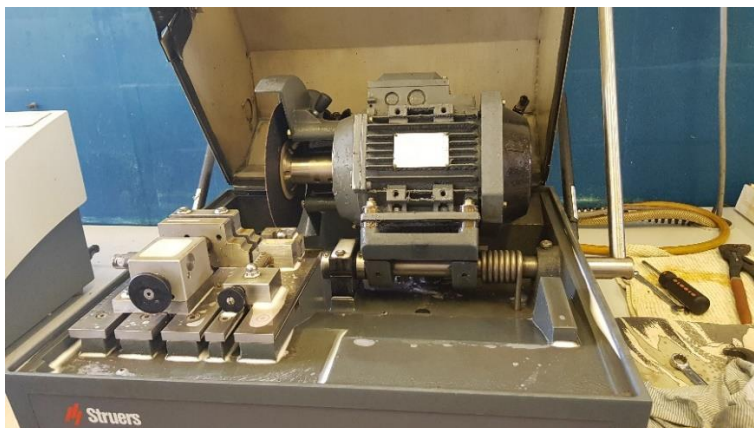
9.2.1. Příprava metalografických vzorků

Pro vyhodnocení velikosti tepelně ovlivněné oblasti a pro stanovení úchylnosti kolmosti řezu byly zpracovány metalografické analýzy vzorků. Pro pozorování tzv. metalografického výbrusu bylo zapotřebí odebrat tři části z každého vzorku: část vzorku na delší straně přímého řezu, na kratší straně přímého řezu a část vzorku zhruba v polovině zaoblení.



Obrázek 135 - Způsob odebrání částí vzorku

Dělení vzorků probíhalo na metalografické pile Struers Labotom 3, která byla chlazená vodou, aby nedošlo k tepelnému ovlivnění vzorku. Použit byl dělicí kotouč Struers 56A25. Zbylé části vzorků byly poté řezány plamenem a následně pásovou pilou (kvůli zamezení vzniku TOO), aby vznikla potřebná velikost zkušebních tělísek pro měření tvrdosti.



Obrázek 157 - Metalografická pila Struers Labotom 3



Obrázek 146 - Řezný kotouč Struers 56A25

Odebrané části vzorků byly následně lisovány za tepla v metalografickém lisu Struers CitoPress-1. Lisovalo se do černé hmoty Multifast, na značení byl použit bílý prášek Clarofast. Vytvrzování probíhalo při teplotě 180 °C a tlaku 250 MPa. Nejprve byly vzorky 4 minuty ohřívány a poté se 3,5 minuty chladily.



Obrázek 168 - Metalografický lis CitoPress-1



Obrázek 179 - Značení zalisovaných vzorků (1,2,3)



Obrázek 3018 - Zalisované vzorky (1,2,3)

Zalisované vzorky bylo následně potřeba brousit a leštit. Broušení a leštění probíhalo na brusce/ leštičce Buehler Phoenix – Beta s automatickou hlavou Vector. Tento proces se skládal z několika kroků.

V prvním kroku byl použit k broušení SiC brusný papír se zrnitostí 180, jako chladicí medium byla použita voda, otáčky brusky byly nastaveny na 300 ot/min, přítlak na vzorek byl 30 N a broušení trvalo 1 minutu.

Ve druhém kroku byly použity stejné brousící podmínky, pouze došlo k výměně brusného papíru na brusný papír SiC se zrnitostí 1200.

Třetí krok byl totožný, ale broušení probíhalo s brusným papírem SiC se zrnitostí 2000.

Ve čtvrtém kroku přišlo na řadu leštění. Leštění probíhalo na leštícím plátně MD Dur a byla použita diamantová leštící suspenze 1 μm . Jako smáčedlo bez vody byl použit MetaDiFluid. Přítlak byl nastaven na 30 N, otáčky přístroje na 150 ot/min a čas leštění na 3:30 min.

V pátém kroku probíhalo leštění za stejných podmínek, pouze bylo použito jiné leštící plátno MD Plus s leštící suspenzí MasterPrep a jako smáčedlo byla použita destilovaná voda. Čas leštění byl změněn na 4:30 min. Po dokončení byly vzorky řádně opláchnuty a usušeny.



Obrázek 191 - Vyleštěné vzorky (1,2,3)



Obrázek 32 - Bruska/Leštička Buehler Phoenix-Beta

Vyleštěné vzorky byly následně leptány pomocí roztoku Nitalu 4% (kyselina dusičná na alkoholové bázi) a poté znovu důkladně vysušeny.



Obrázek 33- Leptání pomocí roztoku Nitalu 4%

9.3. Měření průměrné výšky profilu R_{z5}

Měření průměrné výšky profilů R_{z5} proběhlo na přenosném drsnoměru značky Mitutoyo SJ-301. Průměrná výška profilu R_{z5} byla měřena na kratší a delší straně přímého řezu každého vzorku. Na každé této části vzorku bylo provedeno pět měření, z kterých byla následně vypočtena střední hodnota profilu R_{z5} .



Obrázek 204 - Měření průměrné výšky profilu R_{z5}

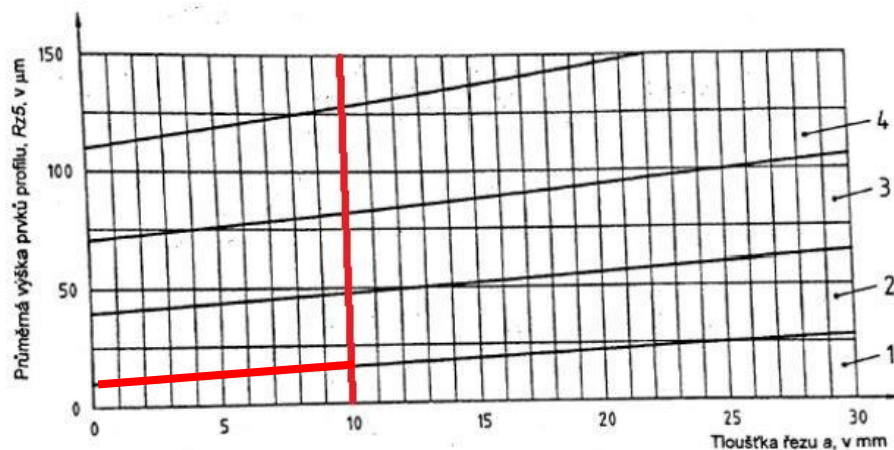
Tabulka 12 - Naměřené hodnoty výšky profilu R_{z5}

Vzorek	Strana	Největší výška profilu R_{z5} [μm]					Průměrná hodnota R_{z5} [μm]
		1. měření	2. měření	3. měření	4. měření	5. měření	
1	D	6,39	6,7	7,1	7,66	6,66	6,90
	K	5,53	5,45	5,36	6,5	5,54	5,68
2	D	5,52	6,1	6,85	6,41	5,97	6,17
	K	6,09	5,25	6,51	6,74	6,49	6,22
3	D	6,2	6,48	6,71	7,09	7,34	6,76
	K	6,67	6,29	5,63	6,94	5,76	6,26

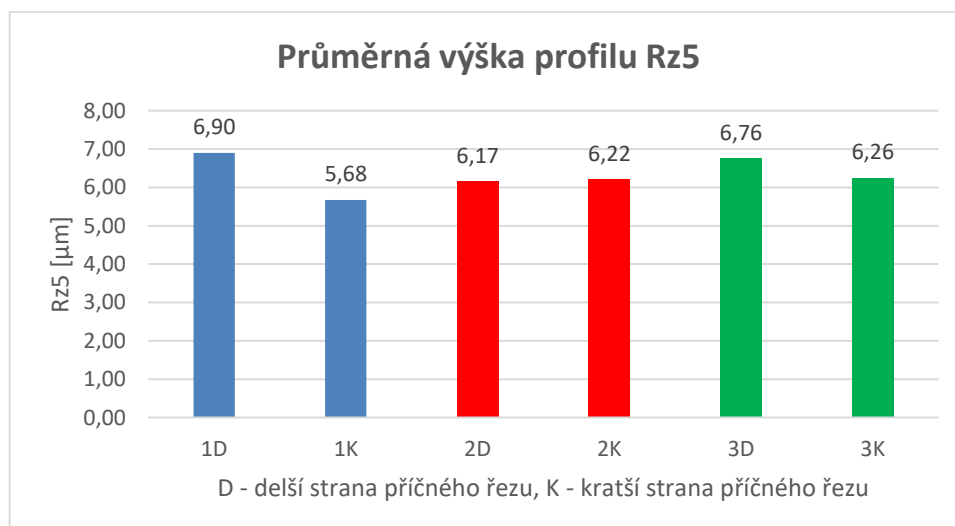
Pozn.: D - delší strana příčného řezu, K - kratší strana příčného řezu

9.3.1. Vyhodnocení průměrné výšky profilu R_{z5}

Všechny hodnoty průměrné výšky profilu R_{z5} se nacházejí v tolerančním poli 1 (viz. obrázek 35). Nejhorší výsledek byl dosažen u vzorku 1 na delší straně přímého řezu, při rychlosti řezání 1,6 m/min, na druhou stranu, nejlepší výsledek byl zaznamenán na témže vzorku na krátké straně přímého řezu Z tohoto pohledu je na tomto vzorku největší rozptyl výsledků.



Obrázek 215 - Vyhodnocení průměrné výšky prvků profilu R_{z5}



Obrázek 226 - Průměrná výška profilu R_{z5}

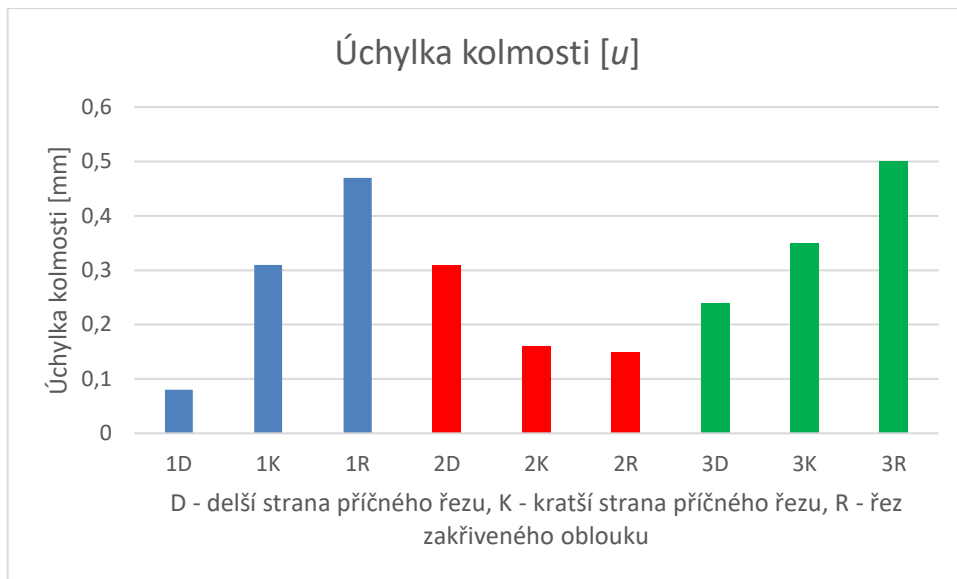
9.4. Měření úchylky kolmosti u

Měření kolmosti řezu bylo provedeno na makroskopu Zeiss Stemi 508 (viz obr. 37), kde byly vyhotoveny makrosnímky zkušebních vzorků. Následně byly ze snímku odečteny úchylky kolmosti u a úhly řezů. Měření kolmosti a úhlu řezu bylo provedeno na metalografických výbrusech delší strany příčného řezu, kratší strany příčného řezu a řezu zakřiveného oblouku. Hodnota úchylky kolmosti se určuje v omezené oblasti povrchu řezu, která je zmenšena o vzdálenost Δa od horní a dolní hrany řezu. Pro tyto vzorky ($t=10$ mm) je Δa rovno 0,6 mm.

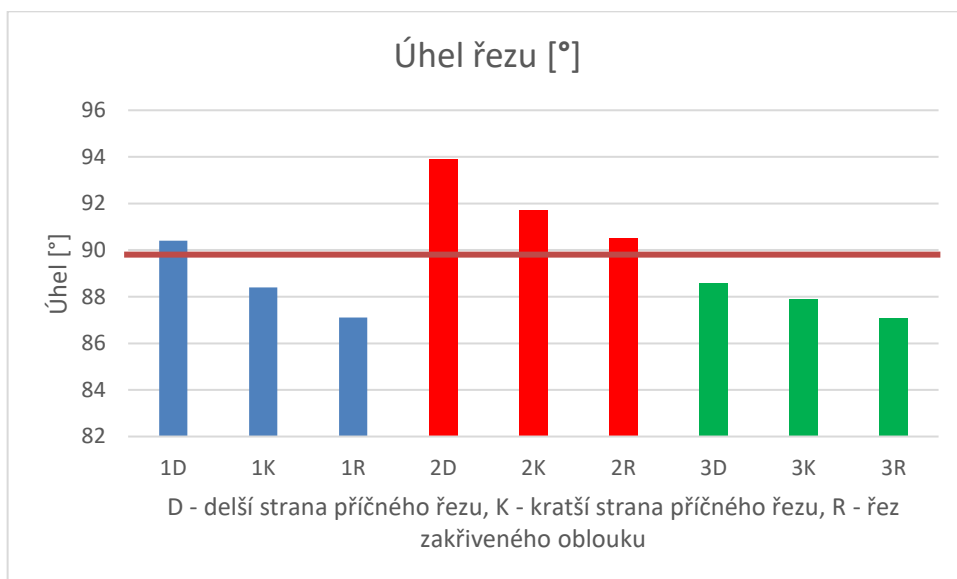


Obrázek 237 - Makroskop Zeiss Stemi 508 [40]

Pokud je hodnota kolmosti řezných hran větší než 90° , jedná se o zúžení řezné mezery. Pokud je hodnota kolmosti menší než 90° , jedná se o rozšíření řezné mezery. Následující grafy zobrazují naměřené hodnoty (viz. obr. 38 a 39). Zajímavé je, že u různých typů řezů při různých rychlostech (mezi vzorky 1,3 a 2) jsou přesně opačné trendy úchylek kolmosti u . Při rychlostech 1,6 m/min a 2,1 m/min byla zaznamenána nejmenší hodnota úchylky kolmosti u na delší straně příčného řezu a největší hodnota na řezu zakřiveného oblouku. Naopak při nejnižší rychlosti 1,1 m/min vyšly hodnoty přesně obráceně.



Obrázek 248 - Úchylka kolmosti u



Obrázek 259 - Úhel řezu

Jak lze odečíst z grafu (viz. obr. 39), všechny úhly řezů u vzorku 2 jsou negativní, což může být způsobeno příliš malou řeznou rychlostí. Naopak u vzorku 3 jsou všechny úhly řezu pozitivní, což může být způsobeno příliš velkou řeznou rychlostí (viz. kapitola 6.1.).

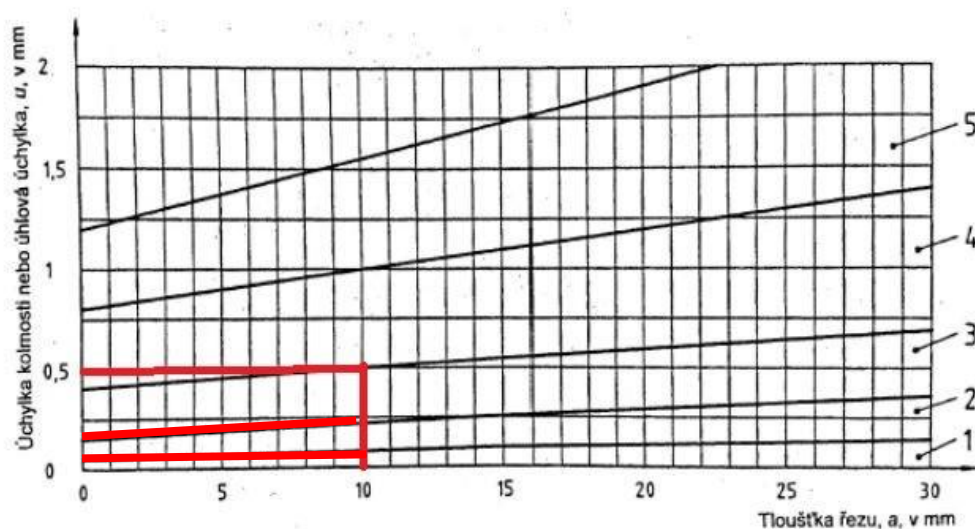
9.4.1. Vyhodnocení úchytky kolmosti u

Úchytky kolmosti řezu byla vyhodnocena a její hodnoty byly přiřazeny do správných tolerančních polí (viz. tabulka 13). Většina úchytek kolmosti u různých typů řezů spadá do tolerančního pole 3. Nejmenší hodnota úchytky kolmosti u byla zaznamenána na delší straně příčného řezu u vzorku 1. Tato hodnota, jako jediná spadá do tolerančního pole 1. Hodnoty u vzorku 2 na kratší straně příčného řezu a na řezu zakřiveného oblouku spadají do tolerančního pole 2.

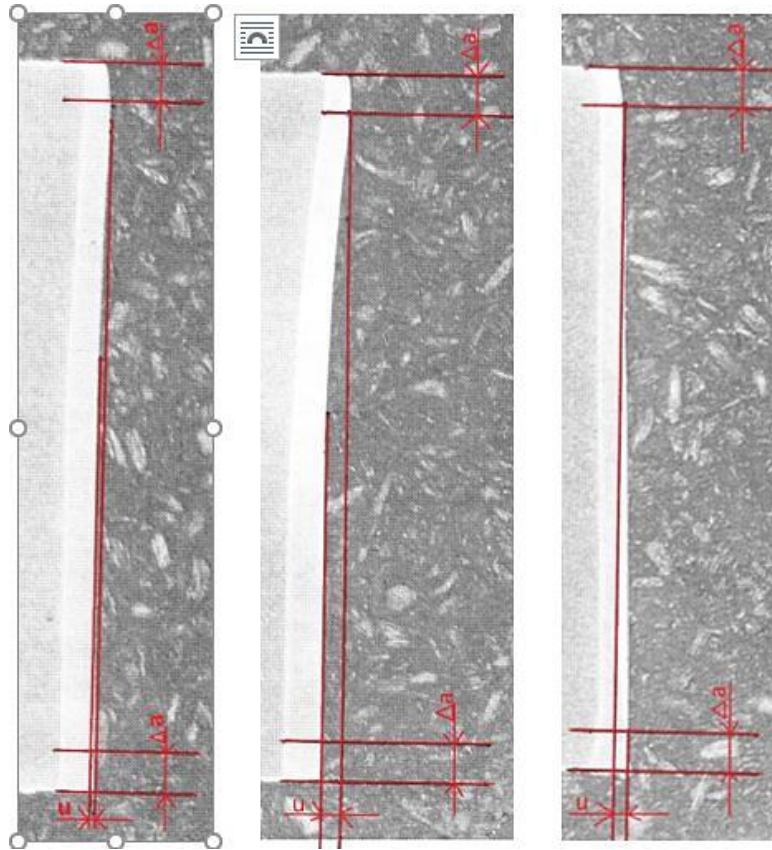
Tabulka 13 - Vyhodnocení hodnot úchytky kolmosti u a úhlu řezu

Vzorek	Strana	Úchytky kolmosti u [mm]	Úhel řezu [°]	Toleranční pole
1	D	0,08	90,4	1
	K	0,31	88,4	3
	R	0,47	87,1	3
2	D	0,31	93,9	3
	K	0,16	88,3	2
	R	0,15	90,5	2
3	D	0,24	88,6	3
	K	0,35	87,9	3
	R	0,50	87,1	3

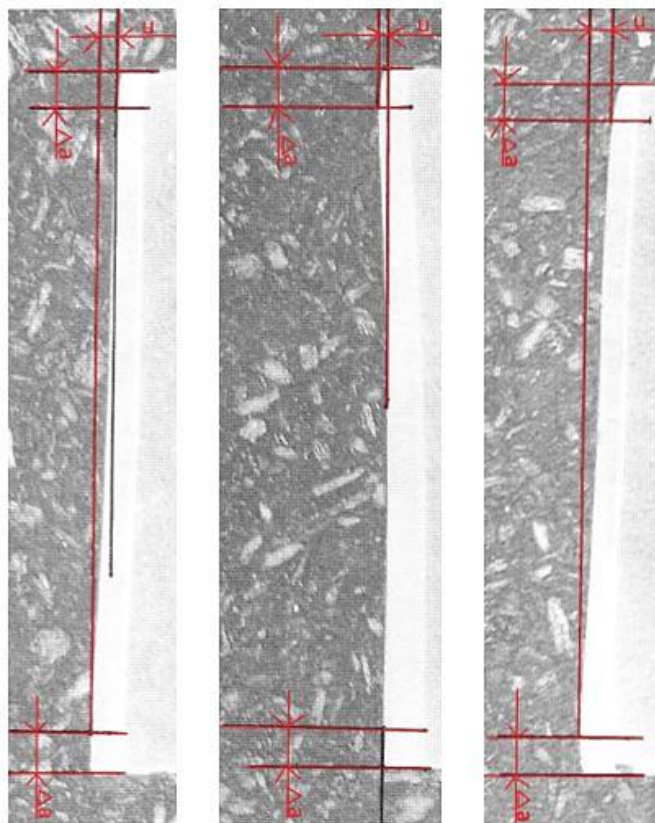
Pozn.: D - delší strana příčného řezu, K - kratší strana příčného řezu, R - řez zakřiveného oblouku



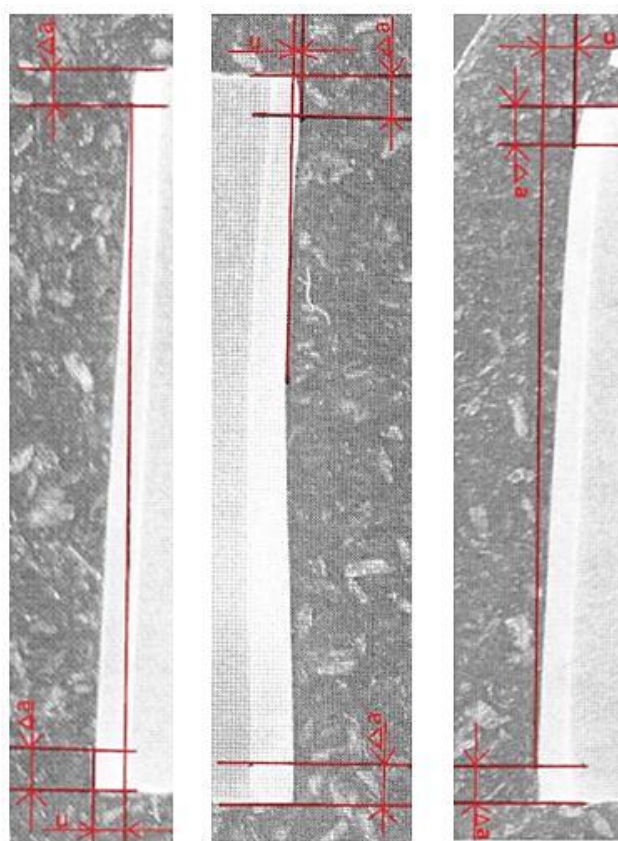
Obrázek 4026 - Vyhodnocení tolerančních polí úchytky u



Obrázek 271 - Úchylka kolmosti u a parametr Δa (vzorek 1D,2D,3D), pozn.: D - delší strana příčného řezu



Obrázek 42 - Úchylka kolmosti u a Δa (vzorek 1K,2K,3K), pozn.: K - kratší strana příčného řezu



Obrázek 43 - Úchylka kolmosti u a Δa (vzorek 1R,2R,3R), pozn.: R - řez zakřiveného oblouku

9.5. Vyhodnocení geometrických požadavků [32]

Hodnoty průměrné výšky profilu R_{z5} u všech vzorků spadají do tolerančního pole 1 a výsledné hodnoty úchylky kolmosti u zkušebních vzorků spadají do tolerančních polí 1, 2 a 3. Na základě těchto výsledků, lze dle tabulky vyňaté z normy ČSN EN 1090-2 vyhodnotit třída provedení EXC (viz. tabulka 14).

Tabulka 14 - Požadovaná jakost řezaných povrchů podle EN 1090-2 a ISO 9013

	Úchylka kolmosti a úchylka úhlu u	Střední výška profilu, $Rz 5$
EXC2	<i>toleranční pole 4</i>	<i>toleranční pole 4</i>
EXC3	<i>toleranční pole 4</i>	<i>toleranční pole 4</i>
EXC4	<i>toleranční pole 3</i>	<i>toleranční pole 3</i>

Z tabulky vyplývá, že vzorky odpovídají třídě provedení EXC 4, splňují tedy vyšší požadavky na jakost.

9.6. Měření tvrdosti

Měření tvrdosti bylo provedeno na tvrdoměru Buehler IndentaMet 1100. K vyhodnocování tvrdosti byla použita metoda podle Vickerse se zatížením HV1. Vzorek byl tedy zatěžován silou 9,807 N po dobu 11 s. Jednalo se tedy o zkoušku tvrdosti při nízkém zatížení. Měření bylo provedeno na kratší a delší straně příčného řezu zkušebního tělíka a na povrchu vzorku.



Obrázek 284 - Tvrdoměr Buehler IndentaMet 1100

Celkem bylo provedeno 15 měření na obou stranách příčného řezu každého zkušebního tělíka. Měření bylo prováděno v 5 osách vzdálených 3 mm od sebe, v každé ose byly změřeny tři hodnoty tvrdosti ve vzdálenosti 1 mm od horního okraje, 1 mm od dolního okraje (9 mm od horního okraje) a ve středu tloušťky plechu.

Tabulka 15 - Průměrné hodnoty tvrdosti řezu

Vzdálenost od řezné hrany (od horního okraje) [mm]	1D [HV1]	1K [HV1]	2D [HV1]	2K [HV1]	3D [HV1]	3K [HV1]	Průměrná tvrdost [HV1]
1	495,6	499,2	577,2	522,5	513,3	521,3	521,5
5	501,9	502,4	530,1	499,3	551,7	536,0	520,2
9	518,5	542,0	568,2	527,3	560,0	511,8	538,0

Pozn.: D - delší strana příčného řezu, K - kratší strana příčného řezu

Na každém povrchu vzorku byly provedeny tři měření, které byly náhodně rozmístěny tak, aby nedošlo k jejich vzájemnému ovlivnění.

Tabulka 16 - Průměrné hodnoty tvrdosti povrchu řezaného materiálu

Vzorek	Tvrdost [HV1]			Průměrná tvrdost [HV1]
	1. měření	2. měření	3. měření	
1	304	357,9	352,8	338,2
2	330,6	340,5	342,4	337,8
3	329,9	334,6	328,7	331,1

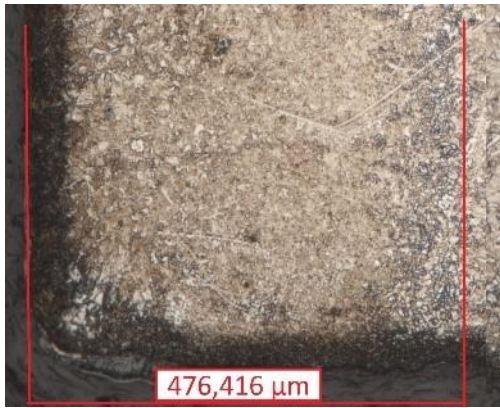
9.6.1. Vyhodnocení tvrdosti [32]

Jak lze odečíst z výše naměřených hodnot tvrdosti, vlivem tepelného ovlivnění došlo k poměrně značnému zpevnění materiálu. Tvrdost na povrchu vzorku se značně liší od tvrdosti na příčném řezu. K nejvýraznějšímu ovlivnění tvrdosti došlo u vzorku 3 na delší straně příčného řezu. Naopak k nejmenšímu ovlivnění došlo u vzorku 1, také na delší straně příčného řezu. Dle normy ČSN EN 1090 by tvrdost volných hran u uhlíkových ocelí \geq S460 neměla být větší než 450 (HV10), což v tomto případě nebylo dodrženo. Je to do jisté míry dáno tím, že ocel S960QL patří do skupiny vysokopevnostních konstrukčních ocelí.

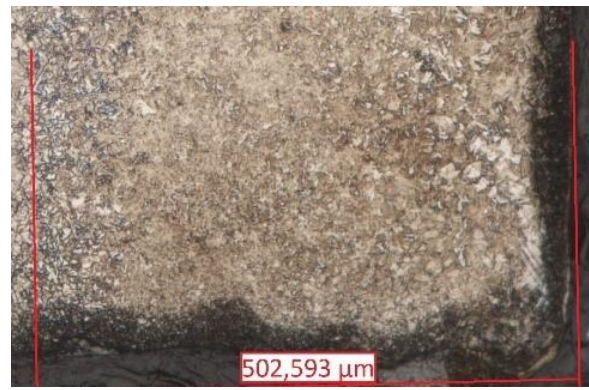
Procesy, u kterých je pravděpodobné, že způsobují místní vytvrzení musí být kontrolovány. Tvrdost volných hran u uhlíkových ocelí \geq S460 nesmí být větší než 450 (HV10).

9.7. Tepelně ovlivněná oblast

Při plazmovém řezání, jako u každého druhu tepelného dělení, vzniká tepelně ovlivněná oblast (TOO). Přivedené teplo způsobuje v blízkosti řezu změnu struktury základního materiálu a jeho vlastností. K vyhodnocení byly použity makroskopické snímky metalografických výbrusů, kde lze vidět rozsah TOO.



Obrázek 306 - Dolní roh – rozsah TOO (1D),
pozn.: D - delší strana příčného řezu



Obrázek 295 - Dolní roh – rozsah TOO (1K), pozn.: K - kratší
strana příčného řezu



Obrázek 317 - Dolní roh – rozsah TOO (1R), pozn.: R - řez
zakřiveného oblouku



Obrázek 339 - Horní roh – rozsah TOO (1D),
pozn.: D - delší strana příčného řezu



Obrázek 328 - Horní roh – rozsah TOO (1K),
pozn.: K - kratší strana příčného řezu



Obrázek 50 - Horní roh – rozsah TOO (1R),
pozn.: R - řez zakřiveného oblouku



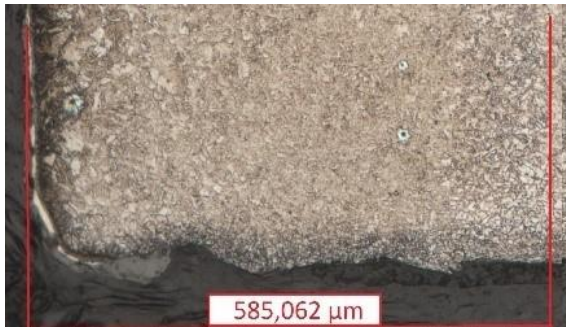
Obrázek 352 - Střed – rozsah TOO (1D),
pozn.: D - delší strana příčného řezu



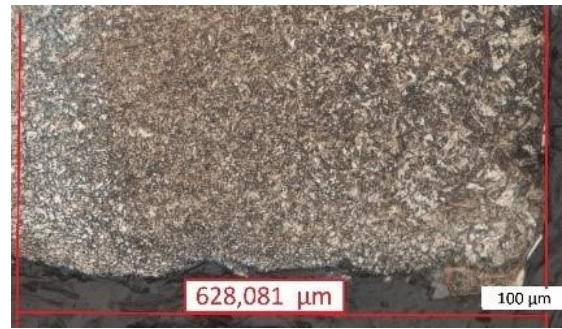
Obrázek 341 - Střed – rozsah TOO (1K), pozn.: K - kratší
strana příčného řezu



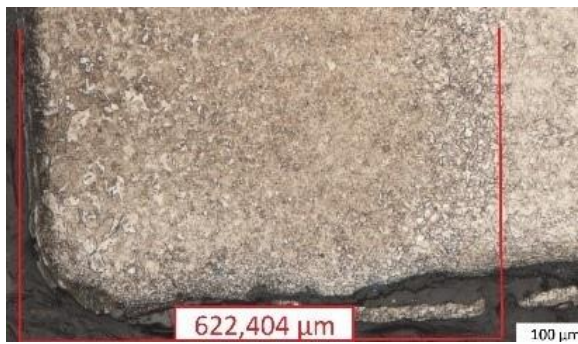
Obrázek 363 - Střed – rozsah TOO (1R), pozn.: R - řez
zakřiveného oblouku



Obrázek 385 - Dolní roh – rozsah TOO (2D),
pozn.: D - delší strana příčného řezu



Obrázek 374 - Dolní roh – rozsah TOO (2K), pozn.: K -
kratší strana příčného řezu



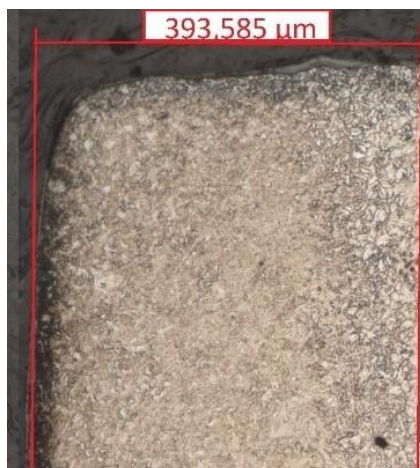
Obrázek 396 - Dolní roh – rozsah TOO (2R), pozn.: R - řez
zakřiveného oblouku



Obrázek 418 - Horní roh – rozsah TOO (2D),
pozn.: D - delší strana příčného řezu



Obrázek 407 - Horní roh – rozsah TOO
(2K), pozn.: K - kratší strana příčného řezu



Obrázek 429 - Horní roh – rozsah TOO (2R), pozn.: R - řez zakřiveného oblouku



Obrázek 441 - Střed – rozsah TOO (2D),
pozn.: D - delší strana příčného řezu



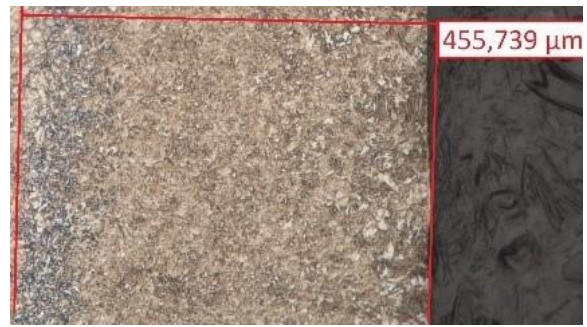
Obrázek 6043 - Střed – rozsah TOO (2R), pozn.:
R - řez zakřiveného oblouku



Obrázek 452 - Střed – rozsah TOO (2K), pozn.: K - kratší strana příčného řezu



Obrázek 474 - Dolní roh – rozsah TOO (3D),
pozn.: D - delší strana příčného řezu



Obrázek 463 - Dolní roh – rozsah TOO (3K), pozn.: K -
kratší strana příčného řezu



Obrázek 485 - Dolní roh – rozsah TOO (3R), pozn.: R - řez
zakřiveného oblouku



Obrázek 507 - Horní roh – rozsah TOO (3D),
pozn.: D - delší strana příčného řezu



Obrázek 496 - Horní roh – rozsah
TOO (3K), pozn.: K - kratší strana
příčného řezu



Obrázek 518 - Horní roh – rozsah TOO (3R), pozn.: R - řez zakřiveného oblouku



Obrázek 7053 - Střed – rozsah TOO (3D), pozn.: D - delší strana příčného řezu



Obrázek 529 - Střed – rozsah TOO (3K), pozn.: K - kratší strana příčného řezu



Obrázek 541 - Střed – rozsah TOO (3R), pozn.: R - řez zakřiveného oblouku

9.7.1. Vyhodnocení tepelně ovlivněné oblasti

Tabulka 17 -Rozsah tepelně ovlivněné oblasti

Vzorek	Strana	TOO [μm]		
		Dolní roh	Horní roh	Střed
1	D	476,416	373,303	461,294
	K	502,593	380,443	463,312
	R	529,580	410,922	500,854
2	D	585,062	366,360	530,342
	K	628,081	430,076	541,712
	R	622,404	393,585	533,686
3	D	491,272	294,943	403,002
	K	455,739	351,074	399,192
	R	535,205	336,705	425,721

Pozn.: D - delší strana příčného řezu, K - kratší strana příčného řezu, R - řez zakřiveného oblouku

Z výše uvedené tabulky vyplývá, že čím je řezná rychlost větší, tím je tepelně ovlivněná oblast menší. To odpovídá teoretickým předpokladům, protože se vzrůstající řeznou rychlostí se bude teplo vnesené do materiálu snižovat. Největší TOO byla naměřena u vzorku 2, který měl nejmenší řeznou rychlost 1,1 m/min (viz tabulka 11). Největší TOO byla vždy zaznamenána u dolního rohu metalografického výbrusu, naopak nahoru směrem k hornímu rohu se tepelně ovlivněná oblast zmenšovala.

10. Závěr

Experiment se zabýval vyhodnocováním geometrických požadavků, konkrétně vyhodnocováním průměrné výšky profilu R_{z5} a úchylky kolmosti u . Nejlepších hodnot u průměrné výšky profilu R_{z5} bylo dosaženo na vzorku 1 na kratší straně příčného řezu. Stejně tomu bylo tak i v případě úchylky kolmosti u , zde však bylo dosaženo nejlepších hodnot na delší straně příčného řezu. Lze tedy konstatovat, že z hlediska geometrických požadavků dopadl nejlépe vzorek 1, který byl řezán optimální rychlostí udávanou výrobcem stroje (1,6 m/min). Výsledné hodnoty byly zařazeny do tolerančních pole 1 (průměrná výška profilu R_{z5}) a tolerančního pole 1,2 a 3 (úchylky kolmosti u). Díky těmto tolerančním polím spadají všechny tři vzorky dle normy ČSN EN 1090-2 do třídy provedení EXC4. Vyhovují tedy vyšším požadavkům na jakost.

Dále se bakalářská práce zabývala ovlivněním tvrdosti řezných hran po plazmovém řezání. Zde došlo u všech tří vzorku k patrnému zvýšení tvrdosti. Oproti povrchu základního materiálu vrostla místy tvrdost až o 240 (HV1). Žádnému ze vzorků ani na jedné části řezu nebyla naměřena menší hodnota, než maximální možná hodnota (450 HV10), kterou udává norma ČSN EN 1090-2. Lze tedy říci, že již dříve zmíněné plazmové řezání ocelového plechu SSAB Strenx 960 E, z tohoto hlediska normě nevyhovuje. Bylo by pravděpodobně nutné před tepelným dělením tuto ocel předehřívat.

Poslední částí, kterou se experiment zabýval, bylo zmapování šířky tepelně ovlivněné oblasti. Zde vyšlo najevo, že velikost TOO je nepřímo úměrná řezné rychlosti. Se vzrůstající řeznou rychlostí se oblast TOO zmenšuje.

Z experimentu bylo zjištěno, že vzorek 1, který byl řezán dle optimálních parametrů řezání (podle výrobce zařízení), splňuje nejlépe geometrické požadavky. Ovšem stejně jako vzorek 2 a 3 nespĺňuje dle ČSN EN 1090-2 požadavky na tvrdost. Dané optimální parametry řezání vedly ke zvýšení tvrdosti průměrně o 55 %, vzhledem k tvrdosti základního materiálu.

Použité zdroje

- [1] MINAŘÍK, Václav. *Tepelné dělení materiálu*. Praha: ČVUT, 1993. ISBN 80-010-1028-7.
- [2] OLSON, David LeRoy, ed. *ASM handbook*. Volume 6, Welding, brazing, and soldering. Materials Park: ASM International, c1993. ISBN 0-87170-382-3.
- [3] The plasma arc cutting process. In: *Twi-global* [online]. [cit. 2020-07-22]. Dostupné z: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/cutting-processes-plasma-arc-cutting-process-and-equipment-considerations-051>
- [4] How Does the Oxy-fuel Cutting Process Work? *Esabna* [online]. [cit. 2020-07-22]. Dostupné z: <https://www.esabna.com/us/en/education/blog/how-does-the-oxy-fuel-cutting-process-work.cfm>
- [5] Diagram of oxyacetylene cutting process. In: *Twi-global* [online]. [cit. 2020-07-22]. Dostupné z: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/cutting-processes-plasma-arc-cutting-process-and-equipment-considerations-051>
- [6] POWELL, John. CO2 laser cutting. London: Springer-Verlag, 1993. ISBN 3540197869.
- [7] Tepelné dělení materiálu kyslíkem. *MMspektrum* [online]. [cit. 2020-07-22]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/tepelne-deleni-materialu-kyslikem.html>
- [8] Laserové řezání planžet: Princip fungování laserového řezání. *Mepac* [online]. [cit. 2020-07-22]. Dostupné z: <https://www.mepac.cz/cz/lasery---sluzby/laserove-rezani-planzet/2/princip-fungovani-laseroveho-rezani>
- [9] Princip laserového řezání. In: *Lao* [online]. [cit. 2020-07-22]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---laserove-rezani-laser-cutting-129>
- [10] Základní rozdělení laserového řezání. *Lascam* [online]. [cit. 2020-07-22]. Dostupné z: <https://www.lascam.cz/zakladni-rozdeleni-laseroveho-rezani/>
- [11] Rozdíly aktivního prostředí. In: *Lascam* [online]. [cit. 2020-07-22]. Dostupné z: <https://www.lascam.cz/rozdeleni-laseru/>
- [12] Rozdělení laserů. *Lascam* [online]. [cit. 2020-07-22]. Dostupné z: <https://www.lascam.cz/rozdeleni-laseru/>

[13] ČSN EN ISO 4063: Svařování a příbuzné procesy – přehled metod a jejich číslování. Praha: Český normalizační institut, 2010.

[14] DONATH, Steffen, ed. Plasma cutting - Function, advantages and disadvantages. *Etmm-online* [online]. 25.06.2019 [cit. 2020-07-22]. Dostupné z: <https://www.etmm-online.com/plasma-cutting-function-advantages-and-disadvantages-a-840857/>

[15] Tepelné dělení materiálu kyslíkem – porovnání s ostatními metodami a praktické aplikace. *Technickytydenik* [online]. 2014 [cit. 2020-07-22]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/tepelne-deleni-materialu-kyslikem-porovnani-s-ostatnimi-metodami-a-prakticke-aplikace_25452.html

[16] Pálení laserem. *SSAB* [online]. [cit. 2020-07-22]. Dostupné z: <https://www.ssab.cz/services/processing-services/laser-cutting#shapeContactAnchor>

[17] COLT, Jim. The evolution of plasma cutting. *Thefabricator* [online]. 2014 [cit. 2020-07-22]. Dostupné z: <https://www.thefabricator.com/thefabricator/article/plasmacutting/the-evolution-of-plasma-cutting>

[18] RONQUILLO, Romina. Understanding Plasma Arc Cutting. *Thomasnet* [online]. [cit. 2020-07-22]. Dostupné z: <https://www.thomasnet.com/articles/custom-manufacturing-fabricating/understanding-plasma-arc-cutting/>

[19] Types of plasma. *Hypertherm* [online]. [cit. 2020-07-29]. Dostupné z: <https://www.hypertherm.com/learn/cutting-education/plasma-technology/types-of-plasma/>

[20] Řezání HD plazmou. In: *Industrial Metal Supply* [online]. [cit. 2020-07-30]. Dostupné z: <https://www.industrialmetalsupply.com/Services/Hi-Def-Plasma>

[21] Jak řešit problémy s kvalitou řezu při řezání plazmou. *ESAB* [online]. [cit. 2020-07-23]. Dostupné z: <https://www.esab.cz/cz/cz/education/blog/how-to-troubleshoot-plasma-cut-quality.cfm>

[22] How cutting speed affects cut quality. In: *Hypertherm* [online]. [cit. 2020-07-23]. Dostupné z: <https://www.hypertherm.com/support/system-support/maintenance-and-use/cut-quality/too-much-dross/>

[23] *T+T Technika a trh: průvodce světem průmyslu* [online]. 26. 2019 [cit. 2020-07-22]. ISSN 1210-5902. Dostupné z: <https://casopis.technikaatrh.cz/tt-10-2019/renishaw-budoucnost-automobiloveho-prumyslu-v-cr>

- [24] Plazmové a autogenní pálicí stroje Vanad. *Vanad* [online]. [cit. 2020-07-22]. Dostupné z: <https://vanad.cz/cs/palici-stroje/nabidka-stroju/plazmove-stroje>
- [25] What is the best plasma torch coolant? *Esabna* [online]. [cit. 2020-07-22]. Dostupné z: <https://www.esabna.com/us/en/education/blog/what-is-the-best-plasma-torch-coolant.cfm>
- [26] CARLSON, Amanda. Successful plasma cutting counts on consumables: Understanding 5 critical plasma torch consumable components. *Thefabricator* [online]. 2010 [cit. 2020-07-29]. Dostupné z: <https://www.thefabricator.com/thewelder/article/cuttingweldprep/successful-plasma-cutting-counts-on-consumables>
- [27] Rezanie plazmou / Technológie: Princíp funkcie plazmového horáka. *Microstep* [online]. [cit. 2020-07-29]. Dostupné z: <https://www.microstep.sk/technologie/rezanie-plazmou/>
- [28] Schéma řezacího hořáku. In: *Europages* [online]. [cit. 2020-07-22]. Dostupné z: https://m.europages.com/filestore/gallery/ca/ea/20196686_858aa0f1.pdf
- [29] How a Plasma Cutter Works. *Lincolnelectric* [online]. [cit. 2020-07-22]. Dostupné z: <https://www.lincolnelectric.com/en-us/equipment/plasma-cutters/process-and-theory/Pages/how-a-plasma-cutter-works.aspx>
- [30] *PLAZMOVÉ REZANIE: HIFOCUS* [online]. Kjellberg Trading s.r.o, 2017 [cit. 2020-07-22]. Dostupné z: <http://kjellberg-trading.com/userFile/7391>
- [31] Plazmový zdroj HiFocus 280i neo. In: *Honkys-export* [online]. [cit. 2020-07-22]. Dostupné z: <https://www.honkys-export.cz/plazmova-technologie/>
- [32] *ČSN EN 1090-2 Provádění ocelových konstrukcí a hliníkových konstrukcí - Část 2: Technické požadavky na ocelové konstrukce*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2019.
- [33] *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, 2019.
- [34] *Vanad PROXIMA* [online]. [cit. 2020-07-22]. Dostupné z: https://vanad.cz/public/dokumenty/cs_ke-stazeni/KL_CZ_PROXIMA.pdf
- [35] Vanad - hrdý partner. *Vanad* [online]. 2019 [cit. 2020-07-22]. Dostupné z: <https://vanad.cz/cs/kontakty/aktuality/novinky-a-udalosti/vanad-zdatny-partner>

[36] Strenx® 960. SSAB [online]. [cit. 2020-07-22].
Dostupné z: <https://www.ssab.cz/products/brands/strenx/products/strenx-960>

[37] ČSN EN 10025-6 *Výrobky válcované za tepla z konstrukčních ocelí - Část 6: Technické dodací podmínky pro ploché výrobky z ocelí s vyšší mezí kluzu v zušlechtěném stavu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020.

[38] Plazmové zdroje Kjellberg HiFocus. *Vanad* [online]. [cit. 2020-07-22].
Dostupné z: <https://vanad.cz/cs/vse-ke-strojum/prislusenstvi/plazmove-zdroje/plazmove-zdroje-kjellberg-hifocus>

[39] Kartáč drátěný ocelový vlnitý. In: *Manutan* [online]. [cit. 2020-07-22].
Dostupné z: https://www.manutan.cz/cs/mcz/kartac-drateny-ocelovy-vlnity-827442?gclid=CjwKCAjwr7X4BRA4EiwAUXjbt4AaMS2fmiUfL12YyVSQGZSMBAjP6ap6_d1ggkVuB-ooLn9VzB5X3RoCX3YQAvD_BwE

[40] ZEISS Stemi 508. In: *MSI-viking* [online]. [cit. 2020-07-22].
Dostupné z: <https://www.msi-viking.com/ZEISS-Stemi-508-Stereomicroscope-Stand-K-EDU-and-K-LED>

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Schéma řezání plazmou [3]	122
Obrázek 2 - Schéma řezání kyslíkem [5]	133
Obrázek 3 - Princip laserového řezání [9]	155
Obrázek 4 - Rozdílné typy aktivního prostředí u pevnolátkových laserů [11]	177
Obrázek 5 - Zjednodušené schéma vláknového laserů [11]	188
Obrázek 6 - Schéma vzniku hlavního oblouku [18]	244
Obrázek 7 - Řezání HD plazmou [20]	266
Obrázek 8 - Jak řezná rychlost ovlivňuje kvalitu řezu [22]	288
Obrázek 9 - Schéma řezacího hořáku [28]	300
Obrázek 10 - Plazmový zdroj HiFocus 280i neo [31]	311
Obrázek 11 - Stanovení průměrné výšky prvků profilu Rz5	322
Obrázek 12 - Toleranční pole pro průměrnou výšku prvků profilů Rz5 pro řezy do 30 mm	333
Obrázek 13 - Stanovení úchylek kolmosti a úhlu	344
Obrázek 14 - Toleranční pole pro úchylku kolmosti a úchylku úhlu u pro řezy do 30 mm	344
Obrázek 15 - Místa měření na broušeném páleném povrchu	355
Obrázek 16 - Řezací stroj Vanad PROXIMA 20/20	387
Obrázek 17 - Plazmový zdroj HiFocus 280i neo	399
Obrázek 18 - Výměna spotřebních dílů u plazmového hořáku PerCut 451	400
Obrázek 19 - Doporučený tvar zkušební vzorku	411
Obrázek 20 - Tvar a rozměry řezaného vzorku (mm)	422
Obrázek 21 - Výsledné vzorky	433
Obrázek 22 - Přímý řez (1,2,3)	444
Obrázek 23 - Řez obloukem (1,2,3)	444
Obrázek 24 - Drátěný ocelový kartáč [39]	444
Obrázek 25 - Způsob odebrání částí vzorku	455
Obrázek 26 - Řezný kotouč Struers 56A25	455
Obrázek 27 - Metalografická pila Struers Labotom 3	455
Obrázek 28 - Metalografický lis CitoPress-1	466

Obrázek 29 - Značení zalisovaných vzorků (1,2,3)	466
Obrázek 30 - Zalisované vzorky (1,2,3)	466
Obrázek 31 - Vyleštěné vzorky (1,2,3)	477
Obrázek 32 - Bruska/Leštička Buehler Phoenix-Beta	488
Obrázek 33 - Leptání pomocí roztoku Nitalu 4%	488
Obrázek 34 - Měření průměrné výšky profilu Rz5	499
Obrázek 35 - Vyhodnocení průměrné výšky prvků profilu Rz5.....	500
Obrázek 36 - Průměrná výška profilu Rz5	500
Obrázek 37 - Makroskop Zeiss Stemi 508 [40]	511
Obrázek 38 - Úchylka kolmosti u	522
Obrázek 39 - Úhel řezu	522
Obrázek 40 - Vyhodnocení tolerančních polí úchylky u	533
Obrázek 41 - Úchylka kolmosti u a parametr Δa (vzorek 1D,2D,3D)).....	544
Obrázek 42 - Úchylka kolmosti u a Δa (vzorek 1K,2K,3K)	545
Obrázek 43 - Úchylka kolmosti u a Δa (vzorek 1R,2R,3R).....	556
Obrázek 44 - Tvrdoměr Buehler IndentaMet 1100	567
Obrázek 45 - Dolní roh – rozsah TOO (1K).....	588
Obrázek 46 - Dolní roh – rozsah TOO (1D).....	588
Obrázek 47 - Dolní roh – rozsah TOO (1R).....	588
Obrázek 48 - Horní roh – rozsah TOO (1K)	588
Obrázek 49 - Horní roh – rozsah TOO (1D).....	588
Obrázek 50 - Horní roh – rozsah TOO (1R)	599
Obrázek 51 - Střed – rozsah TOO (1K)	599
Obrázek 52 - Střed – rozsah TOO (1D).....	599
Obrázek 53 - Střed – rozsah TOO (1R)	599
Obrázek 54 - Dolní roh – rozsah TOO (2K).....	600
Obrázek 55 - Dolní roh – rozsah TOO (2D).....	600
Obrázek 56 - Dolní roh – rozsah TOO (2R).....	600
Obrázek 57 - Horní roh – rozsah TOO (2K)	600
Obrázek 58 - Horní roh – rozsah TOO (2D).....	600
Obrázek 59 - Horní roh – rozsah TOO (2R)	611
Obrázek 60 - Střed – rozsah TOO (2R)	611

Obrázek 61 - Střed – rozsah TOO (2D)	611
Obrázek 62 - Střed – rozsah TOO (2K)	611
Obrázek 63 - Dolní roh – rozsah TOO (3K)	622
Obrázek 64 - Dolní roh – rozsah TOO (3D),	622
Obrázek 65 - Dolní roh – rozsah TOO (3R)	622
Obrázek 66 - Horní roh – rozsah TOO (3K)	622
Obrázek 67 - Horní roh – rozsah TOO (3D)	622
Obrázek 68 - Horní roh – rozsah TOO (3R)	633
Obrázek 69 - Střed – rozsah TOO (3K)	633
Obrázek 70 - Střed – rozsah TOO (3D)	633
Obrázek 71 - Střed – rozsah TOO (3R)	633

Seznam tabulek

Tabulka 2 - Výhody a nevýhody vybraných metod tepelného dělení	21
Tabulka 3 - Toleranční pole pro průměrnou výšku prvků Rz5	33
Tabulka 4 - Stanovení parametru Δa pro různé tloušťky	34
Tabulka 5 - Toleranční pole pro velikosti úchytky kolmosti nebo úhlové úchytky u.....	34
Tabulka 6 - Počet a umístění měření tvrdosti podle tloušťky plechu	36
Tabulka 7 - Technické údaje stroje Vanad PROXIMA 20/20	37
Tabulka 8 - Technické údaje HiFocus 280i neo [30]	39
Tabulka 9 - Mechanické vlastnosti oceli S960QL [36]	41
Tabulka 10 - Chemické složení oceli S960QL [36].....	41
Tabulka 11 - Nastavení pálicího stroje Vanad PROXIMA 20/20	43
Tabulka 12 - Naměřené hodnoty výšky profilu Rz5	49
Tabulka 13 - Vyhodnocení hodnot úchytky kolmosti u a úhlu řezu.....	53
Tabulka 14 - Požadovaná jakost řezaných povrchů podle EN 1090-2 a ISO 9013.....	55
Tabulka 15 - Průměrné hodnoty tvrdosti řezu	56
Tabulka 16 - Průměrné hodnoty tvrdosti povrchu řezaného materiálu.....	57
Tabulka 17 -Rozsah tepelně ovlivněné oblasti	64