ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N 2301 Strojní inženýrství
Studijní zaměření: Strojírenská technologie-technologie obrábění

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Stanovení metodiky pro dělení kovových materiálů

Autor: **Bc. Jan FLÍČEK**

Vedoucí práce: **Doc. Ing. Jiří ČESÁNEK, Ph.D.**

Akademický rok 2015/2016

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta strojní
Akademický rok: **2015/2016**

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení:	**Bc. Jan FLÍČEK**
Osobní číslo:	**S14N0106P**
Studijní program:	**N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor:	**Strojírenská technologie - technologie obrábění**
Název tématu:	**Stanovení metodiky pro dělení kovových materiálů**
Zadávající katedra:	**Katedra technologie obrábění**

Zásady pro vypracování:

1. Analýza současného stavu řešené problematiky
2. Výběr posuzovaných metod dělení materiálu a stanovení kritérií pro jejich hodnocení
3. Vyhodnocení provedených experimentů a stanovení metodiky
4. Zhodnocení a závěr

Rozsah grafických prací:	**dle potřeby**
Rozsah kvalifikační práce:	**50 - 70 stran**
Forma zpracování diplomové práce:	**tištěná**

Seznam odborné literatury:

- **HUMÁR, A. Technologie I. Technologie obrábění - 3. část.**
- **http://docplayer.cz/13479-Technologie-i-technologie-obrabeni-3-cast.html. Brno: VUT, 2005**
- **Hassan El-Hofy: Advanced Machining Processes, McGraw-Hill, 2005**
- **MAŇKOVÁ I. Progresívne technológie. Technická univerzita Košice, Strojnícka fakulta. Edícia vedeckej a odbornej literatúry. Vienala, vydavateľstvo a tlačiareň Košice, 2000. 275 s. ISBN 80-7099-430-4.**
- **KOCMAN, K., PROKOP, J. Technologie obrábění. 2. vydání.Brno : Akademické nakladateltví CERM, 2005. 270 s. ISBN 80-214-3068-0.**
- **Firemní literatura**

Vedoucí diplomové práce:	**Doc. Ing. Jiří Česánek, Ph.D.** Katedra technologie obrábění
Konzultant diplomové práce:	**Doc. Ing. Jiří Česánek, Ph.D.** Katedra technologie obrábění

Datum zadání diplomové práce:	**18. října 2015**
Termín odevzdání diplomové práce:	**20. května 2016**

Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan

Západočeská univerzita v Plzni
Fakulta strojní
L.S.

Doc. Ing. Jan Řehoř, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 20. října 2015

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.
Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne: ……. . . . . . .

podpis autora

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu své diplomové práce, Doc. Ing. Jiřímu Česánkovi Ph.D., za cenné rady, věcné připomínky a vstřícnost při konzultacích.

Dále bych chtěl poděkovat za spolupráci při uskutečnění experimentů firmě Zetech a.s., Tarancia, SE, Laboratoři experimentálního tváření RTI v Plzni, Laboratoři metalografie RTI v Plzni, Laboratoři dílenské metrologie RTI v Plzni.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	**Příjmení** Flíček	**Jméno** Jan	
STUDIJNÍ OBOR	2303T004 „Strojírenská technologie-Technologie obrábění“		
VEDOUCÍ PRÁCE	**Příjmení (včetně titulů)** Doc. Ing. Česánek Ph.D.	**Jméno** Jiří	
PRACOVIŠTĚ	ZČU - FST - KTO		
DRUH PRÁCE	**DIPLOMOVÁ**	~~**BAKALÁŘSKÁ**~~	**Nehodící se škrtněte**
NÁZEV PRÁCE	Stanovení metodiky pro dělení kovových materiálů		

FAKULTA	Strojní		**KATEDRA**	KTO		**ROK ODEVZD.**	2016

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	113		**TEXTOVÁ ČÁST**	91		**GRAFICKÁ ČÁST**	22

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) **ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY**	Diplomová práce se zabývá zhodnocením současného stavu problematiky dělení kovových materiálů a po vyhodnocení experimentů navrhnout metodiku pro volbu vhodné technologie dle požadovaných parametrů řezání. V diplomové práci je zpracováno ekonomické porovnání jednotlivých technologických variant.
KLÍČOVÁ SLOVA **ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE**	Dělení, Řezání, Laser, Plasma, Vodní paprsek

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	**Surname** Flíček	**Name** Jan	
FIELD OF STUDY	2303T004 “Mechanical Technology - machining technology “		
SUPERVISOR	**Surname (Inclusive of Degrees)** Doc. Ing.Česánek Ph.D.	**Name** Jiří	
INSTITUTION	ZČU - FST - KTO		
TYPE OF WORK	**DIPLOMA**	~~**BACHELOR**~~	**Delete when not applicable**
TITLE OF THE WORK	Determining the methodology for the cutting of metallic materials		

FACULTY	Mechanical Engineering		**DEPARTMENT**	Machining technology		**SUBMITTED IN**	2014

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	113		**TEXT PART**	91		**GRAPHICAL PART**	22

BRIEF DESCRIPTION **TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS**	This diploma thesis evaluates the current state of the issue of cutting of metallic materials, and after evaluation experiments suggest a methodology for selecting appropriate technology to the required cutting parameters. In the thesis is the economic comparison of different technological options.
KEY WORDS	Cutting, Laser, Plasma, Water jet

Obsah

Prohlášení o autorství 4
ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE 6
SUMMARY OF DIPLOMA SHEET 7
Přehled použitých zkratek, symbolů a veličin 10
1. ÚVOD 11
2. ROZDĚLENÍ NEKONVENČNÍCH METOD OBRÁBĚNÍ 12
2.1 Elektrochemický a chemický princip 12
2.1.1 Elektrochemické obrábění 12
2.1.2 Chemické obrábění 13
2.2 Tepelný princip 14
2.2.1 Elektroerozivní obrábění 14
2.2.2 Obrábění paprskem plasmy 15
2.2.3 Obrábění paprskem laseru 16
2.2.4 Obrábění paprskem elektronů 16
2.2.5 Řezání kyslíko-acetylénovým plamenem 17
2.3 Mechanický princip 18
2.3.1 Ultrazvukové obrábění 18
2.3.2 Obrábění paprskem vody 18
2.3.3 Obrábění hydroabrazivním paprskem 19
2.3.4 Obrábění paprskem brusiva 20
3. ANALÝZA SOUČASNÉHO STAVU DĚLENÍ PLECHŮ 21
3.1 Řezání paprskem plazmy 21
3.1.1 Princip metody 21
3.1.2 Rozdělení technologií plazmového řezání 21
3.1.3 HyDefinition plazma 24
3.1.4 Parametry a kvalita řezu 25
3.1.5 Obráběné materiály 27
3.2 Řezání laserovým paprskem 27
3.2.1 Princip metody 27
3.2.2 Rozdělení laserů 28
3.2.3 Metody řezání laserem 29
3.2.4 Parametry a kvalita řezu 31
3.3 Řezání vodním paprskem 32
3.3.1 Princip metody 32

3.3.2 Rozdělení technologií ... 32
4. VÝBĚR POSUZOVANÝCH METOD DĚLENÍ MATERIÁLU A STANOVENÍ KRITÉRIÍ PRO JEJICH HODNOCENÍ ... 35
4.1 Technologie řezání plazmou ... 35
4.1.1 Popis stroje ... 35
4.1.2 Popis procesu řezání ... 37
4.1.3 Vygenerovaný NC kód řezání ... 38
4.2 Technologie řezání laserem ... 38
4.2.1 Popis stroje ... 38
4.2.2 Popis procesu řezání ... 39
4.2.3 Vygenerovaný NC kód řezání ... 40
4.3 Technologie řezání vodním paprskem ... 41
4.3.1 Popis stroje ... 41
4.3.2 Popis procesu řezání ... 42
4.3.3 Vygenerovaný NC kód řezání ... 43
4.4 Vzorový díl pro provedení experimentů ... 44
4.4.1 Volba tvaru ... 44
4.4.2 Volba materiálu vzorku ... 45
4.4.3 Volba tloušťek plechů ... 45
4.5 Sledované parametry ... 45
5. VYHODNOCENÍ VZORKŮ ... 48
5.1 Měření vzorků ... 48
5.2 Hodnocení vzorků ... 76
5.2.1 Vývoj drsnosti řezu ... 76
5.2.2 Tepelně ovlivněná oblast ... 77
5.2.3 Průběh změn tvrdosti materiálu ... 80
6. TECHNICKO-EKONOMICKÉ HODNOCENÍ ... 83
6.1 Technické hodnocení ... 83
6.2 Ekonomické hodnocení ... 83
7. NÁVRH METODIKY ... 85
8. ZÁVĚR ... 86
Seznam použité literatury ... 87
Seznam obrázků ... 89
Seznam tabulek ... 90
Seznam příloh ... 91

Přehled použitých zkratek, symbolů a veličin

NMO – Nekonvenční metody obrábění

EDM – Electro Discharge Machining

PBM – Plasma Beam Machining

LBP – Laser Beam Machining

EBM – Electron Beam Machining

ECM – Electro Chemical Machining

CM – Chemical Machining

USM – Ultrasonic Machining

WJM – Water Jet Machining

AWJM – Abrasive Water Jet Machining

TOO – Tepelně ovlivněná oblast

1. ÚVOD

Tato diplomová práce se zabývá vytvořením metodiky pro volbu vhodné technologie dělení kovových materiálů. V současnosti je dělení materiálů, zejména plechů, neustále se vyvíjejícím strojním odvětvím. Tím, že jsou tyto technologie hojně v průmyslové praxi zastoupeny, je neustále zvyšován tlak na energetickou účinnost a úspornost obráběcího procesu. Tyto operace se často řadí mezi operace přípravy materiálu, takže dosažená úspora při volbě nejvhodnější technologie je velmi významným aspektem.

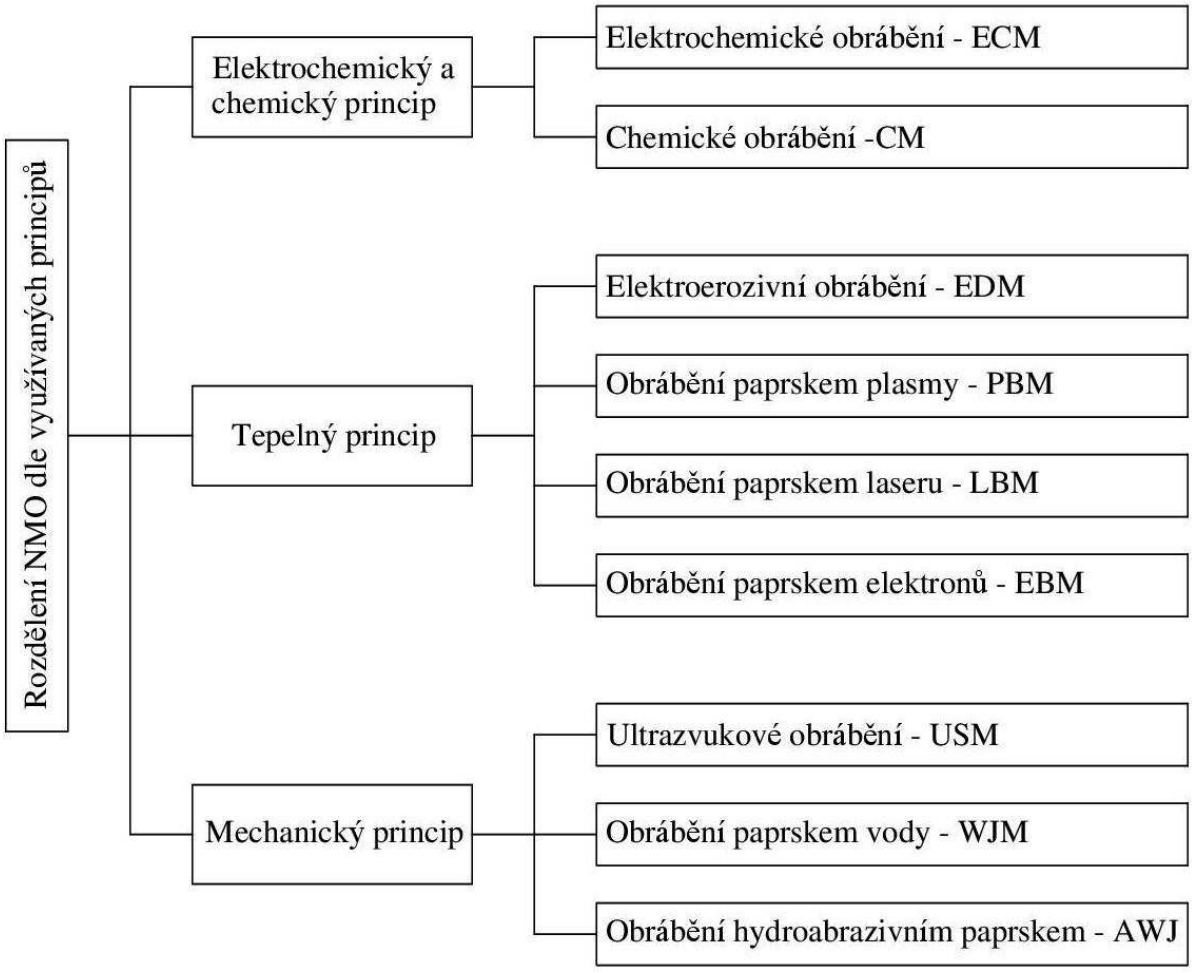
U mnoha strojních operací jsou metody klasického obrábění, tj. odstraňování materiálu ve formě třísky, nevhodné či je jejich použití zcela vyloučené. Vhodné je použití takzvaných nekonvenčních metod obrábění. Na rozdíl od konvenčních metod obrábění, které využívají klasických obráběcích nástrojů, nekonvenční metody obrábění využívají zejména fyzikálních, chemických ale i mechanických dějů k odstraňování materiálu z místa řezu. Jakkoliv se označení nekonveční metody obrábění může zdát vznešené, skrývají se pod ním metody a principy dnes běžně používané a pro výrobní podniky běžně dostupné. Zejména pro výrobky z plechu, ale i pro tyčový materiál, se dnes běžně používají technologie využívající působení fokusovaného energetického paprsku do malého působiště, místa řezu. Jejich velkou výhodou oproti konvenčním metodám, jako například stříhání, je možnost výroby tvarově složitých dílů, často nejen v dvojdimenzionálním provedení, ale díky použití výkonných, počítačem řízených, strojů umožňují i provádění 3D řezů. Tím je možné nahradit následující obráběcí operace, například kuželové zahlubování děr, frézování úkosů hran, atd., a zvýšit tak technologickou úroveň výroby.

Ikdyž technologie řezání laserem, plazmou či vodním paprskem jsou dnes technologie relativně cenově dostupné, přesto se jedná o výraznou investici v řádu milionů Kč, které by měla předcházet podrobná analýza investice. Pokud se výrobní podnik rozhodne pro koupi takového zařízení, měl by provést podrobnou analýzu výrobního sortimentu, velikosti dílů, tloušťku nejčastěji řezaného materiálu, druhu používaných materiálů, požadované přesnosti řezání, a vycházet z těchto údajů při výběru vhodného výrobního zařízení. V této diplomové práci jsou porovnávány zmiňované technologie dělení materiálu, jejich možnosti a výsledky řezání, ekonomická stránka řezání a může být nápomocna při výběru nejvhodnější technologie pro daný výrobní podnik.

2. ROZDĚLENÍ NEKONVENČNÍCH METOD OBRÁBĚNÍ

Vypracováno s použitím [1], [2], [3], [8]

Nekonveční metody obrábění se rozdělují podle využívaných fyzikálně-chemických principů působení na obráběný materiál. Jednotlivé principy můžeme rozdělit dle následující tabulky (Tab. 2-1)



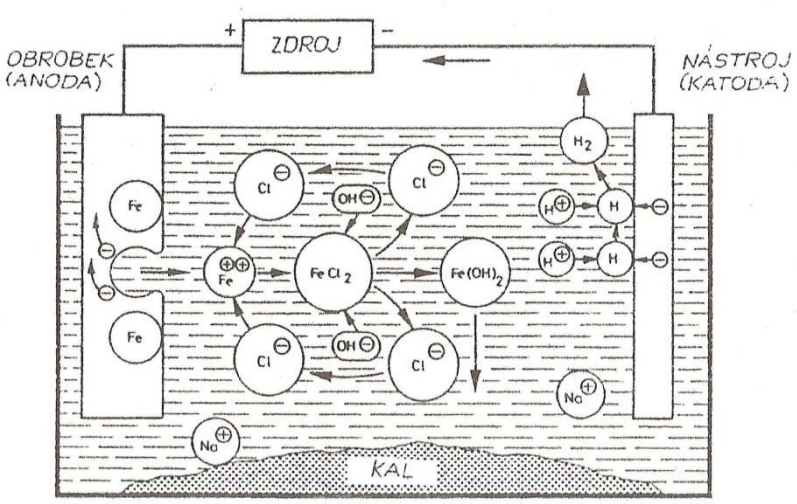
Tab. 2-1 Rozdělení NMO dle využívaných fyzikálně-chemických principů **[1]**

2.1 Elektrochemický a chemický princip

2.1.1 Elektrochemické obrábění

Princip elektrochemického obrábění je založen na jevu zvaném elektrolýza. Jedná se o působení elektrického proudu na elektrolyt. Technologie využívá reakce mezi katodou – nástrojem a anodou – obrobkem. Působením elektrického proudu dochází k odebírání materiálu s anody. To je způsobeno reakcí kationtů elektrolytu s anionty materiálu na povrchu obrobku.

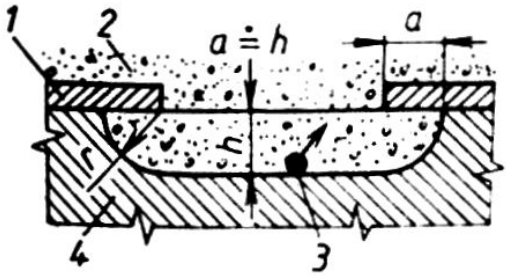
Elektrochemické obrábění je použitelné na elektricky vodivé materiály. Nedochází zde k odebírání třísek ani jinému silovému působení nástroje na obrobek. Rychlost odebírání materiálu závisí na teplotě, složení elektrolytu, pracovní mezeře mezi elektrodami a řízením katody pro udržení konstantní mezery mezi nástrojem a obrobkem.



Obr. 2-1 Schéma elektrochemického obrábění **[3]**

2.1.2 Chemické obrábění

Technologie chemického obrábění využívá působení chemického roztoku na obráběný materiál. Chemickým roztokem mohou být kyseliny či hydroxidy, které jsou tedy obráběcím nástrojem. Působení chemického roztoku se nazývá leptání, lze jej definovat jako odebírání vrstev materiálu z plochy obrobku. Plochy, které nemají být leptány, je třeba zakrýt ochrannou vrstvou, tzv. maskou. Ochranná vrstva může být např. nanesení povlaku pryskyřice či laků, které s použitým leptadlem chemicky nereagují. Odebíraná tloušťka materiálu může být v rozmezí od několika setin milimetru po několik milimetrů. Záleží na použitém chemickém roztoku a době působení. Touto metodou lze obrábět hliník a jeho slitiny, měď, ocel, nikl. Jak je zřejmé z obrázku (Obr. 2-2), chemický roztok působí i na materiál pod maskou, přičemž hloubka leptání se rovná šířce odleptané části pod maskou.



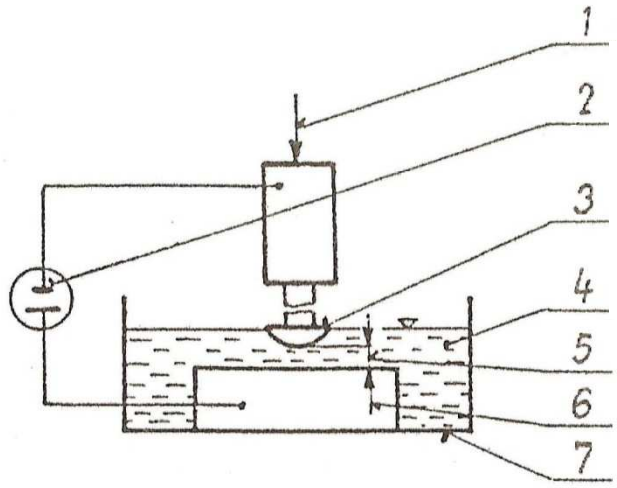
1 – Maska
2 – Leptací roztok
3 – Leptaná vrstva materiálu
4 – Materiál obrobku

Obr. 2-2 Schéma chemického obrábění **[3]**

2.2 Tepelný princip

2.2.1 Elektroerozivní obrábění

Základem pro elektroerozivní obrábění je elektrická vodivost obráběného materiálu. Princip elektroerozivního obrábění spočívá ve vysoké koncentraci energie, při které materiál taje nebo se vypařuje. Mezi dvěma elektrodami (nástroj a obrobek) ponořené v dielektriku (kapalina s velkým elektrickým odporem) dochází k elektrickým výbojům a povrchy elektrod erodují (Obr. 2-3). Vzdálenost elektrod musí být relativně přesně řízena. Důležitým aspektem je to, aby eroze nástroje probíhala řádově pomaleji než eroze obrobku. Nástroj má tvar negativního otisku tvaru budoucího obrobku a postupným přísuvem nástroje do obrobku se tento otisk přenáší. Samotný proces obrábění je relativně pomalý, v porovnání s klasickými metodami třískového obrábění.

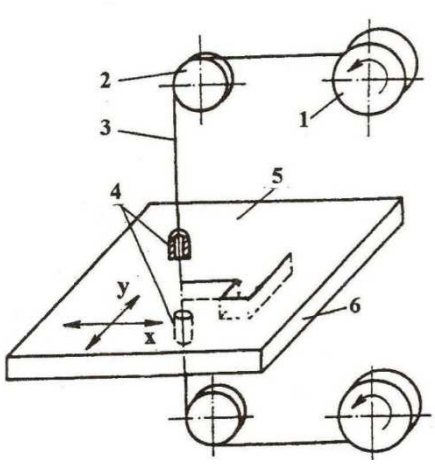


1 – Posuv nástroje
2 – Generátor el. energie
3 – Elektroda – nástroj
4 – Dielektrikum
5 – Mezera mezi nástrojem a obrobkem
6 – Elektroda – obrobek
7 – Nádoba

Obr. 2-3 Schéma elektroerozivního obrábění **[3]**

Technologie elektroerozivního obrábění je využívána k obrábění těžkoobrobitelných materiálů a často to byl jediný způsob, jak vyrobit tvarově složitou součást. Protože odebíraný matriál zůstává v kapalině v podobě malých částic, je potřeba mezeru mezi obrobkem a nástrojem proplachovat a tyto částice z kapaliny odstraňovat (filtrací). Dielektrikem může být voda, petrolej. Nástroje se zhotovují třískovým obráběním, litím, kováním. Materiálem nástrojů je grafit, měď a její slitiny, mosaz, wolfram.

Elektroerozivní řezání je metoda obrábění s minimální šířkou řezu. Nástrojem je odvíjející se tenký drát, který je přes vodící zařízení veden materiálem polotovaru. Schéma elektroerozivního řezání je na obrázku (Obr. 2-4)

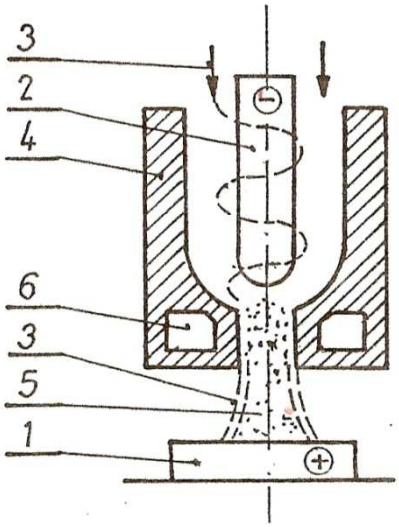


Obr. 2-4 Schéma elektroerozivního řezání **[6]**

1 – Cívka
2 – Napínací kladka
3 – Drát - elektroda
4 – Vedení drátu
5 – Obrobek
6 – Řízený pohyb obrobku

2.2.2 Obrábění paprskem plasmy

Základním kriteriem pro možnost obrábění materiálu pomocí paprsku plasmy je elektrická vodivost materiálu obrobku. Materiál obrobku je taven paprskem plasmy o vysoké teplotě. Teplota plazmatu na výstupu z trysky hořáku může dosahovat až 30 000°C a rychlost může dosahovat hodnot vyšších, než je rychlost zvuku. Plazma je fyzikálně 4. skupenství, podobné plynu. Je elektricky vodivá a má vysokou teplotu. Vzniká ionizováním plynu elektrickým obloukem mezi dvěma elektrodami, tryskou (katoda) a obrobkem (anoda). Schéma řezání plasmou je na obrázku Obr. 2-5



Obr. 2-5 Schéma plasmového hořáku **[3]**

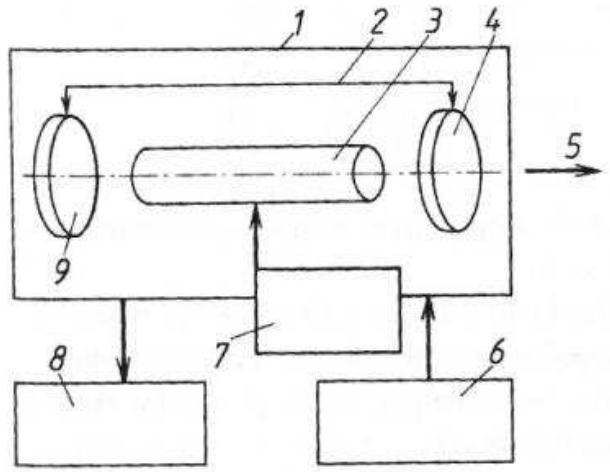
1 – Obráběný materiál (anoda)
2 – Katoda
3 – Inertní plyn (Ar)
4 – Těleso hořáku
5 – Paprsek plazmatu
6 – Chladicí kanály hořáku

Při řezání plasmou proud plynu působí na obráběný materiál a silově jej zatěžuje, proto může dojít k deformaci obrobku. Je to jeden z důvodů, proč se plasma nepoužívá pro řezání tenkých materiálů. Dalším z důvodů je velikost tepelně ovlivněné plochy, které je oproti ostatním technologiím poměrně velká.

Zvláštním případem při řezání plasmou je koncepce hořáku, ve kterém je vnitřní katoda a výstupní tryska tvoří anodu. Lze tak řezat i elektricky nevodivé materiály.

2.2.3 Obrábění paprskem laseru

Technologie dělení materiálu pomocí laserového paprsku pracuje na principu protavování materiálu. Laserový paprsek je monochromatický a koherentní svazek fotonů, které mají v celém průřezu svazku vysokou míru uspořádanosti. Vytvořený paprsek je nasměrován na obráběný materiál. Světelná energie paprsku se na velmi malé ploše přeměňuje na energii tepelnou a taví materiál při vzniku teploty v řezné oblasti až 10 000°C. Roztavený materiál v místě řezu se buď odpaří, nebo je vyfouknut pomocným plynem.



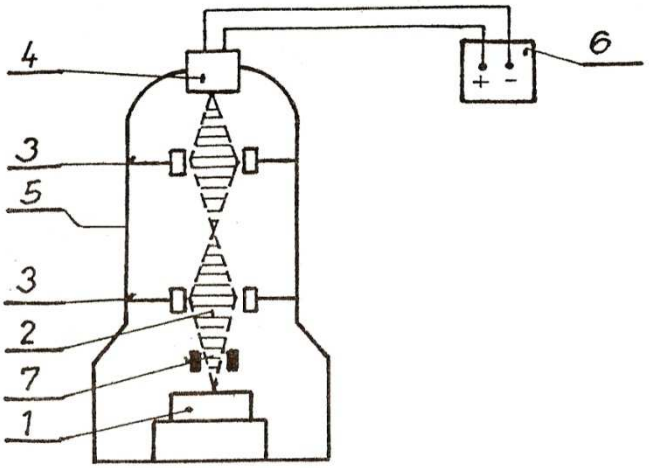
1 – Laserová hlavice
2 – Rezonátor
3 – Aktivní medium
4 – Polopropustné zrcadlo
5 – Výstup paprsku
6 – Zdroj energie buzení
7 – Budící zařízení
8 – Chladicí systém
9 – Nepropustné zrcadlo

Obr. 2-6 Schéma zařízení pro obrábění laserem **[1]**

Technologií řezání laserem je možné obrábět rozličné druhy materiálů. Důležitý parametr obráběného materiálu je světelná pohltivost, odrazivost a tepelná vodivost. Obrobitelnost materiálu při obrábění laserovým paprskem je tím lepší, čím je vyšší pohltivost, nižší odrazivost a tepelná vodivost.

2.2.4 Obrábění paprskem elektronů

Obrábění materiálu paprskem elektronů využívá soustředěný svazek urychlených elektronů, dopadající na obráběný materiál. Kinetická energie dopadajících elektronů se přeměňuje na tepelnou energii a dochází k tavení a vypaření materiálu z místa řezu. Schéma zařízení pro obrábění elektronovým paprskem je na Obr. 2-7.



1 – Obráběný materiál
2 – Paprsek elektronů
3 – Elektromagnetická čočka
4 – Katodový zářič
5 – Vývěva
6 – Elektrický zdroj
7 – Vychylování paprsku

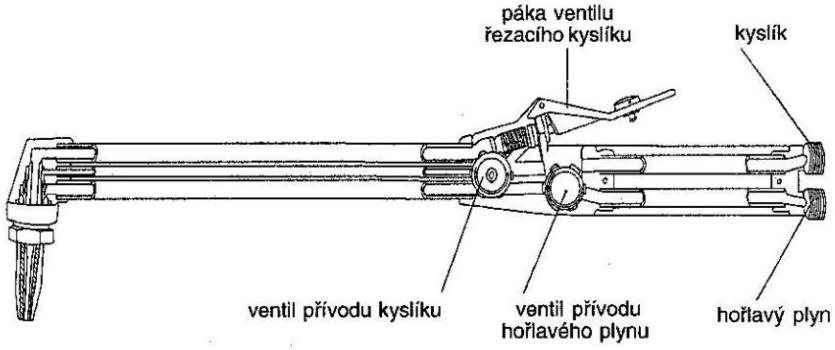
Obr. 2-7 Schéma obrábění elektronovým paprskem **[3]**

Technologie obrábění elektronovým paprskem je vhodná pro obrábění velmi malých otvorů již od průměru 0,015mm. Obrobitelnost materiálu není závislá na jeho mechanických vlastnostech, lze obrábět těžkoobrobitelné materiály, slitiny pro letecký či vesmírný průmysl, drahokamy. Nevýhodou této technologie je nutnost obrábění ve vakuu.

2.2.5 Řezání kyslíko-acetylénovým plamenem

Technologie řezání kyslíko-acetylénovým plamenem nepatří mezi nekonvenční metody obrábění, ale mezi klasické metody obrábění. Je to však hojně využívaná technologie dělení materiálu a i v budoucnu můžeme počítat s jejím častým využíváním, protože nabízí možnosti, které jsou pro nekonvenční technologie často nedostižné.

Technologie řezání kyslíkem pracuje na principu spalování roztaveného kovu v proudu kyslíku. Podmínkou umožňující tento proces je to, aby zápalná teplota materiálu byla nižší, než je teplota tavení. Metoda je velmi vhodná pro řezání nelegovaných ocelí do tloušťek až 500mm, pro řezání legovaných ocelí se pro podporu vzniku exotermické reakce do místa řezu přidává kovový prášek. Schéma hořáku pro řezání kyslíko-acetylénovým plamenem je na Obr. 2-8.



Obr. 2-8 Schéma hořáku **[5]**

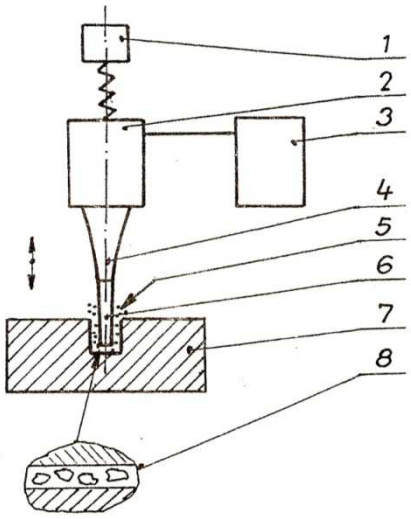
Vstupním mediem do hořáku je hořlavý plyn - acetylen C_2H_2 (výjimečně propan-butan, vodík) a kyslík o minimální čistotě 99,2%. Kvalita řezu po této technologii je poměrně

špatná. Dochází k velké tepelně ovlivněné oblasti, velké drsnosti řezu a velké množství okují. Hlavní výhodou této technologie je její relativně vysoká produktivita, možnost nasazení v polních podmínkách a možnost řezání velmi silných materiálů. Využívá se jak pro ruční řezání, tak pro řezání na CNC strojích (častá je kombinace plasma+kyslíko-acetylénový plamen).

2.3 Mechanický princip

2.3.1 Ultrazvukové obrábění

Obrábění materiálu pomocí ultrazvuku využívá mechanického odebírání materiálu polotovaru. Nástroj je budičem rozkmitán na vysokou frekvenci při relativně malém rozkmitu směrem kolmo k obrobku. Mezi nástroj a obrobek je přiváděna kapalina s brusnými zrny. Nástroj přitlačuje abrazivní zrna k obrobku a ty rozrušují povrch polotovaru. Dochází tak k přenesení tvaru čela nástroje do polotovaru. Obráběcí účinek na bocích nástroje je minimální, vibrace je usměrněná na čelo nástroje. Výsledný obrobený tvar je větší o střední velikost brusného zrna (násobenou 1,6-1,8 krát). Schéma zařízení pro obrábění ultrazvukem je na obrázku níže (Obr. 2-9).



1 – Regulace statického tlaku
2 – UZ měnič
3 – UZ generátor
4 – UZ koncentrátor
5 – Přívod suspenze
6 – UZ nástroj
7 – Obráběný materiál
8 – Detail obráběné štěrbiny

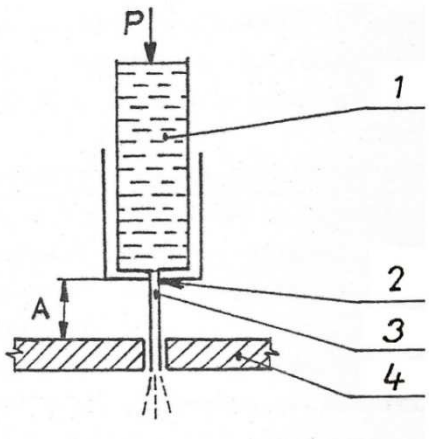
Obr. 2-9 Schéma obrábění ultrazvukem **[3]**

Působením ultrazvuku je vhodné obrábět tvrdé a křehké materiály (nerosty, sklo, kompozity, slinuté karbidy). Měkké materiály jsou k obrábění ultrazvukem nevhodné, protože abrazivní zrna v nich ulpívají a nedochází k rozrušování. Naopak, z důvodu zachování tvaru nástroje je ten vyroben z měkčích, pružných a houževnatých materiálů (mosazi, korozivzdorná ocel).

2.3.2 Obrábění paprskem vody

Obrábění vodním paprskem využívá abrazivního působení tlakové vody na obráběný materiál. Proces je ve své podstatě shodný s vodní erozí v přírodě, je však značně urychlen a působí do jednoho soustředěného místa. Technologie řezání vodním paprskem byla vyvinuta v USA

jako metoda obrábění netradičních materiálů pro vesmírný průmysl. Schéma zařízení pro řezání vodním paprskem je na Obr. 2-10.



1 – Zásobník vody
2 – Výstupní tryska
3 – Paprsek vody
4 – Obráběný materiál
A – Vzdálenost mezi tryskou a obrobkem
p – Zdroj tlakové energie

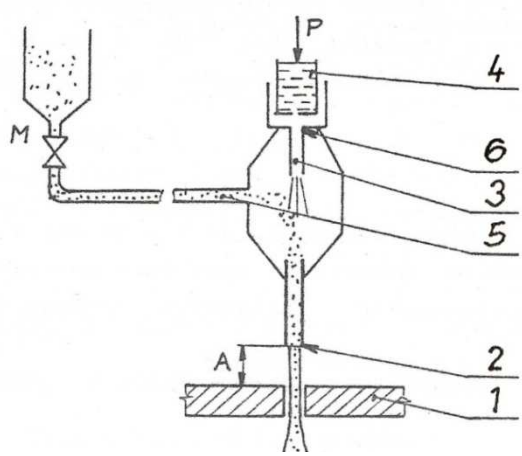
Obr. 2-10 Schéma obrábění paprskem vody **[3]**

Vodní tryska je vyrobena ve velikosti odpovídající požadovaným podmínkám pro obrábění, s průměrem otvoru trysky cca 0,1 mm. Protože minerály rozpuštěné v používané vodě při vysokém tlaku kapaliny působí erozivně na výstupní trysku, je vyráběna z tvrdých materiálů odolávajících erozivnímu působení vody. Materiálem trysek je safír, rubín, diamant.

Řezání pouze pomocí paprsku vody, bez abrazivních částic je vhodné pro měkké materiály. Efektivní je při obrábění dřeva, gumy, papíru, izolačních materiálů, umělých hmot, plexiskla. Využití nachází i v potravinářském průmyslu, používá se v linkách zpracovávajících maso, ale například i porcování zákusků.

2.3.3 Obrábění hydroabrazivním paprskem

Tato technologie vychází z předchozí. Pro posílení účinku je do paprsku kapaliny přimícháváno abrazivo. Jako abrazivo se používají materiály s relativně vysokou tvrdostí. Je to nejčastěji drcený granát, oxid hlinitý Al_2O_3, křemičitý písek. Řezný paprsek i řezná spára je u technologie AWJM oproti WJM větší. Je to dáno velikostí použitého abraziva. Schéma zařízení pro řezání hydroabrazivním paprskem je na Obr. 2-11. Technologií AWJ je možné řezat téměř jakýkoliv materiál. Jedná se zde o takzvaný studený řez, tzn. při řezání vzniká minimum tepla a to je ihned proudem odvedeno. V řezaném materiálu tak není tepelně ovlivněná oblast a materiál v místě řezu má shodné vlastnosti jako v jakémkoliv jiném místě polotovaru. Plocha řezu je čistá, bez otřepů. Kvalitu řezu lze přímo ovlivnit nastavením tlaku média, rychlostí posuvu trysky a použitým abrazivem. Jemné abrazivo, vysoký tlak kapaliny a malý posuv jsou vhodné parametry pro zajištění kvalitního řezu.



1 – Obráběný materiál
2 – Výstupní tryska
3 – Průtok vody Q
4 – Zásobník vody
5 – Přívod abraziva
6 – Vodní tryska
A – Vzdálenost mezi tryskou a obrobkem
M – Dávkování abraziva
p – Zdroj tlakové energie

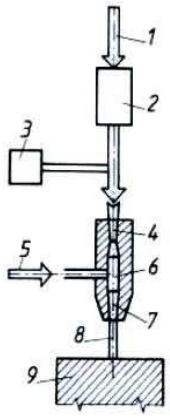
Obr. 2-11 Schéma obrábění paprskem vody s abrazivem **[3]**

Materiály, pro které je vhodné nasazení technologie AWJ, jsou oceli konstrukční, legované, tepelně zpracované, barevné kovy, sklolaminát, kompozitní materiály, sklo, mramor, žuly a další nerostné materiály. Nevhodné je, pro řezání hydroabrazivním materiálem, tvrzené sklo, které se při styku s paprskem vody tříští.

Alternativou k použití nerostných abrazivních částic je technologie Ice Jet Machining, u které, jak už z názvu vyplývá, jsou ve vodním paprsku přimíseny ledové krystaly. Do zařízení je, namísto směšovacího zařízení, přidán modul pro chlazení protékající vody, ve které vzniká částice ledu. Výhodou je, že po průchodu řezaným materiálem se v záchytné nádrži rozpustí a odpadá tím filtrování abrazivních částic.

2.3.4 Obrábění paprskem brusiva

Metoda pracuje na principu abrazivního řezání materiálu proudem brusných částic, unášených v proudu tlakového plynu. Mechanika obrábění je podobná technologii obrábění hydroabrazivním paprskem. Tlakový plyn – dusík, CO_2 nebo vzduch, filtrován a regulován na tlak cca 0,2-08 MPa je hnán do směšovací komory, kde jsou k němu přidávány brusné částice. V proudu plynu je zrychleno na 150-300 m/s. Abrazivo je zrnitosti cca 10-60 μm. Materiálem abraziva je oxid hlinitý Al_2O_3, karbid křemíku SiC, karbid hořčíku $MgCO_3$. Dávkování abraziva nejčastěji zabezpečuje vibrační podavač, který je snadno regulovatelný. Řezná tryska se pohybuje těsně nad řezaným materiálem, aby docházelo k minimálním ztrátám rychlosti částic a tlaku hnacího plynu. Z hlediska fyzikálního se jedná o studený řez, dochází k minimálnímu silovému zatížení řezaného materiálu. Přesnost řezání, drsnost řezané plochy a úběr materiálu jsou přímo úměrné tlaku hnacího plynu a velikosti abraziva.



1 – Přívod plynu (vzduch)
2 – Generátor tlaku (kompresor)
3 – Regulátor tlaku vzduchu
4 – Vstup plynu do trysky
5 – Přívod abraziva
6 – Směšovací komora
7 – Výstupní tryska
8 – Paprsek brusných zrn
9 – Obráběný materiál

Obr. 2-12 Schéma zařízení pro řezání paprskem abraziva **[9]**

3. ANALÝZA SOUČASNÉHO STAVU DĚLENÍ PLECHŮ

Vypracováno s použitím [10], [11], [12], [20], [22]

3.1 Řezání paprskem plazmy

3.1.1 Princip metody

Obrábění paprskem plazmy se řadí mezi nekonvenční metody obrábění využívající tepelně-mechanického působení řezného nástroje – plazmového paprsku, na obráběný materiál. Ten je působením vysoké teploty na poměrně malou plochu v místě řezu okamžitě roztaven. Působením kinetické energie paprsku rovněž dochází k vyfouknutí roztaveného materiálu z místa řezu. Technologie řezání plazmou umožňuje řezat elektricky vodivé kovové materiály (omezeně i nevodivé), proces řezání je minimálně ovlivněn kvalitou povrchu řezaného materiálu (rez, lak, lesklý odrazivý povrch).

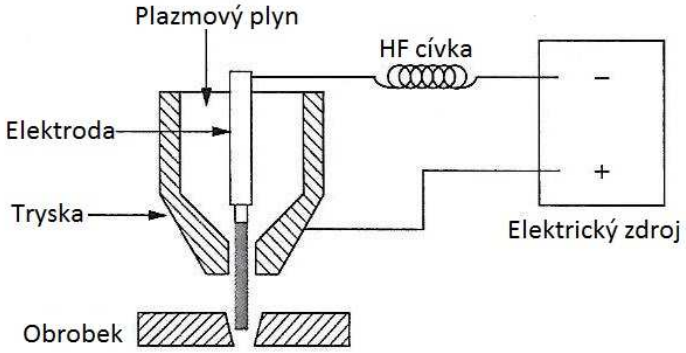
Plazma vzniká ionizováním plynu elektrickým obloukem, který vzniká mezi řezaným materiálem a řeznou tryskou po přivedení elektrického napětí. Pro řezání elektricky nevodivých materiálů je elektrický oblouk uskutečněn mezi elektrodou uvnitř trysky a vnějším obalem trysky. Plazma se označuje fyzikálně jako čtvrté látkové skupenství. Dodáním energie látka pevného skupenství přejde do stavu kapalného. Dodáním další energie přejde kapalná látka do stavu plynného. Jestliže do látky plynného skupenství dodáme množství další energie, dojde ke vzniku plazmy.

Pro řezání plasmou se principiálně používají dva typy plynu. Primární - řezací plyn je základ pro vznik plazmy. Ten je ionizován elektrickým obloukem a provádí řezání materiálu. Sekundární (vířivý, fokusační) chrání paprsek plazmy od okolního prostředí, usměrňuje ho a přímo podporuje kvalitu řezu. Plyny jsou do trysky vháněny pod vysokým tlakem z kompresoru (vzduchová plazma) nebo z tlakových lahví (kyslík, argon, dusík, vodík).

3.1.2 Rozdělení technologií plazmového řezání

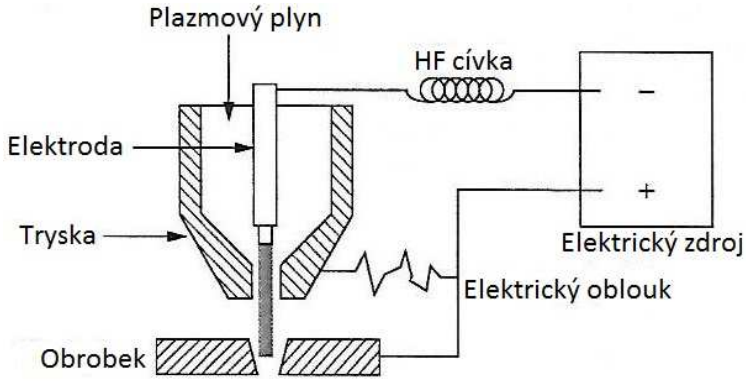
Druhy plazmových paprsků můžeme rozdělit dle několika faktorů:

Dle jejich vzniku - S přeneseným obloukem
- Bez přeneseného oblouku



Obr. 3-1 Schéma plazmového hořáku bez přeneseného oblouku **[8]**

Metoda bez přeneseného oblouku (Obr. 3-1) využívá pro vznik a udržení elektrického oblouku vnitřní elektrodu (katodu) a druhou elektrodu (anodu), tvořenou tryskou hořáku. Tato metoda je vhodná pro řezání elektricky nevodivých materiálů, např. keramických materiálů a pro nanášení povlaků. Při této metodě dochází ke zvýšenému opotřebení hořáku nejen vlivem vysoké teploty plazmového paprsku, ale i elektroerozívním účinkem elektrického oblouku.

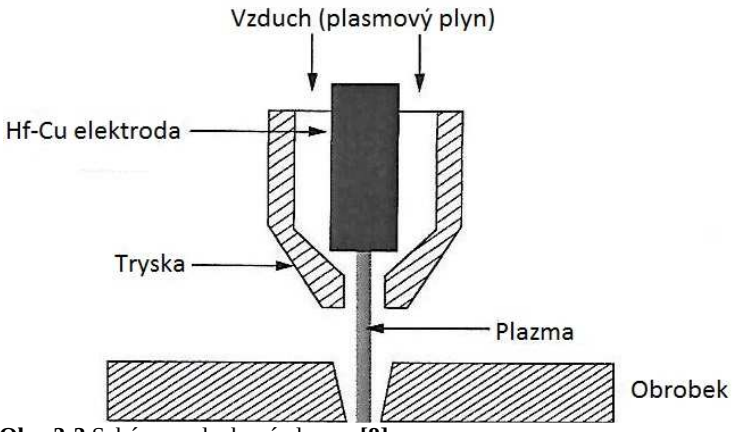


Obr. 3-2 Schéma plazmového hořáku s přeneseným obloukem **[8]**

Metoda s přeneseným obloukem (Obr. 3-2) využívá vznik elektrické oblouku mezi elektrodou uvnitř hořáku a obráběným materiálem. Tento způsob se využívá pro řezání elektricky vodivých materiálů, jako je např. ocel, ale i neželezné materiály.

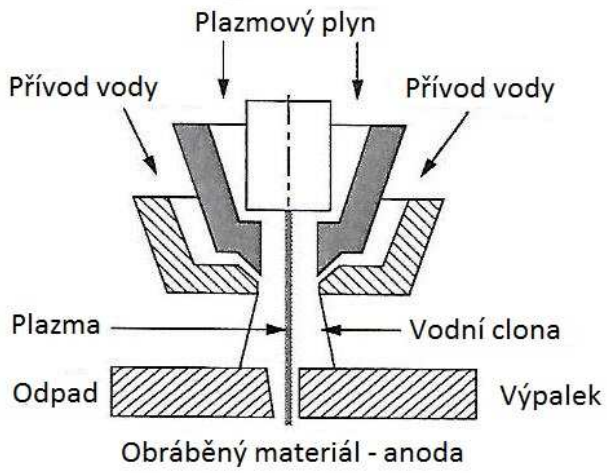
Dle způsobu ochrany paprsku
- Plynová clona
- Vodní clona

Nejčastějším způsobem ochrany a fokusace plazmového paprsku v průmyslové praxi při řezání je pomocí plynové clony. Principem je, že kromě samotného plazmového plynu, který je nutný pro vytvoření plazmy, je do trysky hnán další plyn, tzv. vířivý či fokusační. Úlohou tohoto sekundárního plynu je chránit paprsek a samotný řez před účinky okolní atmosféry. Dalším účinkem je fokusace paprsku působením usměrněné tlakové energie sekundárního plynu a tím řízení jeho tvaru. Volba jak primárního, tak i sekundárního plynu závisí na řezaném materiálu a jeho tloušťce. Pro korozivzdorné oceli, hliník a jiné neželezné materiály se používá jako ochranný plyn oxid uhličitý CO_2, kombinace argon+dusík, argon+vodík, vzduch. Pro konstrukční oceli se používá kyslík, vzduch a to zejména z ekonomických důvodů, použití speciálních kombinací plynů nemá na kvalitu řezu výrazný vliv. Na obrázku (Obr. 3-3) je schéma řezání plazmovým paprskem, kde je jako řezný i ochranný plyn použit vzduch. Vzduch se, zahřátím na vysokou teplotu elektrickým obloukem, rozkládá na základní plyny. Vzdušný kyslík silně reaguje s železnými materiály, a proto jeho využitím lze docílit zvýšení výkonu řezání. Nevýhodou vzduchové plazmy je oxidace a okujení povrchu řezu.



Obr. 3-3 Schéma vzduchové plazmy **[8]**

Řezání plazmovým paprskem s vodní clonou využívá namísto přívodu plynu, jakožto ochranného media, přívod vody. Schéma zařízení je na Obr. 3-4. Vodní clona zabezpečuje tvarování plazmového paprsku, redukuje velikost tepelně ovlivněné zóny řezaného materiálu a zvyšuje kvalitu řezu. Přesto nebylo zlepšení v řezných rychlostech a kolmosti řezu prokázáno [8]. Tato metoda je často spojena s řezáním pod vodní hladinou. Výhodou této metody je významné snížení prašnosti, hlučnosti a vlivu UV záření na obsluhu stroje. Nevýhodou může být právě působení vody, přičemž právě po řezání konstrukční oceli může dojít k následné korozi povrchu součásti.



Obr. 3-4 Schéma řezání s vodní clonou **[8]**

Dle stupně automatizace - Ruční řezání
- Strojní řezání

Technologie řezání plazmovým paprskem je technologie umožňující poměrně přesné řezání kovových materiálů, přičemž kromě vlivu samotného plazmového hořáku má na výsledný řezaný tvar vliv přesnost zařízení, které plazmový hořák v prostoru řídí, vede a polohuje. V minulosti bylo zařízení pro automatizované strojní řezání plazmovým paprskem řešeno

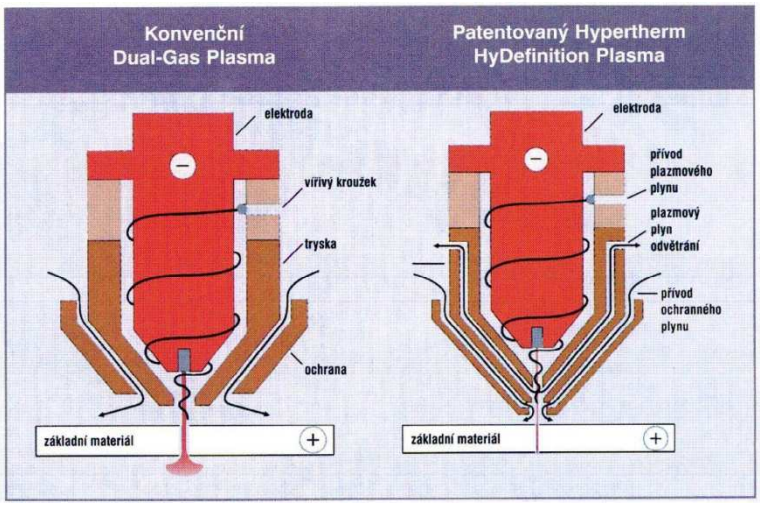
způsobem vskutku zajímavým. Šlo o zařízení, které vedlo řez podél čáry přímo narýsované na plech, či na papíru a vlastní řízení snímalo kontrastní rozdíl a řezací hlavici vedlo podél něj. Aktuální řezací zařízení tzv. routery, jsou řízena pomocí CNC řídicích systémů. Na trhu je mnoho výrobců plazmových zdrojů a ještě více výrobců řezacích zařízení. Proto lze říci, že je i mnoho variant řídicích systémů, které jsou si svým principem podobné, mohou však nabízet možnosti a doplňkové řešení, které se navzájem liší a tím nabízejí zákazníkům volbu.

Řezání plazmovým paprskem je technologie umožňující existenci ručních zařízení. Zařízení se většinou sestává z vlastního elektrického zdroje, svazku hadic a kabel pro uzemnění řezaného materiálu. Plazmový plyn (převážně vzduch) může být dodáván integrovaným kompresorem, externím kompresorem, nebo z tlakové lahve (dusík). Zdroje elektrického proudu jsou většinou invertorového typu, s elektronickým řízením. Díky tomu si zachovávají rozměry a hmotnost přijatelné pro potřeby ručního řezání a přenášení zařízení.

Obr. 3-5 Příklad plazmového zařízení pro ruční řezání **[14]**

3.1.3 HyDefinition plazma

HyDefinition plazma (HD plazma) je relativně nová technologie ve vývoji plazmového řezání, vyvinuta firmou Hypertherm. Firma Hypertherm má patentovaný vlastní HD plazmový hořák. Principem metody je intenzivní redukce průměru plazmového paprsku, čímž dojde ke zvýšení hustoty energie, což znamená vyšší teplotu a vyšší výstupní rychlost plazmy z hořáku. Průměr plazmového paprsku lze redukovat cca na 1,5mm. Pokud je jako plazmový plyn použit kyslík o čistotě alespoň 99,95%, lze dosáhnout relativně kvalitního povrchu řezu, srovnatelného s laserovým řezáním, avšak za zlomek pořizovací ceny zařízení.



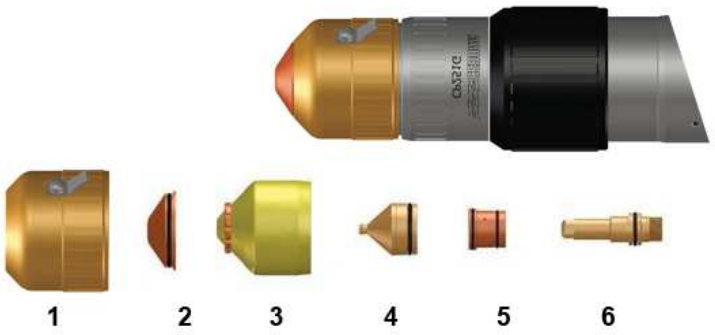
Obr. 3-6 Porovnání konvenčního a HyDefinition hořáku **[10]**

Alternativou technologie HyDefinition firmy Hypertherm je technologie HiFocus firmy Kjellberg[1]

3.1.4 Parametry a kvalita řezu

Mezi základní ukazatele kvality provedení řezu u plazmového řezání řadíme úhel řezu (tzv. zkosení), vzniklé otřepy, vytváření povrchových rýh a celkový vzhled řezu. Pro hodnocení kvality řezu je nutné zahrnout a hodnotit všechny tyto parametry. Tyto ukazatele lze částečně ovlivňovat nastavením optimálních parametrů řezu. Většina konvenčních plazmových hořáků je konstruována pro řezání určitého rozsahu tloušťek materiálu, podle které je optimalizován paprsek vycházející z trysky.

Díly hořáku podléhají v průběhu času opotřebení. Opotřebení podléhají elektrody, vířivé kroužky, trysky, krytky. Elektrody jsou vystaveny elektroerozívnímu působení elektrického oblouku a oxidačnímu působení kyslíku. U elektrod je důležité dodržovat předepsanou životnost, nedodržením se zvětšuje nesymetrie paprsku a tím dochází ke snižování přesnosti řezu. Dalším spotřebním dílem je tryska hořáku. Tryska slouží k zúžení svazku plazmatu do úzkého paprsku. Čím má paprsek menší průměr, tím větší je jeho plošná energie a dosahuje se kvalitnějšího řezu. U trysky dochází postupem času k opálení výstupního otvoru a tím k rozšíření paprsku, možnosti jeho vybočení z osy hořáku a ztráty přesnosti řezání. Vířivé kroužky zabezpečují rotaci a usměrnění proudu plynu. Opotřebení vířivých kroužků mění dráhu paprsku plynu a tím jeho polohu vůči ose hořáku-dochází k rychlému opotřebení dalších prvků. Vířivé kroužky zabezpečují také chlazení hořáku, pokud je toto narušeno, opět dochází k rychlému opotřebení ostatních dílů.

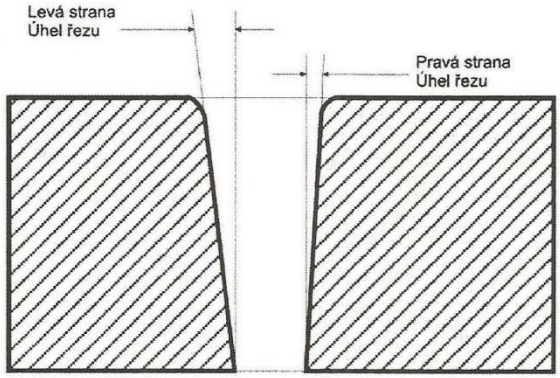


1 – Nosič ochranného štítu
2 – Ochranný štít
3 – Chladící štít
4 – Tryska
5 – Vířivý kroužek
6 – Elektroda

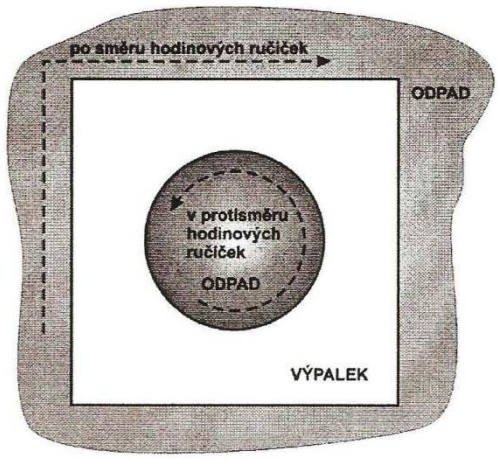
Obr. 3-7 Schéma strojního plazmového hořáku **[16]**

Úhel řezu (kolmost hrany) hraje významnou roli při hodnocení kvality plazmového řezání. Z podstaty fungování plazmového paprsku se mu nelze úplně vyhnout, ikdyž některé metody fokusace ho více či méně úspěšně eliminují. Je ovlivněn několika faktory. U většiny plazmových zdrojů spirálovité proudění plazmového plynu zajišťuje hladký povrch paprsku, ale taktéž způsobuje rozdílnou kolmost na levé a pravé straně řezu.[11]

[1] Více info na: http://www.kjellberg.de



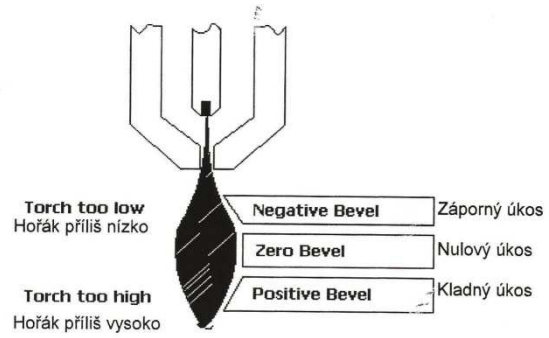
Obr. 3-8 Průřez řezem plazmového paprsku **[11]**



Obr. 3-9 Směr řezání plazmou **[11]**

Úhel řezu na pravé straně je více kolmý než úhel na levé straně řezu. Proto platí pravidlo používání korekce G41 – korekce zleva (Obr. 3-9). Korekce v tomto případě způsobí upravení vlastní dráhy řezání korigováním o poloměr plazmového paprsku. Průměr paprsku při řezání plazmou se pohybuje cca mezi 2-6mm, záleží na technologii a tloušťce řezaného materiálu.

Dalším faktorem ovlivňujícím úhel řezu je výška hořáku nad řezaným materiálem. Tvar plazmového paprsku je znázorněn na (Obr. 3-10). U většiny hořákových systémů jsou díly výměnné a přizpůsobené rozsahu tloušťky řezaného materiálu. Např. pokud plazmový zdroj umožňuje řezat materiál silný 2-30mm, používá se speciální hořák pro 2-10mm, 10-25mm, 25-30mm. Každý z těchto hořáků provádí soustředění (fokusaci) paprsku na specifickou vzdálenost.



Obr. 3-10 Schéma tvaru paprsku plazmy **[11]**

Otřepy při pálení plasmou vznikají zejména na spodní straně řezaného dílu. Protože se jedná o tepelný způsob řezání, dochází k roztavení materiálu v místě řezu a tavenina je následně vyfukována proudem plazmového plynu. Při vyfukování taveniny z dolní části řezu dochází k jejímu nalepování na spodní hranu. Tyto otřepy jdou většinou jednoduše odstranit oklepem, protože u plazmového řezání nedochází k velké tepelně ovlivněné ploše, tavenina se ke studenému povrchu řezaného dílu nepřichytí nijak silně. Spolu s tím je spojeno okujení povrchu řezu, jehož tvorba je ovlivněna teplotou plazmy, a použitých plynů.

3.1.5 Obráběné materiály

Metoda plasmového obrábění byla vyvinuta pro potřebu dělení materiálů, pro které byl klasický způsob řezání kyslíkem, díky jejich vlastnostem a chemickému složení, nepoužitelný. Jednalo se např. o vysoce legované oceli, hliníkové slitiny, slitiny mědi. Vzhledem k relativně nízké velikosti tepelně ovlivněné oblasti a vysoké řezné rychlosti se tato technologie rozšířila a v současnosti je používána i na řezání měkkých konstrukčních ocelí, kde díky vývoji této technologie konkuruje laserovým zařízením.

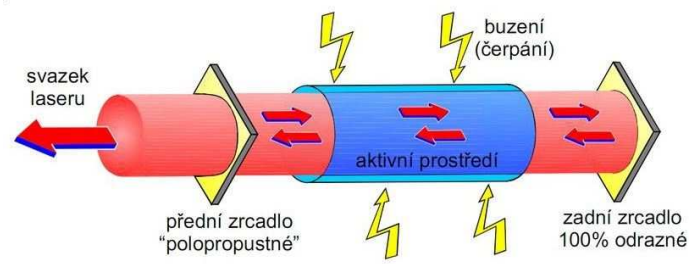
Další oblastí použití plazmy je svařování kovů, navařování vrstev materiálů a nástřiky materiálů.

3.2 Řezání laserovým paprskem

3.2.1 Princip metody

Metoda řezání laserovým paprskem využívá technologii přeměny elektrické energie na vysokoenergetický paprsek elektromagnetického záření. Vzniklý svazek monochromatického světla je ze zdroje vyzařován v úzkém svazku paprsku. Přenos paprsku od laserového zdroje do funkční části stroje- řezné hlavice, je různý podle využité technologie laserového zdroje.

Základem laserového zdroje je aktivní prostředí, do kterého je pomocí elektrického zdroje dodávána energie. Dojde k vybuzení elektronů aktivního media ze základní energetické hladiny do vyšší energetické hladiny, vzniká tzv. excitovaný atom. Tím dojde k nerovnovážnému stavu média. Když dojde k nárazu fotonu do excitovaného atomu, dojde k vyzáření jeho přebytečné energie ve formě dalšího fotonu. Aktivní prostředí je umístěné v tzv. rezonátoru. Rezonátor se skládá ze dvou zrcadel, z nichž první je plně odrazivé a druhé polopropustné. Fotony vzniklé v aktivním médiu se mezi těmito zrcadly odráží a tím budí další excitované atomy k přechodu na nižší energetickou hladinu. Vzniklé fotony mají identickou energii, vlnovou délku, barvu a směr pohybu. Existují lasery, jejichž aktivní prostředí má tak silný energetický zisk, že není potřeba rezonátor.



Obr. 3-11 Schéma laserového zdroje **[12]**

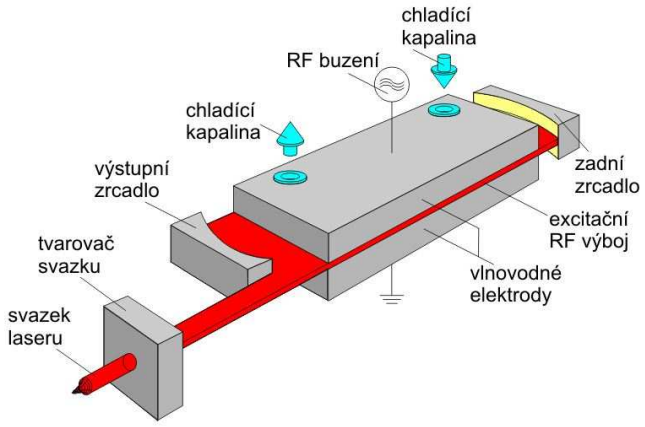
Při řezání laserem nedochází k silovému působení laserového paprsku na materiál. K deformacím řezaného materiálu může docházet tepelným ovlivněním v blízkosti řezu či uvolněním vnitřního napětí válcovaného plechu, což může způsobit kroucení, vyboulení plechu při řezání. Pro dobře vedený řez je nutné tyto deformace včas odhalit a učinit protiopatření, např. řízení vzdálenosti řezné hlavice od řezaného materiálu.

3.2.2 Rozdělení laserů

Zdroje laserového paprsku se od sebe liší zejména typem aktivního prostředí. Existuje mnoho druhů laserů, každý má ale svá specifika a je vhodný pro určitou aplikaci. Ve strojírenství pro potřebu řezání kovových materiálů se využívají zejména plynové a pevnolátkové lasery.

Plynový laser

Aktivním prostředím plynových laserů je směs plynů. Pro použití ve strojírenských aplikacích se používá směs plynů na bázi oxidu uhličitého CO_2. Buzení se u plynových laserů provádí radiofrekvenčně nebo elektrickým výbojem. Provedení rezonátoru je buď uzavřené, kde je plyn hermeticky uzavřen, nebo průtočné, kde plyn neustále proudí. Průtočný rezonátor se používá pro dosažení vysokých výkonů, proudění plynu zajišťuje chlazení rezonátoru. Plynové lasery dosahují výkonů až 20kW. Jsou vhodné jak pro řezání kovových i nekovových materiálů, značení a gravírování. Nevýhodou těchto laserů je vlnová délka záření cca 10μm, které nelze vést optickým vláknem. Vedení optického svazku se provádí pomocí zrcadel, které tvoří optickou soustavu odrážející laserový paprsek ze zdroje k řezné hlavici. Je nutné zajistit čistotu přenosové soustavy, její údržbu a kalibraci. Účinnost přeměny elektrické energie na světelnou se pohybuje mezi 10-25% [12].



Obr. 3-12 Schéma plynového laserového zdroje **[12]**

Pevnolátkový laser

Do kategorie pevnolátkových laserů patří zdroje, u nichž je aktivní médium tvořeno látkou pevného skupenství. V průmyslu se používají zdroje, kde aktivní prostředí tvoří krystal YAG (Ytrium, Aluminium, Granát) s ionty neodymu -Nd:YAG, nebo yterbia – Yb:YAG. Dále se tyto zdroje dělí podle geometrie aktivního prostředí na vláknový, diskový a Nd:YAG laser.

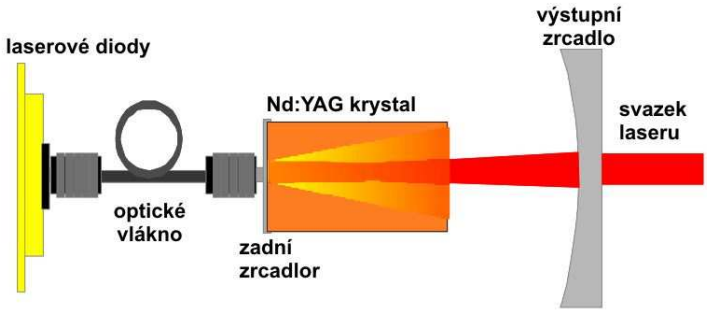
Vláknový laser má aktivní prostředí ve tvaru dlouhého optického vlákna, je dopováno Yterbiem (Yb:YAG laser). Soustava neobsahuje zrcadla, přímo v optickém vlákně jsou vyhotoveny odrazné struktury, tzv. Braggovy mřížky. Schéma soustavy je na Obr. 3-13.

Obr. 3-13 Schéma zdroje vláknového laseru **[12]**

Výhodami tohoto typu laseru je jeho jednoduchost, malé nároky na prostorovou zástavbu. Systém je modulární- spojováním jednotlivých modulů lze dosáhnout velkých výkonů (až 80kW [12]). Vláknový laser má vysokou účinnost přeměny (cca 35%) a je téměř bezúdržbový.

Diskový laser má aktivní prostředí ve tvaru malého disku. Jeho hlavní výhodou je rovnoměrné teplotní zatížení v objemu disku. Nízké nároky na prostor zástavby umožňují jeho využití v řezacích či svařovacích modulech na robotických pracovištích.

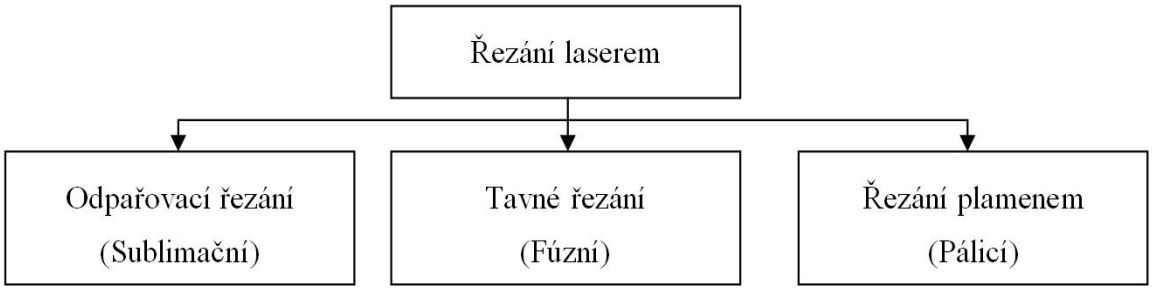
Nd:YAG lasery používají dva typy buzení- xenonovými výbojkami nebo tzv. laserovými diodami. Buzení výbojkami se vyznačuje nízkou účinností přeměny elektrické energie na světelnou, velkou část se přemění na energii tepelnou, kterou je nutné odvést chlazením. Nízká životnost výbojek a vysoké náklady na údržbu vedou k opouštění této metody. Technologie Nd:YAG laseru buzeného diodami se dělí podle umístění laserových diod na rezonátor s bočním buzením a zadním buzením. Výhodou oproti výbojkovému buzení je vyšší účinnost, nižší tepelné ztráty, delší životnost. U technologie zadního buzení jsou diody umístěny mimo rezonátor a laserový svazek je do něj přiveden optickým vláknem.



Obr. 3-14 Schéma DPSS Nd:YAG laseru se zadním buzením **[12]**

3.2.3 Metody řezání laserem

Řezání paprskem laseru v průmyslu je prováděno pomocí tří základních principů.



Sublimační řezání

Při sublimačním řezání dochází k lokálnímu ohřevu na teplotu, při které dojde přímo k odpaření řezaného materiálu. Pro dosažení sublimačního řezání je nutný dostatečný plošný výkon laserového paprsku. Páry, vznikající v řezné spáře, mohou kondenzovat na řezných plochách, proto jsou ze spáry vyfukovány pomocným inertním plynem. Ten zároveň chrání řezné plochy před oxidací vzdušným kyslíkem. Jako pomocný plyn se používá dusík, argon, helium.

Sublimační řezání se provádí u materiálu, které nejsou tavitelné, např. dřevo, nebo některé keramické materiály, folie z umělé hmoty, textilie, atd. Tato metoda řezání dosahuje velmi kvalitního řezu, je však pomalejší než jiné metody.

Tavné řezání

Tavné (fúzní) řezání probíhá tak, že materiál v místě řezu je taven laserovým paprskem. Takto lze řezat všechny tavitelné materiály, zejména kovy. Roztavený kov je z místa řezu vyfukován pomocným (řezným) plynem, nejčastěji dusík nebo argon, směrem dolů od místa řezu. Plyn se vhání do řezné spáry pod tlakem 2-20 barů. Pomocný plyn s řezaným materiálem chemicky nereaguje, slouží pouze pro vyfukování taveniny z řezné spáry, řezání zajišťuje pouze energie laseru. Ta je oproti metodě sublimačního řezání nižší, protože dochází pouze k natavování materiálu. Metodou tavného řezání lze dosáhnout kvalitního řezu, pokud jsou dodrženy technologické podmínky. Jejich nedodržením může docházet např. k vyprskávání taveniny a nalepování na hrany nebo plochy výpalku.

Tento způsob řezání je velmi vhodný pro barevné kovy (hliník, měď), ale i pro ocel, zejména pro legované (nerez) oceli.

Řezání plamenem

Metoda řezání plamenem využívá energii laserového paprsku k ohřátí materiálu v místě řezu na jeho zápalnou teplotu (u nelegované nízkouhlíkové oceli cca 1100°C). Následně je do řezu přiveden řezný plyn- kyslík o vysoké čistotě, při tlaku až 6 Bar. Zahřátý kov reaguje s kyslíkem a dochází k exotermické reakci, při které se uvolňuje velké množství tepla (až pětinásobek energie laserového paprsku [13]). Vzniklá energie podporuje proces řezání. Kvalita řezu je oproti tavnému nebo sublimačnímu řezání nižší, avšak pro většinu aplikací je postačující. Velkou výhodou této metody je, kromě nižšího potřebného výkonu laseru, také vysoká řezná rychlost, vůči ostatním způsobům laserového řezání.

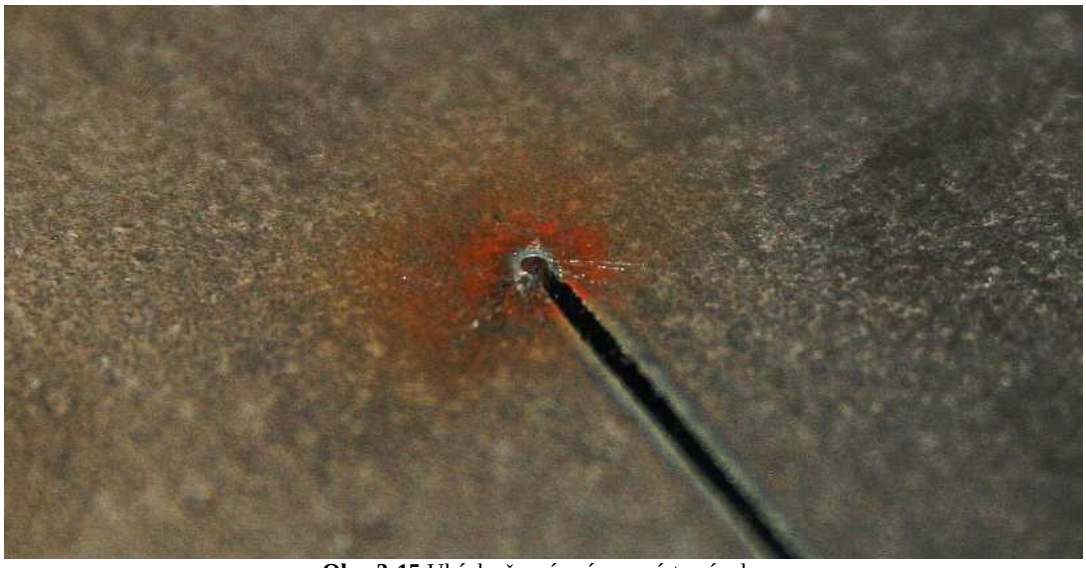
Metoda řezání plamenem se hojně využívá pro řezání konstrukčních ocelí. Lze použít pouze pro kovy, které s kyslíkem reagují exotermně.

3.2.4 Parametry a kvalita řezu

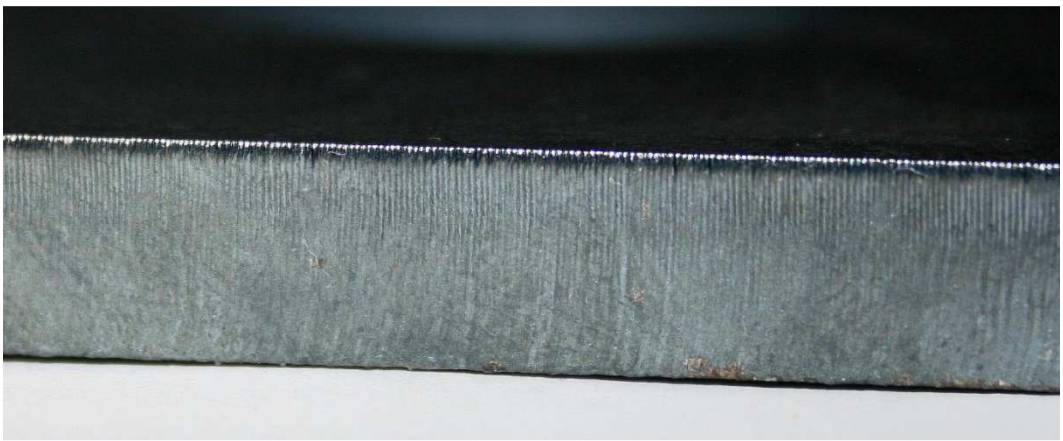
Paprsek laseru, tak, jak protavuje materiál, zanechává po sobě řeznou spáru. Její šířka se pro různé tloušťky materiálu a různé technologie laserového paprsku pohybuje v rozmezí několika desetin milimetru (cca 0,2-0,4mm), blíží se průměru laserového paprsku. Pro dosažení požadované přesnosti výpalku je nutné provést korekci programované dráhy o poloměr paprsku laseru vzhledem ke směru pohybu- korekce zprava a korekce zleva.

Kritickým místem tavného a plamenového řezání je začátek, tzv. zápal. Materiál se působením laserového paprsku taví, ale nemá prostor, kudy řez opustit, dokud není materiál propálen skrz celou tloušťku. Dochází k prskání taveniny na povrch řezaného materiálu, dochází k nahromadění tepelné energie v místě zápalu a tím k tepelnému ovlivnění materiálu. Ukázka místa zápalu je zobrazena na Obr. 3-15. Místo zápalu se při programování dráhy řezání umísťuje mimo řezanou konturu a následně dojde k najetí na konturu řezu.

Nastavením optimálních podmínek řezání lze dosáhnout optimální kvality řezu, nelze ji však výrazně ovlivňovat jejich změnou. Při řezání plechů menších tloušťek (do 5-6 mm) je řez relativně hladký. S rostoucí tloušťkou materiálu se u laserového řezání objevuje typická striace (vlnkovitost) povrchu řezu. Příklad vzhledu řezné ploch je na obrázku



Obr. 3-15 Ukázka řezné spáry a místa zápalu



Obr. 3-16 Detail řezu u plechu tl. 8mm (mat. S235JR)

Zvláště u větších tloušťek plechů dochází místy k okujení povrchu a ke vzniku otřepů na spodní straně řezu. Z obrázku Obr. 3-16 je patrné natavení materiálu vznikající ve větší hloubce řezu.

Při řezání vzniká řezná spára s úkosem, tj. na horní straně je řezná spára širší než na straně spodní. Toto je ovlivněno sílou plechu, přičemž u slabých plechů je řez téměř kolmý, s vzrůstající tloušťkou se úkos zvětšuje.

3.3 Řezání vodním paprskem

3.3.1 Princip metody

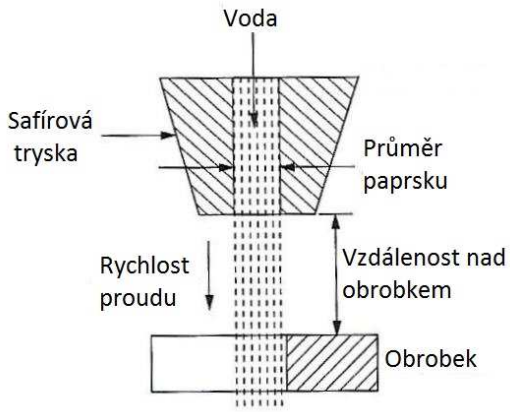
Metoda řezání vodním paprskem funguje na principu vodní eroze materiálu. Podobně, jako k tomu dochází v přírodě, působením proudu vody docházíí k postupnému omílání materiálu. Oproti přírodě je ale tento způsob pro průmyslové využití značně urychlen. Tato technologie je moderní a ekologický způsob dělení různých materiálů. Vývojem technologie došlo k vylepšení řady parametrů. Pro zefektivnění technologie jsou do vody přidávány abrazivní částice, které proces značně urychlují.

3.3.2 Rozdělení technologií

Technologie řezání vodním paprskem

Technologie řezání vodním paprskem využívá v omílání materiálu paprsek vody o malém průměru a velmi vysokém tlaku. Zdrojem tlakové vody je vysokotlaké vodní čerpadlo a multiplikátor, díky kterému lze dosáhnout tlaku až 6000 barů. Voda je pak vysokotlakými hadicemi přivedena do řezací hlavice, ve které se v trysce upraví na vodní paprsek, který má výstupní rychlost až čtyřnásobně větší, než je rychlost zvuku a průměr několika desetin milimetru. Výstupem z trysky voda ztrácí tlakovou energii, která se mění na kinetickou.

Tato technologie se používá především pro řezání měkkých materiálů (proto byla i vyvinuta). Běžně se řežou plasty, pryž, pěnové materiály, izolační materiály, do tloušťky až stovek milimetrů. Časté je použití v potravinářství, protože při použití patřičně upravené vody se jedná o hygienický řez.



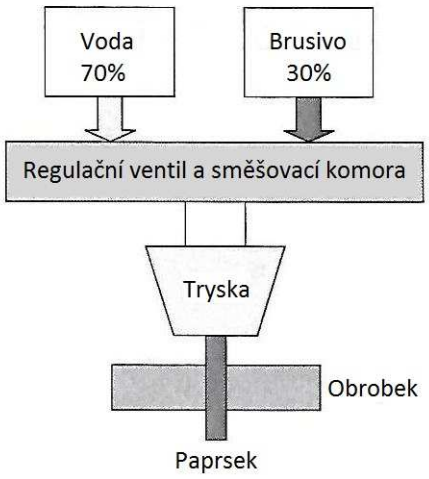
Obr. 3-17 Schéma řezání vodou **[8]**

Trysky jsou zhotovovány z polodrahokamů a drahokamů, jako např. safír, rubín, diamant. Otvor v trysce je průměru cca 0,07-0,50mm. Čím větší je otvor, tím větší je potřebný výkon čerpadla, které musí při větším průtoku vody udržet vysoký tlak. Aby byl paprsek vody soudržný a uspořádaný, musí mít tryska hladký povrch otvoru a velmi ostrou spodní hranu. Jakkoliv poškozený povrch nebo zaoblení hrany způsobí vznik turbulencí v paprsku, jeho vychýlení a ztrátu měrné energie působící na řezaný materiál.

Technologie řezání vodním paprskem s příměsí abraziva

Tento způsob posouvá možnosti technologie vodního paprsku na další úroveň. Přidáním brusných částic do paprsku vody se značně zvýší účinnost řezání, u některých materiálů tím dojde k vlastnímu umožnění procesu řezání, například u tvrdých materiálů, kovů, atd.

Před vlastní trysku je do řezací hlavy umístěn prvek, tzv. Venturiho trubice. Ta využívá tzv. Venturiho efektu, tj. při přechodu proudícího media ze širší části do užší vzniká podtlak. Pod tlakem je následně do trubice nasáváno abrazivo. Při dotyku abrazivních částic s vodou dojde k jejich okamžitému urychlení a jsou doslova vystřeleny ven z trysky. Následný paprsek obrušuje obráběný materiál.



Obr. 3-18 Schéma zařízení pro řezání vodním abrazivním paprskem **[8]**

Jako abrazivum musí být používány materiály s dostatečnou tvrdostí (poměr tvrdosti abraziva vůči řezanému materiálu) pro zajištění řezání. Materiály abraziva se dělí na lehké a těžké. Zástupcem těžkých je drcený granát, běžně pro většinu aplikací, díky své řezací schopnosti a ceně. Také způsobuje nižší opotřebení trysky. Zrnitost se pohybuje na hodnotách 50-250 Mesh. Dalším materiálem této kategorie jsou například ocelové piliny. Mezi lehká abraziva patří např. korund (Al_2O_3) a křemičitý písek.

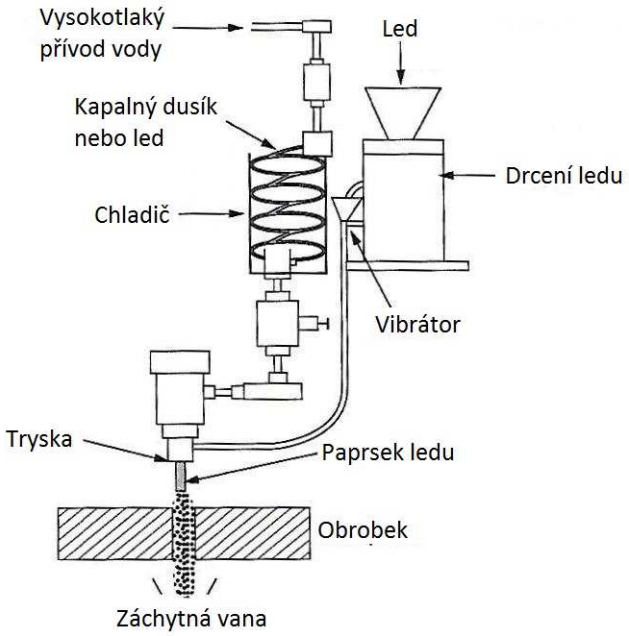
Čím je použité abrazivo jemnější, tím lze dosáhnout kvalitnějšího řezu, ale při snížení řezné rychlosti. Při použití hrubšího abraziva je kvalita řezu nižší, ale řezná rychlost vyšší.

Stejně jako u řezání čistým vodním paprskem, jedná se o technologii se studeným řezem, tzn., že při řezání nevzniká teplo, neodchází k tepelnému ovlivnění řezaného materiálu, vzniku napětí a deformací.

Technologie řezání vodním paprskem s příměsí částic ledu

Tento způsob řezání využívá jako brusný materiál drcené částice ledu. Led je pevné skupenství vody, běžně se tvoří podchlazením vody pod teplotu 0 stupňů Celsia.

Technologie poskytuje větší účinnost řezání než čistý vodní paprsek, ale nižší než abrazivní vodní paprsek. To je dáno nižší tvrdostí ledových částic v porovnání s tvrdostí abraziva, např. granátem.



Obr. 3-19 Schéma zařízení technologie IJM **[8]**

Využití tohoto způsobu je tedy vhodné při aplikacích, při které není přípustná jakákoliv kontaminace řezaného obrobku cizím materiálem, např. ve farmacii, elektrotechnice, potravinářství. Menší velikost ledových částic taktéž umožňují využití tenčího řezného paprsku, menšího průměru otvoru trysky.

4. VÝBĚR POSUZOVANÝCH METOD DĚLENÍ MATERIÁLU A STANOVENÍ KRITÉRIÍ PRO JEJICH HODNOCENÍ

Vypracováno s použitím [11], [15], [19], [20], [23].

V této diplomové práci jsou porovnávány tři produktivní metody dělení materiálů, které jsou v současnosti v průmyslové praxi hojně zastoupeny. Jedná se o technologii řezání vodním paprskem, laserovým paprskem a plazmou. Oblasti využití jednotlivých technologií se z velké části prolínají a záleží tak na přesné definici aplikace, pro kterou se následně hledá nejvhodnější řešení. Jednotlivé technologie a zařízení se liší svou fyzikální podstatou, produktivitou obrábění, cenou zařízení a náklady na řezání.

4.1 Technologie řezání plazmou

4.1.1 Popis stroje

Experiment řezání plasmou byl proveden na CNC plazmovém řezacím stroji Vanad KOMPAKT (Obr. 4-1). Stroj je určen zejména pro využití konvenčních ale i nejmodernějších plazmových zdrojů. Je vybaven precizními pohony a lineárním vedením všech posuvných částí. [15]

Obr. 4-1 CNC pálicí stroj Vanad Kompakt **[15]**

Jedná se o stroj klasické portálové konstrukce, hlavice se pohybuje pomocí suportu po příčném portálu, jehož podélný pojezd je řešen kolejnicemi lineárního vedení. Rozměry stroje jsou uzpůsobeny použití standardních formátů plechů. Konkrétně se zde jednalo o formát maximálně 2x6 metrů do tloušťky 50mm. Pod lamelovým roštem stolu se nachází záchytné vany na prach vznikající při procesu pálení oceli a na drobné kusy kovu, např. odpad při řezání otvorů.
Tento plazmový řezací stroj byl vybaven plazmovým zdrojem Kjellberg HiFocus 161i (Obr. 4-2). Zdroj je vhodný pro řezání konstrukční oceli o tloušťce až 50mm. Umožňuje využívání vysokých řezných rychlostí při zachování nízké energetické náročnosti a zajišťuje kvalitní a stabilní plazmový paprsek.

Obr. 4-2 Plazmová řezací jednotka HiFocus 161i neo **[18]**

Plazmový zdroj je vybaven hořákem PerCut 210, který je určen k použití se zdroji HiFocus 161i. Hořák je vybaven účinným kapalinovým chlazením, které má za následek snížení opotřebení dílů hořáku. To má vliv na kvalitu řezného paprsku, dosahování vysoké hustoty energie a velmi úzký paprsek. Konstrukce vnitřních dílů hořáku klade důraz na optimalizaci spotřeby plynů a tvorbu emisí při řezání. K dispozici je i zařízení ATChanger, které umožňuje automatizovanou výměnu hlavy hořáku. [11]

Obr. 4-3 Plazmový hořák PerCut 210 **[17]**

Obr. 4-4 Rozstřel dílů hořáku PerCut 210 **[18]**

Pro různé tloušťky materiálů se používají odpovídající díly hořáku, které mají vliv na fokusování plazmového paprsku na odpovídající průměr a délku paprsku.

Chod stroje Vanad KOMPAKT je zabezpečen řídicím systémem B&R X20, což je produkt firmy Bernecker & Rainer, pracující se standardním ISO kódem dle DIN 66024 [11]

„Řídicí systém X20 je otevřený I/O systém, který je možné implementovat centralizovaně i decentralizovaně. Uživatel si určuje vlastnosti, strukturu a topologii. Skok ve flexibilitě přináší decentralizovaná základová deska (backplane). Mezi jednotlivými moduly můžete překonat téměř neomezenou vzdálenost. Mohou být umístěny vedle sebe na liště, v jednom rozvaděči, až 100 m do sebe nebo v kombinaci s ostatními díly B&R.“[19]

4.1.2 Popis procesu řezání

Samotný proces řezání se skládá z několika kroků, které po sobě přesně navazují, a jejich sled nelze zaměnit. Hlavice s hořákem najede na požadované souřadnice místa zápalu, v osách X a Y, v ose Z (výška nad obrobkem) se pohybuje v bezpečné výšce. Následuje zjištění vzdálenosti hořáku nad obrobkem pomocí výsuvného dotykového senzoru a najetí hořáku na výšku v ose Z, potřebnou pro zápal. První etapou vzniku plazmového paprsku je zapálení elektrického oblouku mezi vnitřní a vnější elektrodou hořáku. Vzniklý elektrický oblouk je profukován plazmovým plynem, ten se průchodem ionizuje a vzniká tzv. pilotní paprsek. Hořák sjede v ose Z na pracovní výšku. Přiblížením hořáku k materiálu je pomocí elektroniky vyhodnocena zvýšená vodivost a je zvýšen řezací proud na nutnou hodnotu, přitom dochází ke zvýšení průtoku plazmového plynu tryskou. Tím dojde ke vzniku pracovního plazmového paprsku, který začne propalovat materiál. Zároveň je spuštěn ochranný, fokusační plyn. Při dělení silnějších plechů je obvykle po zapálení hlavního paprsku hořák oddálen od materiálu z důvodu ochrany před odlétávající taveninou, při dělení slabších plechů je propal natolik rychlý, že

toto není nutné. Po prvotním propálení tloušťky materiálu plazmovým paprskem je hořák strojem veden po požadované kontuře, korigován o poloměr paprsku a směru pohybu hořáku vůči řezanému tvaru. Po dokončení řezání dojde k přerušení přívodu elektrického proudu, zhasnutí elektrického oblouku a plazmového paprsku. Nakonec je zastaven přívod plynů.

4.1.3 Vygenerovaný NC kód řezání

```
%1(JF_Vzorek.PRG)
(JM= JF_VZOREK)
(Poradi v sestave=1)
N12 G90 G00 X52.002 Y-22.006 FEXF0
N14 D02
N16 G91 G00 X52.002 Y-22.006
N18 FEXF0
N20 G01 X-20 Y0  M07
N22 G01 X-20 Y0
N24 M09
N26 G00 X-15.439 Y5.837
N28 D02
N30 G41
N32 G00 X-15.439 Y5.837
N34 G03 X2.251 Y-14.586 I3.08 J-6.991 M07
N36 G03 X15.354 Y20.959 I1.627 J14.912
N38 G03 X-12.354 Y-20.984 I-13.727 J-6.047
N40 M09
N42 G00 X-14.686 Y-23.532  G40
N44 D01
N46 G41
N48 G00 X-14.687 Y-23.531
N50 FEXF0
N52 G01 X0 Y80  M07
N54 G02 X10 Y10 I10 J0
N56 G01 X100 Y0
N58 G01 X0 Y-70
N60 G01 X-10 Y-10
N62 G01 X-5 Y0
N64 G01 X0 Y10
N66 G01 X-100 Y0
N68 M09
N70 G00 X2 Y2 G40
N72 M30
```

Význam použitých adres:

N	-	Číslo bloku
G00	-	rychloposuv
G01	-	Lineární interpolace
G02	-	Kruhová interpolace CW
G03	-	Kruhová interpolace CCW
G90	-	Zadávání absolutních souřadnic
G91	-	Zadávání přírůstkových souřadnic
G41	-	Poloměrová korekce vlevo
G40	-	Zrušení poloměrové korekce
D01	-	Číslo položky v tabulce korekcí
X	-	Zadání dráhy v mm v ose x
Y	-	Zadání dráhy v mm v ose y
I	-	Vzdálenost středu kružnice v ose X od posledního bodu
J	-	Vzdálenost středu kružnice v ose Y od posledního bodu
FEXF0	-	Posuv dle tabulkové hodnoty
M07	-	Zapnutí řezání na začátku bloku
M09	-	Vypnutí všech technologií
M30	-	Konec programu

4.2 Technologie řezání laserem

4.2.1 Popis stroje

Experiment řezání paprskem laseru byl proveden na stroji Trumpf TruLaser 3030 Fiber. Jedná se o moderní laserové řezací centrum, dosahující vysoké efektivity řezání díky použití pevnovláknového laserového zdroje TruDisk 4001 o maximálním výkonu 4kW. Díky tomu je možné řezat konstrukční ocel do tloušťky 25mm, nerezovou ocel do tloušťky 15mm a hliníkové slitiny do tloušťky 12mm. Umožňuje také řezání mědi a jejích slitin. [20]

Obr. 4-5 Trumpf TruLaser 3030 **[20]**

Zařízení je uzavřené rámové konstrukce, která zabezpečuje dostatečnou tuhost systému. I díky tomu je stroj schopen dosahovat vysokých řezných rychlostí (až 45m/min při řezání konstrukční oceli 0,5mm) a přejezdových rychlostí (simultánně až 140 m/min)

Zařízení TruDisk 4001 je diodami buzený diskový laser produkující paprsek o vlnové délce 1,03µm. Konstrukce zdroje umožňuje napojení více odběrných zařízení. Vysoká účinnost umožňuje hospodárný provoz stroje i při použití maximálních výkonů. [20]

Stroj je řízen řídicím systémem Sinumerik 840D SL, přizpůsobený potřebám laserového řezání. Systém je produktem firmy Siemens AG.

4.2.2 Popis procesu řezání

Řezání laserem dělíme na tři hlavní metody, přičemž v praxi se pro řezání plechů používají metody tavného řezání a řezání plamenem. Při řezání metodou tavného řezání laserová hlavice najede na počáteční souřadnice určující místo zápalu, které může být mimo hlavní konturu, ale i její součástí. Záleží na požadovaných parametrech přesnosti řezané plochy. Následuje najetí na požadovanou vzdálenost v ose Z, což je výška hlavice nad obrobkem. Vzdálenost je zjištěna buď dotykovým senzorem, dnes však častěji bezdotykovými, které umožňují podstatné zrychlení této procedury. Dalším krokem je spuštění laseru. V případě zařízení použitého pro experiment dojde k vybuzení aktivního prostředí laseru pomocní světelných diod, vycházející laserový paprsek je pomocí optického vlákna veden ze zdroje do řezné hlavice, kde dochází k jeho fokusaci do potřebného ohniska. Zároveň s tím dojde ke spuštění přívodu asistenčního plynu. Dochází k prvotnímu protavování tloušťky materiálu, tento proces doprovází odlétávání jisker roztaveného materiálu nad řezaný materiál. Po protavení materiálu skrz již dochází k vyfukování taveniny pod řezaný materiál. Po propalu dojde k najetí na konturu řeznou rychlostí odpovídající daným podmínkám řezání a k řezání kontury vyráběného dílu. Dráha hlavice je korigována o poloměr laserového paprsku tak, aby byla minimalizována

rozměrová chyba. Vzhledem k vysoké posuvové rychlosti hlavice dochází ke zpoždění tavení mezi horní a spodní hranou obrobku, paprsek zanechává typickou stopu.

Při dělení metodou plamenového řezání je postup obdobný. Hlavice najede na pozici zápalu, v ose Z pak na požadovanou vzdálenost od obrobku. Laserový paprsek začne tavit horní vrstvu materiálu, asistenční plyn (v tomto případě kyslík O_2 o čistotě 99,5%) v první části řezu vyfukuje taveninu, dále ale dochází ke vzniku exotermické reakce. Při této reakci vzniká velké množství energie, několikanásobně přesahující energii samotného laserového paprsku. Na takto řezaném povrchu jsou viditelné jednotlivé fáze řezání (Obr. 4-6). Další postup je obdobný jako u řezání tavného.

Obr. 4-6 Povrch řezu při metodě řezání plamenem

4.2.3 Vygenerovaný NC kód řezání

```
N10 MSG("CISLO PODPROGRAMU,SP1T2_VZOREK")
N20 G91
N30 ;(CISLO DILU:1)
N40 TC_POS_LEVEL(40.0)
N50 ;(CÍSLO OBRYSU:1)
N60 TC_LASER_ON(9,"SS020MD0-N2S0-30-2",10,100);SprintLine
N70 TC_LASERCORR_ON(T_LEFT)
N80 X-3.145 Y3.218
N90 G03 X-0.242 Y0.002 I-0.122 J-0.119
N100 G03 I10.607 J-10.607
N110 TC_LASER_OFF(3);SprintLine_ENDE
N120 ;(CÍSLO OBRYSU:2)
N130 G01 X-1.393 Y16.393
N140 TC_LASER_ON(9,"SS020MD0-N2S0-30-2",11,100);SprintLine
N150 Y40.000
N160 G822
N170 TC_LASER_OFF(3);SprintLine_ENDE
N180 ;(CÍSLO OBRYSU:3)
N190 X-40.000 Y-4.500
N200 TC_LASER_ON(9,"SS020MD0-N2S0-30-2",10,100);SprintLine
N210 TC_LASERCORR_ON(T_LEFT)
N220 Y4.500
N230 Y4.793
N240 G02 X0.146 Y0.353 I0.500
N250 G01 X9.707 Y9.708
N260 G02 X0.354 Y0.146 I0.354 J-0.354
N270 G01 X69.293
N280 G02 X0.500 Y-0.500 J-0.500
N290 G01 Y-99.500
N300 G02 X-10.000 Y-10.000 I-10.000
N310 G01 X-59.500
```

```
N320 G02 X-0.500 Y0.500 J0.500
N330 G01 Y94.000
N340 G03 X-0.500 Y0.500 I-0.500
N350 G01 X-9.500
N360 TC_LASER_OFF(3);SprintLine_ENDE
N370 G01
N380 G90
N390 M30
```

Význam použitých adres:

N	-	Číslo bloku
G00	-	rychloposuv
G01	-	Lineární interpolace
G02	-	Kruhová interpolace CW
G03	-	Kruhová interpolace CCW
G90	-	Zadávání absolutních souřadnic
G91	-	Zadávání přírůstkových souřadnic
X	-	Zadání dráhy v mm v ose x
Y	-	Zadání dráhy v mm v ose y
I	-	Vzdálenost středu kružnice v ose X od posledního bodu
J	-	Vzdálenost středu kružnice v ose Y od posledního bodu
M30	-	Konec programu

4.3 Technologie řezání vodním paprskem

4.3.1 Popis stroje

Experiment řezání vodním paprskem byl proveden na stroji PTV Cobra. Jedná se o model nové generace stolů tohoto výrobce. Konstrukce stroje vychází z použití portálu, pohybujícího se v podélné ose (délka podélné osy může být od 1 do 30m), po kterém se pohybuje vlastní support s řeznou hlavicí a zásobníkem abraziva. Na stroji jsou pro použita lineární vedení, kalené a broušené ozubené pastorky a hřebeny pro dosažení vysoké přesnosti pojezdu v jednotlivých osách. Prvky pojezdu jsou chráněny kryty proti odstřikující vodě. Pracovní stůl je proveden jako nádrž na vodu s roštem, na který se umisťuje obráběný polotovar. [21]

Obr. 4-7 PTV Cobra **[21]**

Stroj byl vybaven naklápěcí hlavicí, která umožňuje plynulé naklápění do úhlu 60°. Touto hlavicí je možné provádět 3D řezací operace.

Zdrojem řezné vody bylo vysokotlaké čerpadlo PTV JETS-3.8/60 Compact. Ve svém názvu napovídá o dosahovaných parametrech, a to průtokové množství vody 3,8 litru za minutu při tlaku 60 000 PSI (cca 4 130 bar). Je vhodný pro použití více řezných hlav, což vede ke zvýšení výrobního výkonu. Ovládání je plně elektronické, lze ovládat dálkově z řídicího systému stroje. [21]

Obr. 4-8 PTV JETS 3,8/60 Compact **[21]**

Řídicí systém stroje je CNC886/Win, založen na průmyslovém PC v prostředí Windows Embedded, vyvinutý speciálně pro potřeby firmy PTV. Má vestavěnou databázi řezných podmínek, umožňuje volbu typu a tloušťky materiálu přímo v řídicím systému. [21]

4.3.2 Popis procesu řezání

Po ustavení obráběného materiálu na stůl stroje, spuštění programu, dojde k najetí trysky řezací hlavice na souřadnice počátku řezání. Místo se často volí mimo finální konturu řezaného dílu. Pomocí dotykového senzoru dojde k nastavení optimální výšky tryska nad obrobkem (4mm). Vrstvu materiálu je nutné prostřelit paprskem vody s abrazivem. Pro průstřel je možno zvolit několik metod, lišících se dle vhodnosti použití. Při řezání slabých plechů (cca do tloušťky 8mm pro konstrukční ocel) stačí zvolit přímý průstřel, při kterém je paprsek soustředěn do jednoho bodu po stanovenou dobu, dokud nedojde k průstřelu. Při řezání silnějších materiálů je vhodné zvolit metodu kruhového průstřelu, nebo průstřel po rampě. Při použití přímého průstřelu u silnějších materiálů hrozí riziko ucpávání místa průstřelu abrazivem a silnému odstřiku vody, který může způsobit až zvlhnutí abraziva v přívodní hubici a ucpání. Po průstřelu tloušťky materiálu je tryska navedena na konturu dílu a dochází k samotnému řezání, které se uskutečňuje obrušováním materiálu paprskem vody s abrazivem.

Řídicí systém stroje umožňuje použití několika korekčních metod. Technologie Progressjet má být schopna eliminovat technologické chyby řezu, a to kompenzováním úkosu (horní a spodní hrana řezu) který vzniká fyzikálními projevy abrazivního paprsku. Tato korekce je doporučena používat do rychlosti řezu 600mm/min, z důvodů vyšších požadavků na dynamiku stroje a vznikajících rozměrových chyb. Další korekcí je MFC. Jedná se o funkci materiálového řízení rychlosti, která má za úkol kompenzovat zrychlení a zpomalování řezu, aby nedocházelo k podřezům, zášlehům do materiálu. Prakticky dojde ke zpomalení řezu, pokud má

dojít ke změně směru pohybu paprsku tak, aby došlo k vyrovnání horního vstupního a spodního zpožděného výstupního bodu paprsku. Dynamická poloměrová korekce DRC se snaží kompenzovat zúžení paprsku a tím vznikající šířku spáry tak, aby šířka na obou stranách řezu byla sobě odpovídající. Tato korekce má hlavní význam při řezání slabých materiálů, kde je vznikající rozdíl mezi nejširší a nejužší spárou největší. **[22]**

4.3.3 Vygenerovaný NC kód řezání

```
%1 {dp_flicek_s_Q3.cnc [2D-MC]}
N10 {IGEMS:2016.1.913 POST:AWJ-PTV-AREMPRO Date:2016.02.17 16:10}
N12 ECHO "dp_flicek_s_Q3.cnc"
N14 M161
N16 M192 G64
N18 {PART:dp_flicek_ss No: 1}
N20 G00 X40.000 Y30.000
N22 F(MP443) {QUALITY MEDIUM}
N24 G01 G40 X40.000 Y30.000
N26 M191 {CUTTING START}
N28 G01 X40.000 Y15.000 M143 {PROGRESSJET FORWARD ON}
N30 G01 X40.000 Y55.000
N34 M192
N36 M140 {PROGRESSJET OFF}
N38 G00 X16.108 Y83.609
N40 F(MP443) {QUALITY MEDIUM}
N42 M193 MODE=7 {MACHINE SELECTED START}
N44 M191 {CUTTING START}
N46 G01 G41 X13.135 Y84.011
N48 G03 X13.000 Y82.000 RC15.000 M141 {PROGRESS JET ON}
N50 G03 X17.393 Y71.393 RC15.000
N52 G03 X28.000 Y67.000 RC15.000
N54 G03 X38.607 Y71.393 RC15.000
N56 G03 X43.000 Y82.000 RC15.000
N58 G03 X35.905 Y94.748 RC15.000
N60 G03 X21.333 Y95.437 RC15.000
N62 G03 X13.067 Y83.415 RC15.000
N64 G01 X13.067 Y83.415
N66 M192
N68 G40
N70 M140 {PROGRESSJET OFF}
N72 G00 X71.992 Y-0.174
N74 F(MP443) {QUALITY MEDIUM}
N76 M193 MODE=7 {MACHINE SELECTED START}
N78 M191 {CUTTING START}
N80 G01 G41 X70.000 Y0.000
N82 G01 X0.000 Y0.000 M141 {PROGRESS JET ON}
N84 G01 X0.000 Y100.000
N86 G02 X1.340 Y105.000 RC10.000
N88 G02 X5.000 Y108.660 RC10.000
N90 G02 X10.000 Y110.000 RC10.000
N92 G01 X40.000 Y110.000
N94 G01 X70.000 Y110.000
N96 G01 X70.000 Y15.700
N98 G03 X70.094 Y15.350 RC0.700
N100 G03 X70.350 Y15.094 RC0.700
N102 G03 X70.700 Y15.000 RC0.700
```

Význam použitých adres:

N	-	Číslo bloku
G00	-	rychloposuv
G01	-	Lineární interpolace
G02	-	Kruhová interpolace CW
G03	-	Kruhová interpolace CCW
G64	-	Projíždí mezi 2 řádky bez ztráty rychlosti
G40	-	Zrušení poloměrové korekce
X	-	Zadání dráhy v mm v ose x
Y	-	Zadání dráhy v mm v ose y
M30	-	Konec programu
F(MP443)	-	Posuvová rychlost odpovídající střední kvalitě řezání
M161	-	Zapnutí funkce MFC
M192	-	Vypnutí technologie
M191	-	Zapnutí technologie pro řez
M193	-	Provedení průstřelu
M140	-	Vypnutí funkce ProgressJet
M141	-	Zapnutí funkce ProgressJet zleva
M143	-	Zapnutí funkce ProgressJet přímo

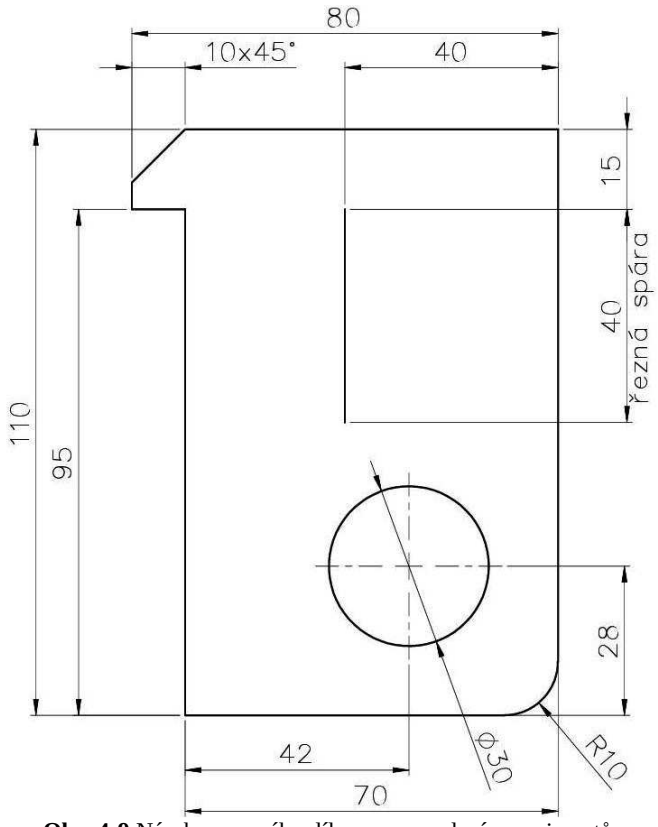
```
N104 G01 X80.000 Y15.000
N106 G01 X80.000 Y10.000
N108 G01 X70.000 Y0.000
N110 G01 X69.357 Y-0.766
N112 M192
N114 G40
N116 M140 {PROGRESSJET OFF}
N118 M30
```

4.4 Vzorový díl pro provedení experimentů

Pro porovnání schopností jednotlivých technologií bylo zvoleno řezání vzorových dílů, stejného tvaru, z různých materiálů, různých tloušťek plechu.

4.4.1 Volba tvaru

Tvar experimentálního dílu byl zvolen s ohledem na tvary běžně používaných výpalků v praxi. Rozměry dílu jsou uzpůsobeny účelu experimentu a na půdorysný rozměr 110x80 mm bylo umístěno několik detailů, na kterých budou viditelné rozdíly mezi možnostmi jednotlivých technologií. Základní obdélníkový tvar je doplněn o zaoblení a sražení, pravoúhlé osazení a otvor. Velikost otvoru byla volena vzhledem k možnostem technologie plazmového řezání, u které je doporučený minimální průměr otvoru 1,5 násobek tloušťky, tak aby byl tvar vzorku stejný pro všechny technologie. Dalším detailem je řezná spára, na které bude viditelný zápal či průstřel při započetí řezání, šířka spáry a v případě plazmového řezání rozdílný úkos na pravé a levé straně. Výkres vzorového dílu je připojen v příloze této práce.



Obr. 4-9 Návrh vzorového dílu pro provedení experimentů

4.4.2 Volba materiálu vzorku

Materiály běžně dělené zvolenými technologiemi jsou zastoupeny dvěma základními představiteli v praxi běžně používaných ocelí. Prvním je běžná konstrukční neušlechtilá ocel 11 373, vhodná pro staticky i mírně dynamicky namáhaná strojní konstrukce, vhodná ke svařování. Tato jakost oceli byla zvolena jako klasický představitel oceli široce používané pro jakékoliv konstrukce. Druhým zvoleným materiálem je austenitická korozivzdorná ocel 17 240, běžně používaná v aplikacích, kde je požadována odolnost vůči korozi, hygienická nezávadnost a snadná udržovatelnost a sanitovatelnost. Použití v chemickém průmyslu, potravinářství a farmacii. Má zaručenou svařitelnost.

Jakost	C	Cr	Ni	Mn	P	S	N
11 373	< 0,17	-	-	-	< 0,045	< 0,045	< 0,007
17 240	< 0,07	17,5-19,5	8,0-10,5	< 2,0	-	-	-

Tab. 4-1 Chemické složení v % u zvolených ocelí **[24]**

4.4.3 Volba tloušťek plechů

Zvolení tloušťek plechů pro řezání vzorků bylo ovlivněno možnostmi technologií, zejména technologií řezání laserem, která je obecně vhodná pro řezání menších tloušťek. Zvolené síly plechu jsou znázorněny v tabulce.

Jakost	Tloušťky [mm]					
	2	5	8	12	15	20
11 373	X	X	X	X	X	X
17 240	X	X	X	X	-	-

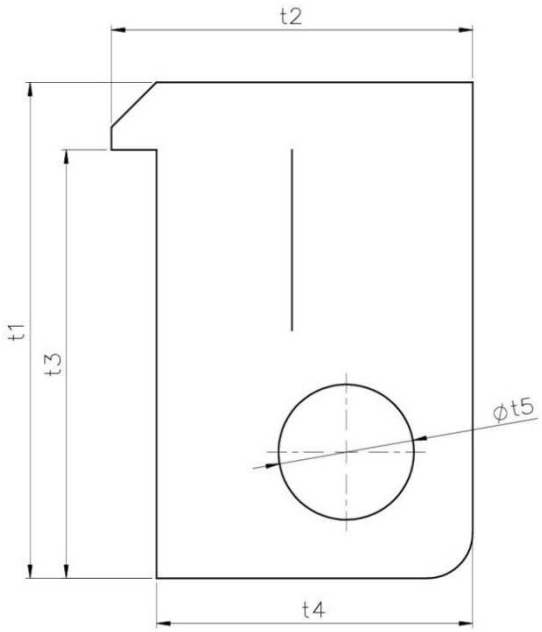
Tab. 4-3 Volba tloušťky vzhledem k materiálu

Zejména technologie plazmového řezání a vodní paprsek umožňují řezání silnějších materiálů. Volba mezi nimi je již závislá na ekonomičnosti řezu, případně požadovaných vlastnostech řezu.

4.5 Sledované parametry

Při hodnocení vzorků bude bráno v potaz několik parametrů řezání. Hodnocení některých vlastností vzorků vyrobených tepelnými metodami řezání proběhlo dle normy ČSN EN ISO 9013 – Tepelné dělení-Klasifikace řezů-Geometrické požadavky na výrobky na úchylky jakosti řezu. U metody řezání vodním paprskem byly zjišťovány stejné parametry, nebyly ale hodnoceny dle této normy.

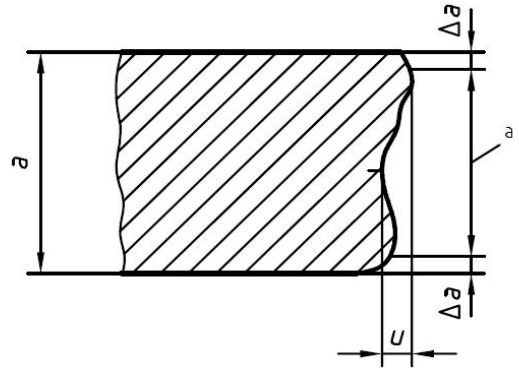
Na součásti byly měřeny vybrané rozměry pomocí posuvného měřítka (viz. Obr. 4-10).



Obr. 4-10 Parametry měření

Dalším parametrem je odchylka kolmosti řezu, která je vyjádřena jako odchylka od svislé roviny, schéma je znázorněno na Drsnost povrchu řezu je dalším z parametrů hodnocení kvality řezu. Dle normy ČSN EN ISO 9013 je měřen parametr drsnosti Rz. Parametr drsnosti Rz vyjadřuje průměrnou hodnotu vzdálenosti 5 nejvyšších a 5 nejnižších bodů měřeného profilu na stanovené vzdálenosti měření. Měření proběhlo drsnoměrem Mahr dle ISO 4288 a bylo porovnáno s tabulkovými hodnotami normy ČSN EN ISO 9013.

.



Obr. 4-11 Schéma měření odchylky kolmosti řezu **[23]**

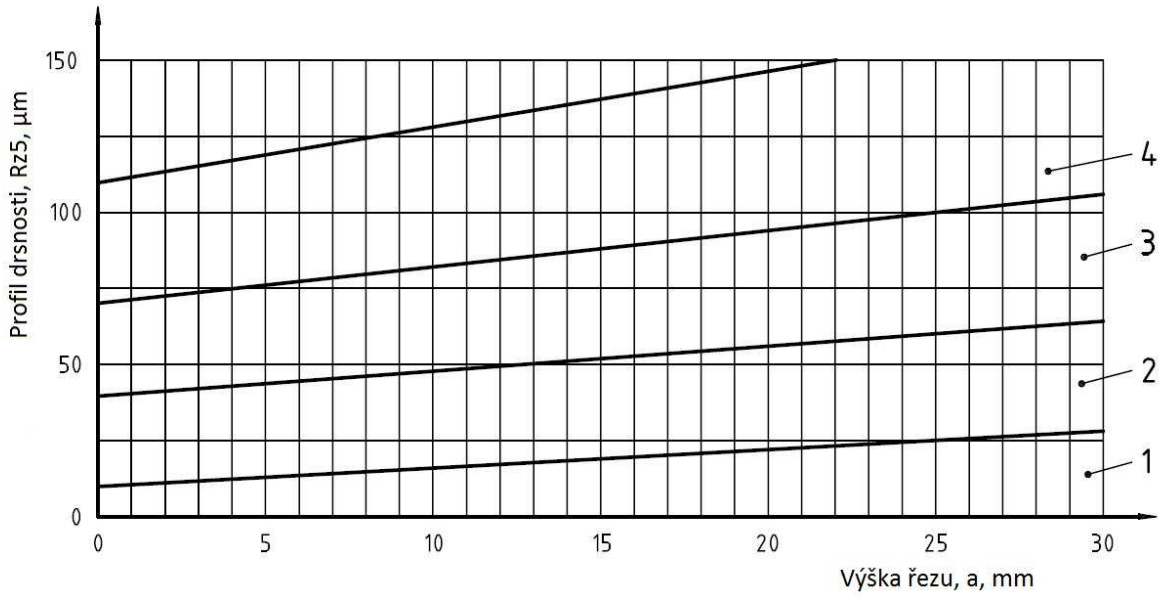
Třída	Odchylka kolmosti, *u*, mm
1	0,05+0,003a
2	0,15+0,007a
3	0,4+0,01a
4	0,8+0,02a
5	1,2+0,035a

Tab. 4-4 Tolerance kolmosti dle tříd přesnosti **[23]**

Drsnost povrchu řezu je dalším z parametrů hodnocení kvality řezu. Dle normy ČSN EN ISO 9013 je měřen parametr drsnosti Rz. Parametr drsnosti Rz vyjadřuje průměrnou hodnotu vzdálenosti 5 nejvyšších a 5 nejnižších bodů měřeného profilu na stanovené vzdálenosti měření. Měření proběhlo drsnoměrem Mahr dle ISO 4288 a bylo porovnáno s tabulkovými hodnotami normy ČSN EN ISO 9013.

Třída	Drsnost povrchu, *Rz*, μm
1	10+(0,6a mm)
2	40+(0,8a mm)
3	70+(1,2a mm)
4	110+(1,8a mm)

Tab. 4-5 Tabulka drsnosti povrchu dle tříd přesnosti **[23]**



Obr. 4-12 Diagram vývoje drsnosti dle tříd přesnosti **[23]**

Mezi další sledované parametry patří sledování vzniku otřepů na spodní straně řezu, které z fyzikální podstaty jednotlivých metod nelze vyloučit. Taktéž oxidace povrchové vrstvy řezu, tzv. okujení řezu, vznikající u tepelných metod dělení. Natavení horní hrany řezu, tzv. zaoblení, taktéž vzniká u tepelných metod dělení.

Dalším měřeným parametrem byla tloušťka řezné spáry, což je šířka materiálu, který je odstraněn během řezání.

U tepelných metod dělení dochází působením tepla na materiál nejen v místě řezu, ale přenosem do materiálu, k metalurgickým změnám ve struktuře, vzniku tepelně ovlivněné zóny a změny průběhu tvrdosti materiálu vztažené k vzdálenosti od místa řezu. Z důvodu nákladnosti a časové náročnosti měření průběhu mikrotvrdosti a snímku změn struktury bylo toto měření provedeno u vzorků z plechu tl. 8mm, vyrobených laserovým a plazmovým řezáním. Při řezání vodním paprskem, protože se jedná a tzv. studený řez, tyto změny nenastávají.

5. VYHODNOCENÍ VZORKŮ

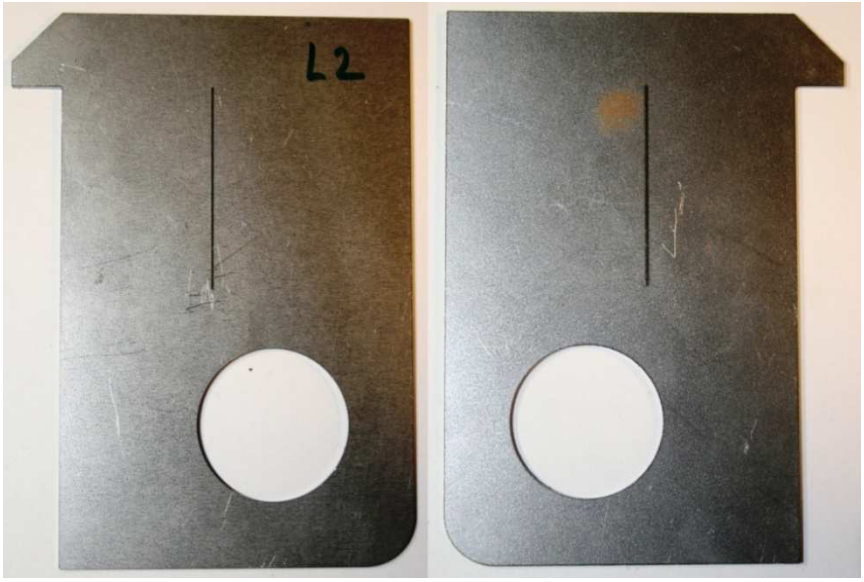
5.1 Měření vzorků

Tab. 5-1 Hodnocení vzorku L2

Tloušťka materiálu	2 mm	Technický plyn	Kyslík O_2
Technologie	Laser	Šířka řezné spáry [mm]	0,15
Jakost materiálu	ČSN 41 1373.1	Označení výpalku	L2

Sledovaný parametr			ČSN EN ISO 9013		Naměřená hodnota
Rozměry [mm]	Parametr	Jmen. hodnota	Třída 1	Třída 2	
	t1	110	±0,3	±0,**7**	109,98
	t2	80			79,96
	t3	95			95,02
	t4	70			69,94
	t5	30	±0,2	±0,5	30,02
Úchylka kolmosti *u* [mm]			Třída 1 (0,06mm)		0
Drsnost povrchu *Rz* [µm]			Třída 1 (11,2µm)		2,34
Okujení povrchu [ano/ne]					ne
Otřepy na spodní straně materiálu [ano/ne]					ne
Zaoblení horní hrany řezu [ano/ne]					ano
Řezná (posuvová) rychlost [m/min]					5,50

Pozn.: Vzorek splňuje podmínky 1. třídy přesnosti rozměrů



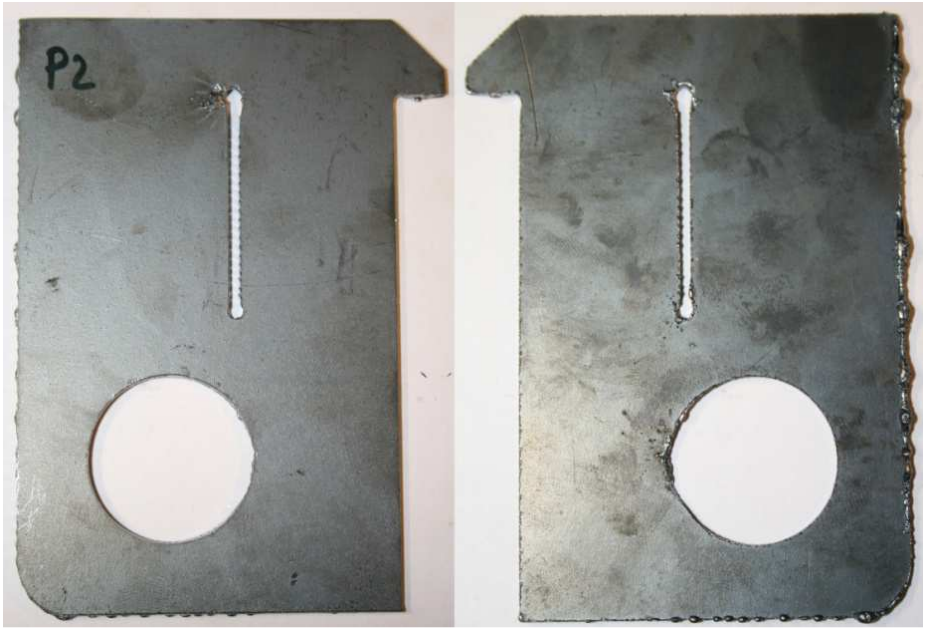
Obr. 5-1 Přední a zadní strana vzorku L2

Tab. 5-2 Hodnocení vzorku P2

Tloušťka materiálu	2 mm	Technický plyn	Kyslík O_2/ Vzduch
Technologie	Plazma	Šířka řezné spáry [mm]	1,9
Jakost materiálu	ČSN 41 1373.1	Označení výpalku	P2

Sledovaný parametr			ČSN EN ISO 9013		Naměřená hodnota
Rozměry [mm]	Parametr	Jmen. hodnota	Třída 1	Třída 2	
	t1	110	±0,3	±0,**7**	109,94
	t2	80			79,90
	t3	95			95,2
	t4	70			70,00
	t5	30	±0,2	±0,5	29,93
Úchylka kolmosti *u* [mm]			Třída 1 (0,06mm)		0
Drsnost povrchu *Rz* [µm]			Třída 1 (11,2µm)		4,44
Okujení povrchu [ano/ne]					ano
Otřepy na spodní straně materiálu [ano/ne]					ano
Zaoblení horní hrany řezu [ano/ne]					ano
Řezná (posuvová) rychlost [m/min]					4,1

Pozn.: Vzorek splňuje podmínky 1. třídy přesnosti rozměrů

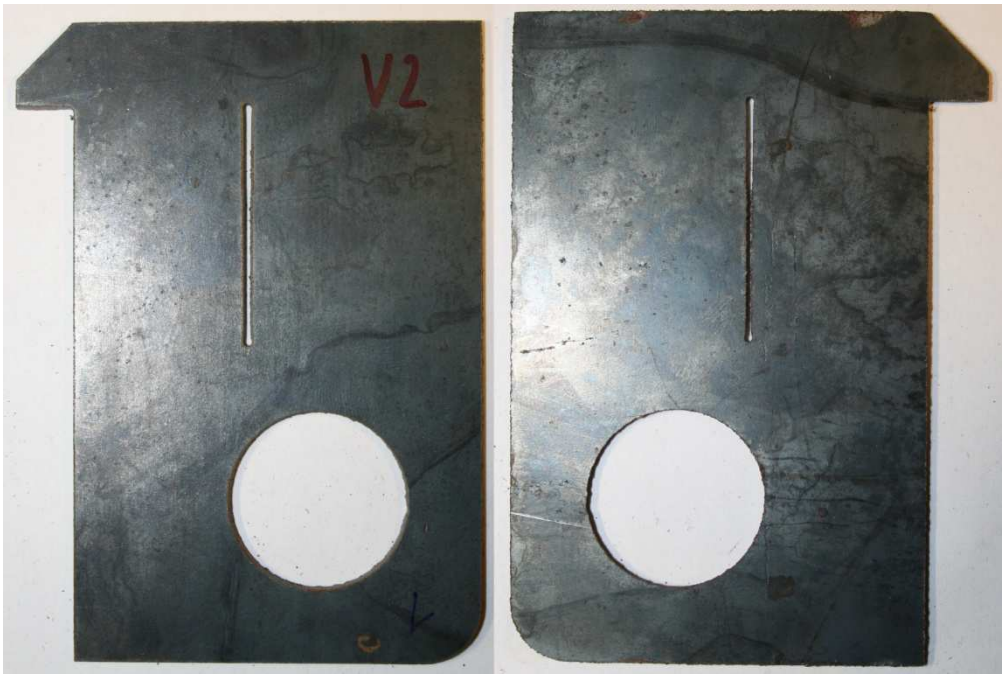


Obr. 5-2 Přední a zadní strana vzorku P2

Tab. 5-3 Hodnocení vzorku V2

Tloušťka materiálu	2 mm	Abrazivo	Granát 80 Mesh
Technologie	Vodní paprsek	Šířka řezné spáry [mm]	1,09
Jakost materiálu	ČSN 41 1373.1	Označení výpalku	V2

Sledovaný parametr			Naměřená hodnota
Rozměry [mm]	Parametr	Jmen. hodnota	
	t1	110	110,18
	t2	80	79,86
	t3	95	95,01
	t4	70	70,28
	t5	30	30,09
Úchylka kolmosti *u* [mm]			0,28
Drsnost povrchu *Rz* [μm]			36,05
Okujení povrchu [ano/ne]			ne
Otřepy na spodní straně materiálu [ano/ne]			ano
Zaoblení horní hrany řezu [ano/ne]			ne
Řezná (posuvová) rychlost [m/min]			0,842



Obr. 5-3 Přední a zadní strana vzorku V2

Tab. 5-4 Hodnocení vzorku NL2

Tloušťka materiálu	2 mm	Technický plyn	Dusík N_2
Technologie	Laser	Šířka řezné spáry [mm]	0,15
Jakost materiálu	ČSN 41 7240	Označení výpalku	NL2

Sledovaný parametr			ČSN EN ISO 9013		Naměřená hodnota
Rozměry [mm]	Parametr	Jmen. hodnota	Třída 1	Třída 2	
	t1	110	±0,3	±0,7	109,96
	t2	80			79,96
	t3	95			94,99
	t4	70			69,96
	t5	30	±0,2	±0,5	30,00
Úchylka kolmosti *u* [mm]			Třída 1 (0,06mm)		0
Drsnost povrchu *Rz* [µm]			Třída 1 (11,2µm)		11,19
Okujení povrchu [ano/ne]					ne
Otřepy na spodní straně materiálu [ano/ne]					ne
Zaoblení horní hrany řezu [ano/ne]					ne
Řezná (posuvová) rychlost [m/min]					23,0

Pozn. Vzorek splňuje podmínky 1. třídy přesnosti rozměrů

Obr. 5-4 Přední a zadní strana vzorku NL2

Tab. 5-5 Hodnocení vzorku NP2

Tloušťka materiálu	2 mm	Technický plyn	Kyslík O_2 / Vzduch
Technologie	Plazma	Šířka řezné spáry [mm]	1,29
Jakost materiálu	ČSN 41 7240	Označení výpalku	NP2

Sledovaný parametr			ČSN EN ISO 9013		Naměřená hodnota
Rozměry [mm]	Parametr	Jmen. hodnota	Třída 1	Třída 2	
	t1	110	±0,3	±0,**7**	110,43
	t2	80			80,40
	t3	95			95,50
	t4	70			70,50
	t5	30	±0,2	±0,5	29,30
Úchylka kolmosti *u* [mm]			Třída 1 (0,06mm)		0,02
Drsnost povrchu *Rz* [μm]			Třída 3 (72,4μm)		53,43
Okujení povrchu [ano/ne]					ano
Otřepy na spodní straně materiálu [ano/ne]					ano
Zaoblení horní hrany řezu [ano/ne]					ano
Řezná (posuvová) rychlost [m/min]					4,0

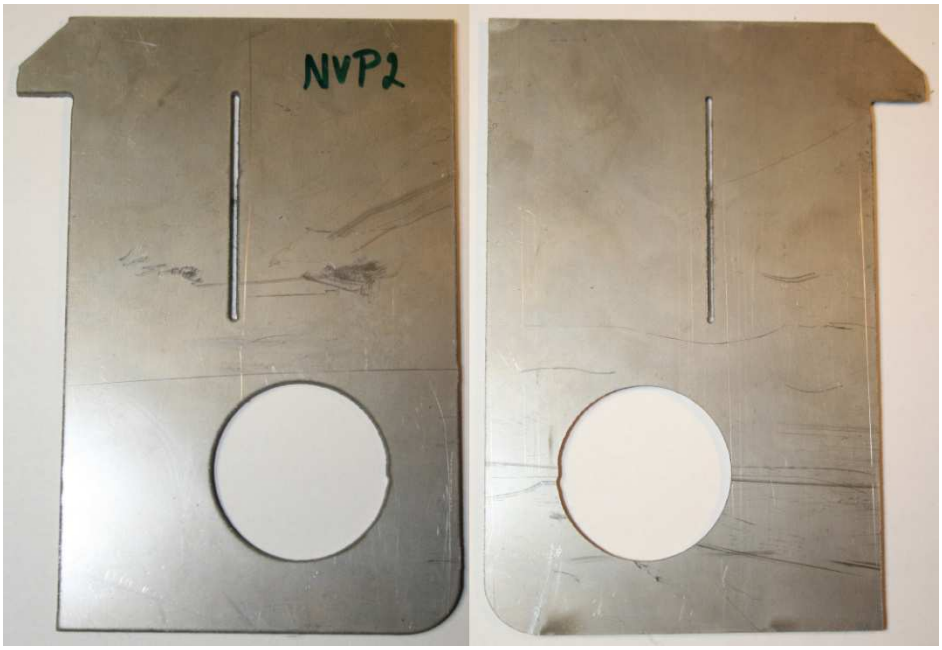
Pozn. Vzorek splňuje podmínky 2. třídy přesnosti rozměrů, výsledek je ovlivněn nezkušeností obsluhy s řezáním tohoto materiálu, po zjištění nutných korekcí by stroj zvládl řezat v toleranci 1. třídy. Na kontuře otvoru jsou znatelné odchylky způsobené nájezdem do řezu.

Obr. 5-5 Přední a zadní strana vzorku NP2

Tab. 5-6 Hodnocení vzorku NVP2

Tloušťka materiálu	2 mm	Abrazivo	Granát 80 Mesh
Technologie	Vodní paprsek	Šířka řezné spáry [mm]	1,15
Jakost materiálu	ČSN 41 7240	Označení výpalku	NVP2

Sledovaný parametr			Naměřená hodnota
Rozměry [mm]	Parametr	Jmen. hodnota	
	t1	110	109,90
	t2	80	79,70
	t3	95	95,00
	t4	70	96,64
	t5	30	30,50
Úchylka kolmosti *u* [mm]			0,1
Drsnost povrchu *Rz* [μm]			27,31
Okujení povrchu [ano/ne]			ne
Otřepy na spodní straně materiálu [ano/ne]			ne
Zaoblení horní hrany řezu [ano/ne]			ne
Řezná (posuvová) rychlost [m/min]			0,819



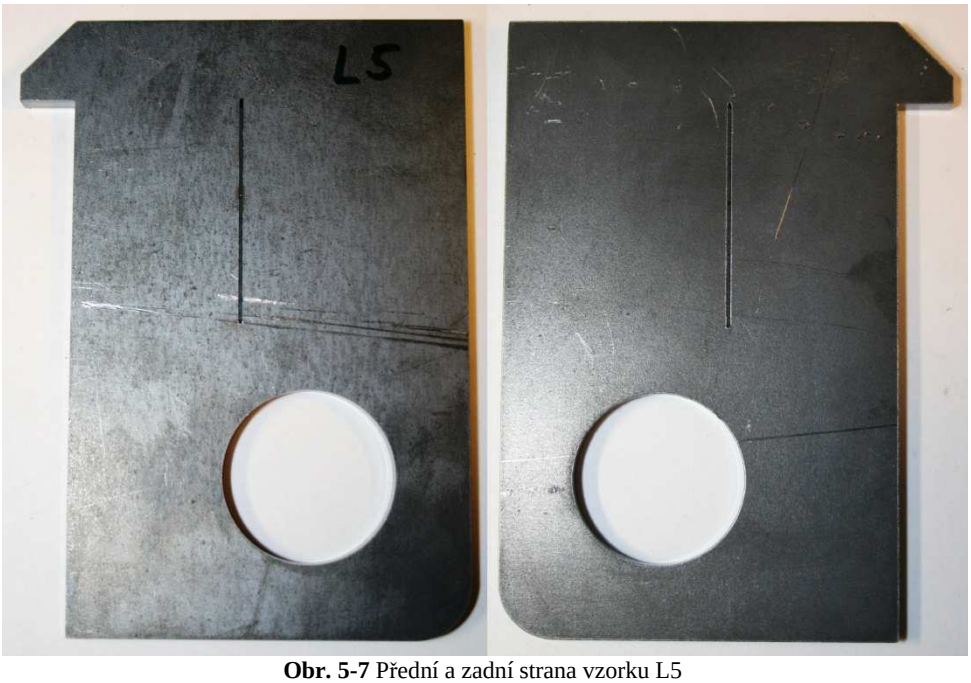
Obr. 5-6 Přední a zadní strana vzorku NVP2

Tab. 5-7 Hodnocení vzorku L5

Tloušťka materiálu	5 mm	Technický plyn	Kyslík O_2
Technologie	Laser	Šířka řezné spáry [mm]	0,5
Jakost materiálu	ČSN 41 1373.1	Označení výpalku	L5

Sledovaný parametr			ČSN EN ISO 9013		Naměřená hodnota
Rozměry [mm]	Parametr	Jmen. hodnota	Třída 1	Třída 2	
	t1	110	±0,4	±0,9	110,00
	t2	80			80,00
	t3	95			95,02
	t4	70			70,00
	t5	30	±0,4	±0,8	30,00
Úchylka kolmosti *u* [mm]			Třída 1 (0,07mm)		0
Drsnost povrchu *Rz* [µm]			Třída 1 (17,2µm)		6,83
Okujení povrchu [ano/ne]					ne
Otřepy na spodní straně materiálu [ano/ne]					ne
Zaoblení horní hrany řezu [ano/ne]					ne
Řezná (posuvová) rychlost [m/min]					3,20

Pozn.: Vzorek splňuje podmínky 1. třídy přesnosti rozměrů



Obr. 5-7 Přední a zadní strana vzorku L5

Tab. 5-8 Hodnocení vzorku P5

Tloušťka materiálu	5 mm	Technický plyn	Kyslík O_2 / Vzduch
Technologie	Plazma	Šířka řezné spáry [mm]	1,9
Jakost materiálu	ČSN 41 1373.1	Označení výpalku	P5

Sledovaný parametr			ČSN EN ISO 9013		Naměřená hodnota
Rozměry [mm]	Parametr	Jmen. hodnota	Třída 1	Třída 2	
	t1	110	±0,4	±0,9	109,91
	t2	80			79,64
	t3	95			95,20
	t4	70			70,15
	t5	30	±0,4	±0,8	29,98
Úchylka kolmosti *u* [mm]			Třída 4 (0,9mm)		0,6
Drsnost povrchu *Rz* [µm]			Třída 1 (13µm)		5,39
Okujení povrchu [ano/ne]					ano
Otřepy na spodní straně materiálu [ano/ne]					ano
Zaoblení horní hrany řezu [ano/ne]					ano
Řezná (posuvová) rychlost [m/min]					3,9

Pozn.: Vzorek splňuje podmínky 2. třídy přesnosti rozměrů dle ISO 9013. Na otvoru je patrné podpálení materiálu. Vzniklo při dojezdu kontury, kde vypadávající vnitřní kruh vychýlil paprsek plazmy, který zajel do materiálu.

Obr. 5-8 Přední a zadní strana vzorku P5

Tab. 5-9 Hodnocení vzorku V5

Tloušťka materiálu	5 mm	Abrazivo	Granát 80 Mesh
Technologie	Vodní paprsek	Šířka řezné spáry [mm]	1,09
Jakost materiálu	ČSN 41 1373.1	Označení výpalku	V5

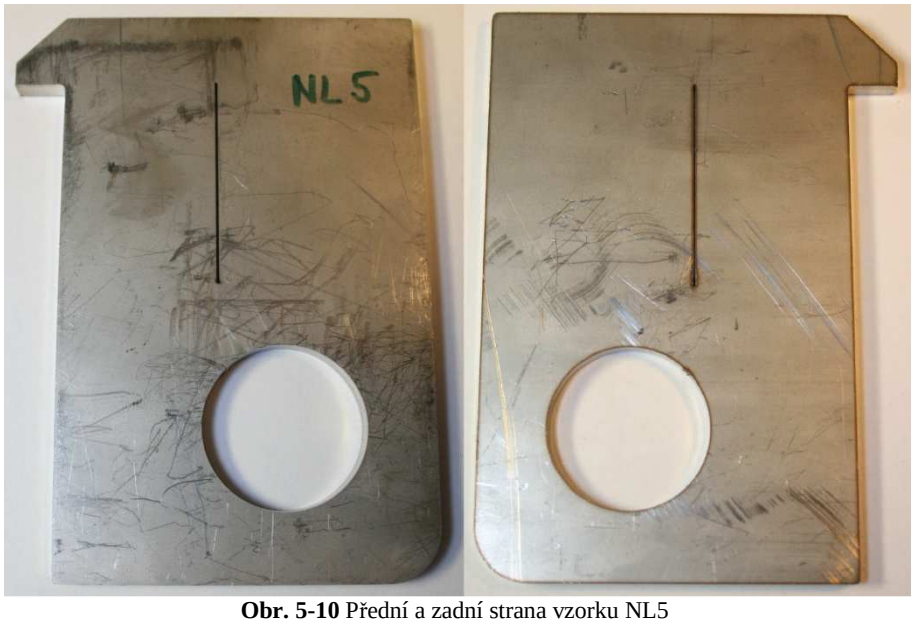
Sledovaný parametr			Naměřená hodnota
Rozměry [mm]	Parametr	Jmen. hodnota	
	t1	110	110,23
	t2	80	90,20
	t3	95	94,99
	t4	70	70,35
	t5	30	30,09
Úchylka kolmosti *u* [mm]			0,53
Drsnost povrchu *Rz* [μm]			29,67
Okujení povrchu [ano/ne]			ne
Otřepy na spodní straně materiálu [ano/ne]			ano
Zaoblení horní hrany řezu [ano/ne]			ne
Řezná (posuvová) rychlost [m/min]			0,380

Obr. 5-9 Přední a zadní strana vzorku V5

Tab. 5-10 Hodnocení vzorku NL5

Tloušťka materiálu	5 mm		Technický plyn		Dusík N_2
Technologie	Laser		Šířka řezné spáry [mm]		0,25
Jakost materiálu	ČSN 41 7240		Označení výpalku		NL5
Sledovaný parametr			ČSN EN ISO 9013		Naměřená hodnota
Rozměry [mm]	Parametr	Jmen. hodnota	Třída 1	Třída 2	
	t1	110	±0,4	±0,9	109,96
	t2	80			80,00
	t3	95			94,97
	t4	70			69,98
	t5	30	±0,4	±0,8	29,99
Úchylka kolmosti *u* [mm]			Třída 1 (0,07mm)		0,05
Drsnost povrchu *Rz* [µm]			Třída 2 (44µm)		19,02
Okujení povrchu [ano/ne]					ne
Otřepy na spodní straně materiálu [ano/ne]					ne
Zaoblení horní hrany řezu [ano/ne]					ne
Řezná (posuvová) rychlost [m/min]					4,9

Pozn.: Vzorek splňuje podmínky 1. třídy přesnosti rozměrů



Obr. 5-10 Přední a zadní strana vzorku NL5

Tab. 5-11 Hodnocení vzorku NP5

Tloušťka materiálu	5 mm	Technický plyn	Kyslík O_2 / Vzduch
Technologie	Plazma	Šířka řezné spáry [mm]	1,2
Jakost materiálu	ČSN 41 7240	Označení výpalku	NP5

Sledovaný parametr			ČSN EN ISO 9013		Naměřená hodnota
Rozměry [mm]	Parametr	Jmen. hodnota	Třída 1	Třída 2	
	t1	110	±0,4	±0,9	110,86
	t2	80			80,52
	t3	95			95,12
	t4	70			70,80
	t5	30	±0,4	±0,8	29,20
Úchylka kolmosti *u* [mm]			Třída 3 (0,45mm)		0,2
Drsnost povrchu *Rz* [μm]			Třída 4 (119μm)		80,38
Okujení povrchu [ano/ne]					ne
Otřepy na spodní straně materiálu [ano/ne]					ne
Zaoblení horní hrany řezu [ano/ne]					ano
Řezná (posuvová) rychlost [m/min]					1,7

Pozn.: Vzorek splňuje podmínky 2. třídy přesnosti rozměrů dle ISO 9013. V otvoru zůstal zbytek materiálu, který nebyl dořízнut, bylo by nutné díl dočistit.

Obr. 5-11 Přední a zadní strana vzorku NP5

Tab. 5-12 Hodnocení vzorku L8

Tloušťka materiálu	8 mm		Technický plyn		Kyslík O_2
Technologie	Laser		Šířka řezné spáry [mm]		0,55
Jakost materiálu	ČSN 41 1373.1		Označení výpalku		L8
Sledovaný parametr			ČSN EN ISO 9013		Naměřená hodnota
Rozměry [mm]	Parametr	Jmen. hodnota	Třída 1	Třída 2	
	t1	110	±0,6	±1,3	110,00
	t2	80			80,00
	t3	95			94,97
	t4	70			69,98
	t5	30	±0,6	±1,1	29,96
Úchylka kolmosti *u* [mm]			Třída 1 (0,074mm)		0,02
Drsnost povrchu *Rz* [μm]			Třída 2 (46,4μm)		18,54
Okujení povrchu [ano/ne]					ano
Otřepy na spodní straně materiálu [ano/ne]					ne
Zaoblení horní hrany řezu [ano/ne]					ne
Řezná (posuvová) rychlost [m/min]					2,40

Pozn.: Vzorek splňuje podmínky 1. třídy přesnosti rozměrů

Obr. 5-12 Přední a zadní strana vzorku L8

Tab. 5-13 Hodnocení vzorku P8

Tloušťka materiálu	8 mm	Technický plyn	Kyslík / Vzduch
Technologie	Plazma	Šířka řezné spáry [mm]	2,45
Jakost materiálu	ČSN 41 1373.1	Označení výpalku	P8

Sledovaný parametr			ČSN EN ISO 9013		Naměřená hodnota
Rozměry [mm]	Parametr	Jmen. hodnota	Třída 1	Třída 2	
	t1	110	±0,6	±1,3	108,98
	t2	80			79,54
	t3	95			95,25
	t4	70			69,15
	t5	30	±0,6	±1,1	29,98
Úchylka kolmosti *u* [mm]			Třída 1 (0,074mm)		0,3
Drsnost povrchu *Rz* [μm]			Třída 2 (14,8μm)		5,18
Okujení povrchu [ano/ne]					ano
Otřepy na spodní straně materiálu [ano/ne]					ano
Zaoblení horní hrany řezu [ano/ne]					ano
Řezná (posuvová) rychlost [m/min]					3,5

Pozn.: Vzorek splňuje podmínky 2. třídy přesnosti rozměrů dle ISO 9013.

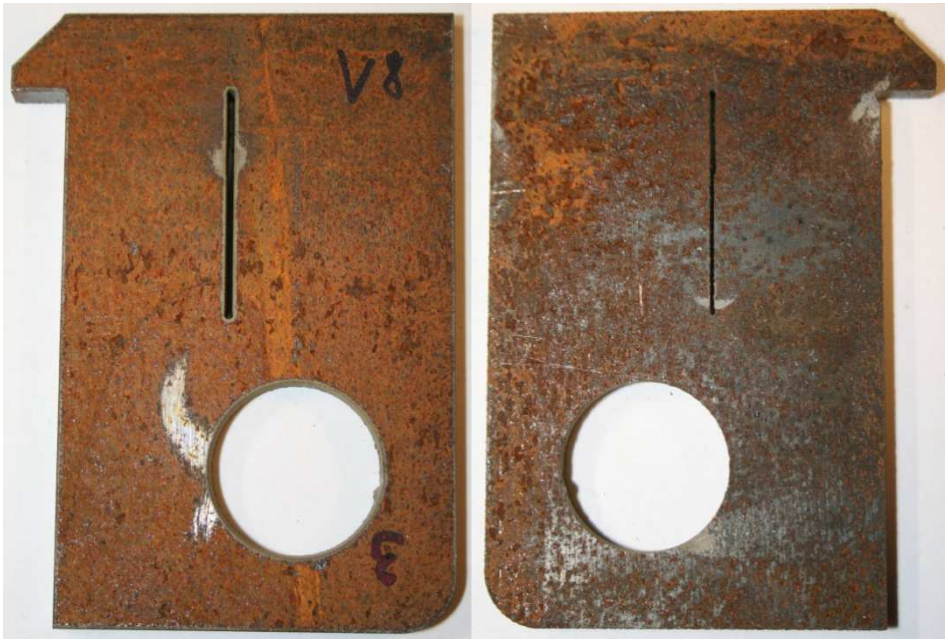
Obr. 5-13 Přední a zadní strana vzorku P8

Tab. 5-14 Hodnocení vzorku V8

Tloušťka materiálu	8 mm	Abrazivo	Granát 80 Mesh
Technologie	Vodní paprsek	Šířka řezné spáry [mm]	1,3
Jakost materiálu	ČSN 41 1373.1	Označení výpalku	V8

Sledovaný parametr			Naměřená hodnota
Rozměry [mm]	Parametr	Jmen. hodnota	
	t1	110	109,99
	t2	80	79,8
	t3	95	94,96
	t4	70	70,04
	t5	30	30,15
Úchylka kolmosti *u* [mm]			0,46
Drsnost povrchu *Rz* [μm]			25,75
Okujení povrchu [ano/ne]			ne
Otřepy na spodní straně materiálu [ano/ne]			ano
Zaoblení horní hrany řezu [ano/ne]			ne
Řezná (posuvová) rychlost [m/min]			0,221

Pozn. Při dořezávání otvoru zůstal ve spodní části můstek, který držel vnitřní kruh. Pro použití dílu je nutné toto dočistit.



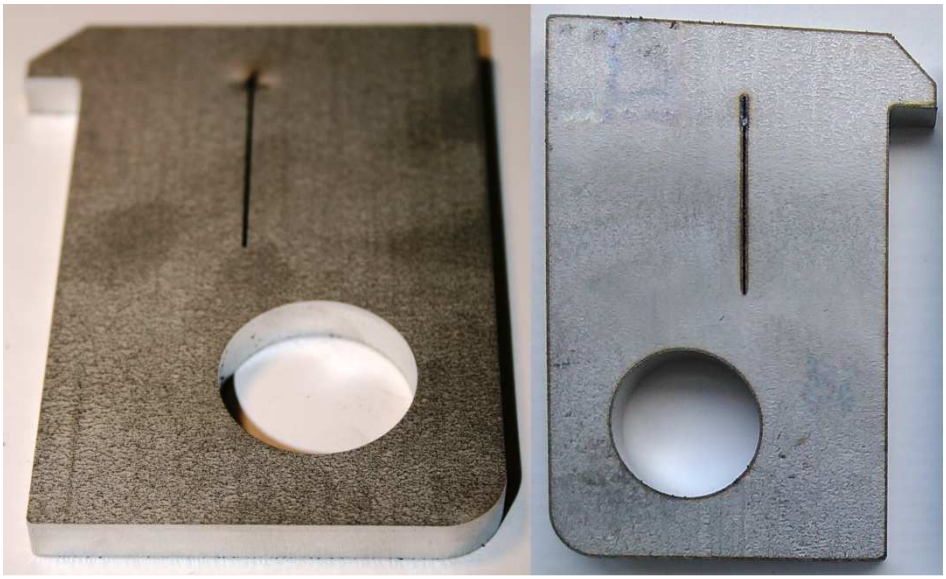
Obr. 5-14 Přední a zadní strana vzorku V8

Tab. 5-15 Hodnocení vzorku NL8

Tloušťka materiálu	8 mm	Technický plyn	Dusík N_2
Technologie	Laser	Šířka řezné spáry [mm]	0,35
Jakost materiálu	ČSN 41 7240	Označení výpalku	NL8

Sledovaný parametr			ČSN EN ISO 9013		Naměřená hodnota
Rozměry [mm]	Parametr	Jmen. hodnota	Třída 1	Třída 2	
	t1	110	±0,6	±1,3	109,92
	t2	80			80,01
	t3	95			94,87
	t4	70			69,90
	t5	30	±0,6	±1,1	30,06
Úchylka kolmosti *u* [mm]			Třída 1 (0,074m)		0
Drsnost povrchu *Rz* [µm]			Třída 2 (46,4µm)		30,54
Okujení povrchu [ano/ne]					ne
Otřepy na spodní straně materiálu [ano/ne]					ano
Zaoblení horní hrany řezu [ano/ne]					ne
Řezná (posuvová) rychlost [m/min]					4,9

Pozn.: Vzorek splňuje podmínky 1. třídy přesnosti rozměrů



Obr. 5-15 Přední a zadní strana vzorku NL8

Tab. 5-16 Hodnocení vzorku NP8

Tloušťka materiálu	8 mm	Technický plyn	Kyslík / Vzduch
Technologie	Plazma	Šířka řezné spáry [mm]	1,4
Jakost materiálu	ČSN 41 7240	Označení výpalku	NP8

Sledovaný parametr			ČSN EN ISO 9013		Naměřená hodnota
Rozměry [mm]	Parametr	Jmen. hodnota	Třída 1	Třída 2	
	t1	110	±0,6	±1,3	111,12
	t2	80			80,92
	t3	95			95,10
	t4	70			70,87
	t5	30	±0,6	±1,1	28,98
Úchylka kolmosti *u* [mm]			Třída 2 (0,206m)		0,1
Drsnost povrchu *Rz* [μm]			Třída 3 (79,6μm)		54,24
Okujení povrchu [ano/ne]					ne
Otřepy na spodní straně materiálu [ano/ne]					ne
Zaoblení horní hrany řezu [ano/ne]					ano
Řezná (posuvová) rychlost [m/min]					1,5

Pozn.: Vzorek splňuje podmínky 2. třídy přesnosti rozměrů dle ISO 9013.

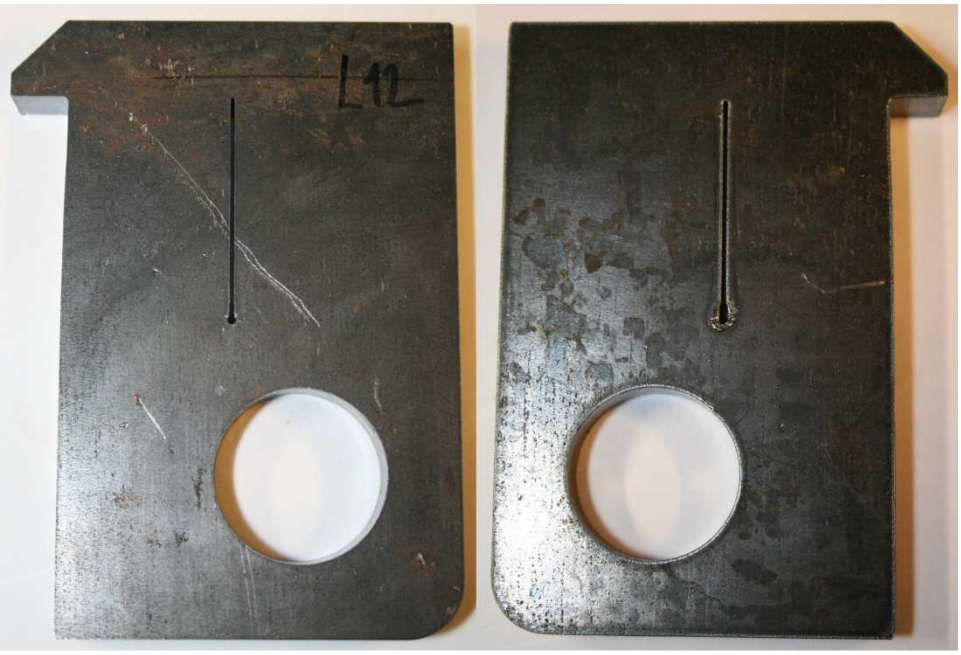
Obr. 5-16 Přední a zadní strana vzorku NP8

Tab. 5-17 Hodnocení vzorku L12

Tloušťka materiálu	12 mm	Technický plyn	Kyslík O_2
Technologie	Laser	Šířka řezné spáry [mm]	0,55
Jakost materiálu	ČSN 41 1373.1	Označení vzorku	L12

Sledovaný parametr			ČSN EN ISO 9013		Naměřená hodnota
Rozměry [mm]	Parametr	Jmen. hodnota	Třída 1	Třída 2	
	t1	110	±0,7	±1,8	109,78
	t2	80			79,97
	t3	95			95,38
	t4	70			70,07
	t5	30	±0,7	±1,8	30,05
Úchylka kolmosti *u* [mm]			Třída 2 (0,23mm)		0,1
Drsnost povrchu *Rz* [µm]			Třída 2 (49,6µm)		29,22
Okujení povrchu [ano/ne]					ano
Otřepy na spodní straně materiálu [ano/ne]					ne
Zaoblení horní hrany řezu [ano/ne]					ne
Řezná (posuvová) rychlost [m/min]					1,60

Pozn.: Vzorek splňuje podmínky 1. třídy přesnosti rozměrů



Obr. 5-17 Přední a zadní strana vzorku L12

Tab. 5-18 Hodnocení vzorku P12

Tloušťka materiálu	12 mm	Technický plyn	Kyslík / Vzduch
Technologie	Plazma	Šířka řezné spáry [mm]	2,68
Jakost materiálu	ČSN 41 1373.1	Označení výpalku	P12

Sledovaný parametr			ČSN EN ISO 9013		Naměřená hodnota
Rozměry [mm]	Parametr	Jmen. hodnota	Třída 1	Třída 2	
	t1	110	±0,7	±1,8	109,70
	t2	80			80,03
	t3	95			95,02
	t4	70			69,97
	t5	30	±0,7	±1,8	30,40
Úchylka kolmosti *u* [mm]			Třída 2 (0,23mm)		0,1
Drsnost povrchu *Rz* [μm]			Třída 1 (17,2μm)		5,09
Okujení povrchu [ano/ne]					ano
Otřepy na spodní straně materiálu [ano/ne]					ano
Zaoblení horní hrany řezu [ano/ne]					ano
Řezná (posuvová) rychlost [m/min]					2,6

Pozn.: Vzorek splňuje podmínky 1. třídy přesnosti rozměrů dle ISO 9013. U zápalu je vidět značný odstřik materiálu, než dojde k propálení skrz.

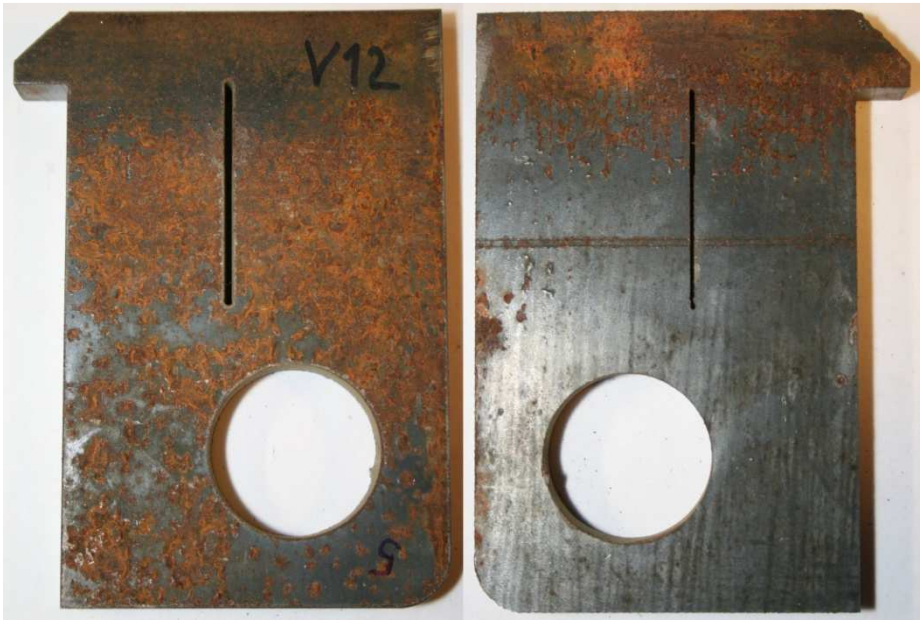
Obr. 5-18 Přední a zadní strana vzorku P12

Tab. 5-19 Hodnocení vzorku V12

Tloušťka materiálu	12 mm	Abrazivo	Granát 80 Mesh
Technologie	Vodní paprsek	Šířka řezné spáry [mm]	1,3
Jakost materiálu	ČSN 41 1373.1	Označení výpalku	V12

Sledovaný parametr			Naměřená hodnota
Rozměry [mm]	Parametr	Jmen. hodnota	
	t1	110	109,49
	t2	80	79,51
	t3	95	95,00
	t4	70	69,80
	t5	30	30,60
Úchylka kolmosti *u* [mm]			0,47
Drsnost povrchu *Rz* [μm]			27,58
Okujení povrchu [ano/ne]			ne
Otřepy na spodní straně materiálu [ano/ne]			ne
Zaoblení horní hrany řezu [ano/ne]			ne
Řezná (posuvová) rychlost [m/min]			0,139

Pozn. Při dořezávání otvoru zůstal ve spodní části můstek, který držel vnitřní kruh. Pro použití dílu je nutné toto dočistit. Všechny hrany jsou ostré.



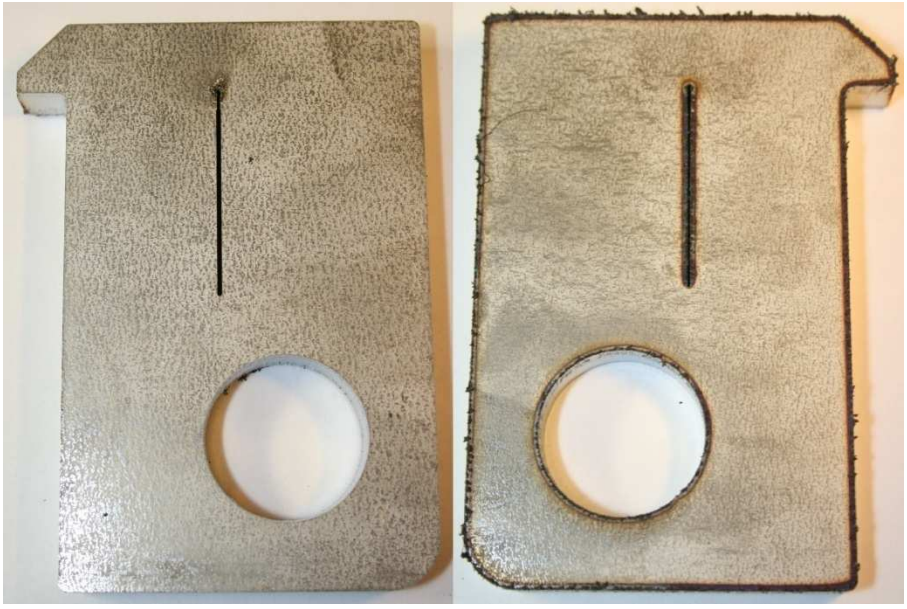
Obr. 5-19 Přední a zadní strana vzorku V12

Tab. 5-20 Hodnocení vzorku NL12

Tloušťka materiálu	12 mm	Technický plyn	Dusík N_2
Technologie	Laser	Šířka řezné spáry [mm]	0,3
Jakost materiálu	ČSN 41 7240	Označení výpalku	NL12

Sledovaný parametr			ČSN EN ISO 9013		Naměřená hodnota
Rozměry [mm]	Parametr	Jmen. hodnota	Třída 1	Třída 2	
	t1	110	±0,7	±1,8	109,95
	t2	80			79,98
	t3	95			95,00
	t4	70			70,05
	t5	30	±0,7	±1,8	30,02
Úchylka kolmosti *u* [mm]			Třída 1 (0,11mm)		0,05
Drsnost povrchu *Rz* [μm]			Třída 2 (49,6μm)		39,55
Okujení povrchu [ano/ne]					ne
Otřepy na spodní straně materiálu [ano/ne]					ano
Zaoblení horní hrany řezu [ano/ne]					ne
Řezná (posuvová) rychlost [m/min]					0,6

Pozn.: Vzorek splňuje podmínky 1. třídy přesnosti rozměrů. Řez čistý, kovově stříbrný.



Obr. 5-20 Přední a zadní strana vzorku NL12

Tab. 5-21 Hodnocení vzorku NP12

Tloušťka materiálu	12 mm	Technický plyn	Kyslík / Vzduch
Technologie	Plazma	Šířka řezné spáry [mm]	1,94
Jakost materiálu	ČSN 41 7240	Označení výpalku	NP12

Sledovaný parametr			ČSN EN ISO 9013		Naměřená hodnota
Rozměry [mm]	Parametr	Jmen. hodnota	Třída 1	Třída 2	
	t1	110	±0,7	±1,8	110,86
	t2	80			80,81
	t3	95			95,62
	t4	70			70,8
	t5	30	±0,7	±1,8	28,94
Úchylka kolmosti *u* [mm]			Třída 1 (0,09mm)		0,04
Drsnost povrchu *Rz* [μm]			Třída 2 (84,4μm)		58,09
Okujení povrchu [ano/ne]					ne
Otřepy na spodní straně materiálu [ano/ne]					ne
Zaoblení horní hrany řezu [ano/ne]					ano
Řezná (posuvová) rychlost [m/min]					1,25

Pozn.: Vzorek splňuje podmínky 2. třídy přesnosti rozměrů dle ISO 9013. V otvoru zůstal zbytek materiálu, který nebyl dořízнut, bylo by nutné díl dočistit. I na tomto vzorku je vidět odstřik taveniny okolo místa zápalu. Povrch řezu je černý, zoxidovaný, to je způsobeno použitými plyny.

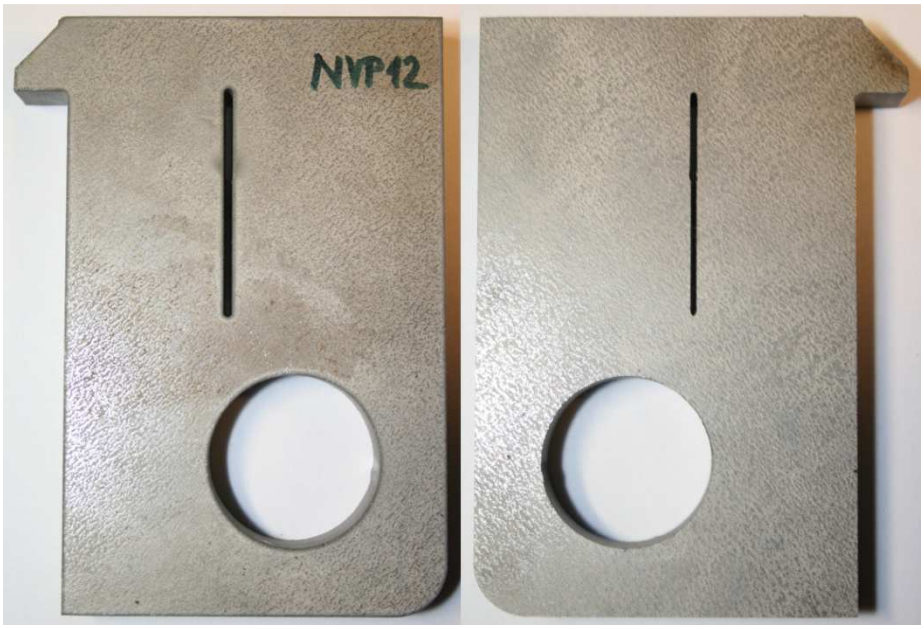
Obr. 5-21 Přední a zadní strana vzorku NP12

Tab. 5-22 Hodnocení vzorku NVP12

Tloušťka materiálu	12 mm	Abrazivo	Granát 80 Mesh
Technologie	Vodní paprsek	Šířka řezné spáry [mm]	1,45
Jakost materiálu	ČSN 41 7240	Označení výpalku	NVP12

Sledovaný parametr			Naměřená hodnota
Rozměry [mm]	Parametr	Jmen. hodnota	
	t1	110	109,26
	t2	80	79,13
	t3	95	95,17
	t4	70	69,20
	t5	30	30,88
Úchylka kolmosti *u* [mm]			0
Drsnost povrchu *Rz* [μm]			20,05
Okujení povrchu [ano/ne]			ne
Otřepy na spodní straně materiálu [ano/ne]			ne
Zaoblení horní hrany řezu [ano/ne]			ne
Řezná (posuvová) rychlost [m/min]			0,068

Pozn. Drobné nerovnosti zbyly pouze v místech, kde paprsek dořezával konec kontury. Při řezání byly aktivovány všechny dostupné korekce.



Obr. 5-22 Přední a zadní strana vzorku NVP12

Tab. 5-23 Hodnocení vzorku P15

Tloušťka materiálu	15 mm	Technický plyn	Kyslík O_2
Technologie	Laser	Šířka řezné spáry [mm]	0,55
Jakost materiálu	ČSN 41 1373.1	Označení výpalku	L15

Sledovaný parametr			ČSN EN ISO 9013		Naměřená hodnota
Rozměry [mm]	Parametr	Jmen. hodnota	Třída 1	Třída 2	
	t1	110	±0,7	±1,8	110,00
	t2	80			79,95
	t3	95			94,99
	t4	70			70,01
	t5	30	±0,7	±1,8	29,98
Úchylka kolmosti *u* [mm]			Třída 1 (0,095 mm)		0,1
Drsnost povrchu *Rz* [μm]			Třída 2 (52μm)		29,84
Okujení povrchu [ano/ne]					ano
Otřepy na spodní straně materiálu [ano/ne]					ano
Zaoblení horní hrany řezu [ano/ne]					ano
Řezná (posuvová) rychlost [m/min]					1,9

Pozn.: Vzorek splňuje podmínky 1. třídy přesnosti rozměrů dle ISO 9013.

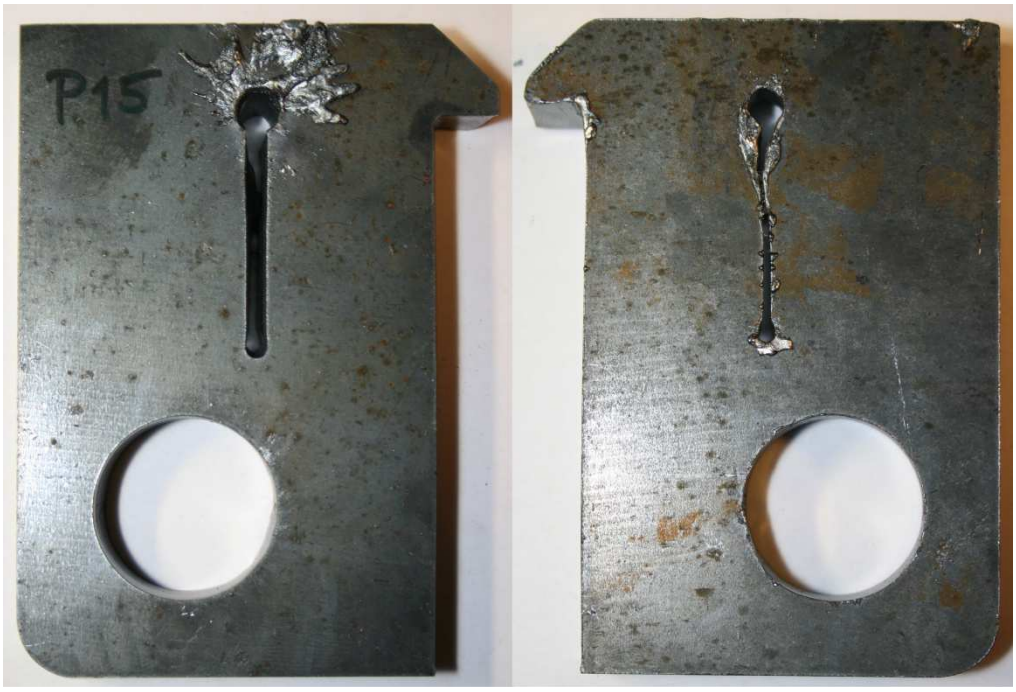
Obr. 5-23 Přední a zadní strana vzorku P15

Tab. 5-24 Hodnocení vzorku P15

Tloušťka materiálu	15 mm	Technický plyn	Kyslík / Vzduch
Technologie	Plazma	Šířka řezné spáry [mm]	2,80
Jakost materiálu	ČSN 41 1373.1	Označení výpalku	P15

Sledovaný parametr			ČSN EN ISO 9013		Naměřená hodnota
Rozměry [mm]	Parametr	Jmen. hodnota	Třída 1	Třída 2	
	t1	110	±0,7	±1,8	110,3
	t2	80			80,44
	t3	95			94,68
	t4	70			70,49
	t5	30	±0,7	±1,8	30,13
Úchylka kolmosti *u* [mm]			Třída 4 (1,1 mm)		0,85
Drsnost povrchu *Rz* [μm]			Třída 1 (19μm)		5,89
Okujení povrchu [ano/ne]					ano
Otřepy na spodní straně materiálu [ano/ne]					ano
Zaoblení horní hrany řezu [ano/ne]					ano
Řezná (posuvová) rychlost [m/min]					1,9

Pozn.: Vzorek splňuje podmínky 1. třídy přesnosti rozměrů dle ISO 9013. U zápalu je vidět značný odstřik materiálu, než dojde k propálení skrz. Na spodní straně je místy otřep, lze odstranit oklepem.



Obr. 5-24 Přední a zadní strana vzorku P15

Tab. 5-25 Hodnocení vzorku V15

Tloušťka materiálu	15 mm	Abrazivo	Granát 80 Mesh
Technologie	Vodní paprsek	Šířka řezné spáry [mm]	1,4
Jakost materiálu	ČSN 41 1373.1	Označení výpalku	V15

Sledovaný parametr			Naměřená hodnota
Rozměry [mm]	Parametr	Jmen. hodnota	
	t1	110	109,38
	t2	80	79,48
	t3	95	94,97
	t4	70	69,6
	t5	30	30,68
Úchylka kolmosti *u* [mm]			0,3
Drsnost povrchu *Rz* [μm]			22,48
Okujení povrchu [ano/ne]			ne
Otřepy na spodní straně materiálu [ano/ne]			ne
Zaoblení horní hrany řezu [ano/ne]			ne
Řezná (posuvová) rychlost [m/min]			0,093

Pozn. Všechny hrany vzorku jsou ostré. Rozměry by bylo možné přiblížit jmenovitým opravením hodnot korekcí.

Obr. 5-25 Přední a zadní strana vzorku V15

Tab. 5-26 Hodnocení vzorku L20

Tloušťka materiálu	20 mm		Technický plyn		Kyslík O_2
Technologie	Laser		Šířka řezné spáry [mm]		0,65
Jakost materiálu	ČSN 41 1373.1		Označení vzorku		L20
Sledovaný parametr			ČSN EN ISO 9013		Naměřená hodnota
Rozměry [mm]	Parametr	Jmen. hodnota	Třída 1	Třída 2	
	t1	110	±0,7	±1,8	109,98
	t2	80			79,99
	t3	95			95,00
	t4	70			70,00
	t5	30	±0,7	±1,8	29,98
Úchylka kolmosti *u* [mm]			Třída 1 (0,11mm)		0,1
Drsnost povrchu *Rz* [μm]			Třída 2 (56μm)		40,21
Okujení povrchu [ano/ne]					Ano
Otřepy na spodní straně materiálu [ano/ne]					ne
Zaoblení horní hrany řezu [ano/ne]					ne
Řezná (posuvová) rychlost [m/min]					0,80

Pozn.: Vzorek splňuje podmínky 1. třídy přesnosti rozměrů. I při této tloušťce materiálu se rozměry výpalku od jmenovitých liší minimálně. Na povrchu řezu jsou již ale znatelné stopy pálení.

Obr. 5-26 Přední a zadní strana vzorku L20

Tab. 5-27 Hodnocení vzorku P20

Tloušťka materiálu	20 mm	Technický plyn	Kyslík / Vzduch
Technologie	Plazma	Šířka řezné spáry [mm]	3,2
Jakost materiálu	ČSN 41 1373.1	Označení výpalku	P20

Sledovaný parametr			ČSN EN ISO 9013		Naměřená hodnota
Rozměry [mm]	Parametr	Jmen. hodnota	Třída 1	Třída 2	
	t1	110	±0,7	±1,8	109,82
	t2	80			80,09
	t3	95			95,39
	t4	70			70,60
	t5	30	±0,7	±1,8	30,20
Úchylka kolmosti *u* [mm]			Třída 1 (0,11mm)		0
Drsnost povrchu *Rz* [µm]			Třída 1 (22µm)		5,41
Okujení povrchu [ano/ne]					ano
Otřepy na spodní straně materiálu [ano/ne]					ano
Zaoblení horní hrany řezu [ano/ne]					ano
Řezná (posuvová) rychlost [m/min]					1,3

Pozn.: Vzorek splňuje podmínky 1. třídy přesnosti rozměrů dle ISO 9013. Spodní strana řezu je silně okujená, ale lze očistit oklepem nebo obroušením.

Obr. 5-27 Přední a zadní strana vzorku P20

Tab. 5-28 Hodnocení vzorku V20

Tloušťka materiálu	20 mm	Abrazivo	Granát 80 Mesh
Technologie	Vodní paprsek	Šířka řezné spáry [mm]	1,4
Jakost materiálu	ČSN 41 1373.1	Označení výpalku	V20

Sledovaný parametr			Naměřená hodnota
Rozměry [mm]	Parametr	Jmen. hodnota	
	t1	110	109,3
	t2	80	79,23
	t3	95	94,95
	t4	70	69,42
	t5	30	30,78
Úchylka kolmosti *u* [mm]			0,15
Drsnost povrchu *Rz* [μm]			17,66
Okujení povrchu [ano/ne]			ne
Otřepy na spodní straně materiálu [ano/ne]			ne
Zaoblení horní hrany řezu [ano/ne]			ne
Řezná (posuvová) rychlost [m/min]			0,077

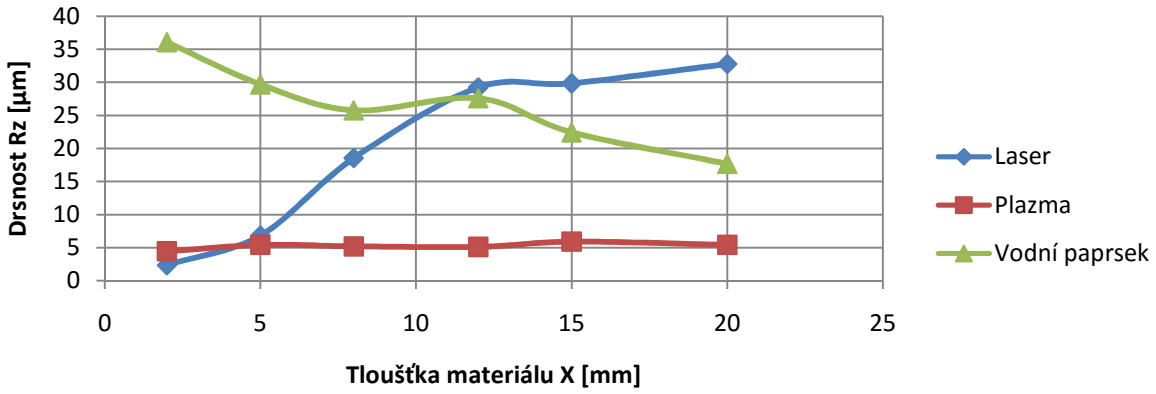
Pozn. Při dořezávání otvoru zůstal ve spodní části můstek, který držel vnitřní kruh.

Obr. 5-28 Přední a zadní strana vzorku V12

5.2 Hodnocení vzorků

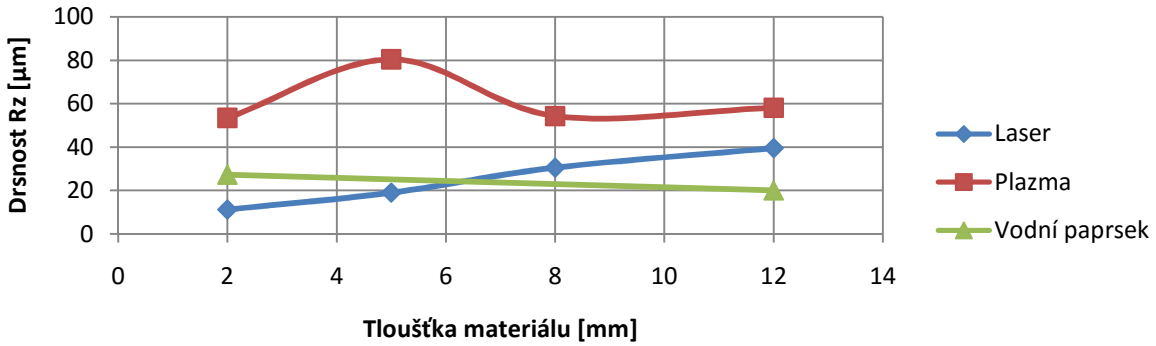
5.2.1 Vývoj drsnosti řezu

V případě řezání konstrukční oceli 11 373 je v grafu (Obr. 5-29) vidět průběh změn drsnosti vzhledem k tloušťce řezaného materiálu. Při řezání laserem je vidět nárůst drsnosti při rostoucí tloušťce materiálu, je to dáno principem technologie, kdy při malých tloušťkách je tavenina pouze vyfukována plynem z místa řezu, při větší je již nutná podpora řezným kyslíkem, při které vzniká drsnější povrch. U plazmového řezání je průběh vyrovnaný, zřejmě zde převažuje vliv většího průměru paprsku a vyšší teploty řezání, kdy se natavená povrchová vrstva slévá a netvoří hrubý povrch. V případě řezání vodním paprskem je tendence velikosti parametru drsnosti klesající, vlivem klesající řezné rychlosti. Vzhled hrubě broušeného povrchu odpovídá vyšší drsnosti. Stabilně nejmenší drsnosti povrchu dosahuje technologie plazmového řezání.



Obr. 5-29 Diagram závislosti Rz na tloušťce X u mat. 11 373

V případě řezání austenitické korozivzdorné oceli 17 240 je v grafu (Obr. 5-30) znázorněn průběh změn drsnosti povrchu při jednotlivých metodách řezání. V případě laserového řezání je znovu patrný nárůst drsnosti při zvětšující se tloušťce materiálu. Při plazmovém řezání je u tohoto materiálu dosahovaná drsnost vysoká, použitím plynů vhodnějších pro řezání této oceli by se zřejmě docílilo hodnot nižších. U metody vodním paprskem přestože byly řezány pouze 2 vzorky lze usuzovat klesající hodnoty drsnosti podobně jako při řezání konstrukční oceli. Chemické složení oceli na abrazivní proces při řezání nemá výrazný vliv, který mají hlavně mechanické charakteristiky oceli.



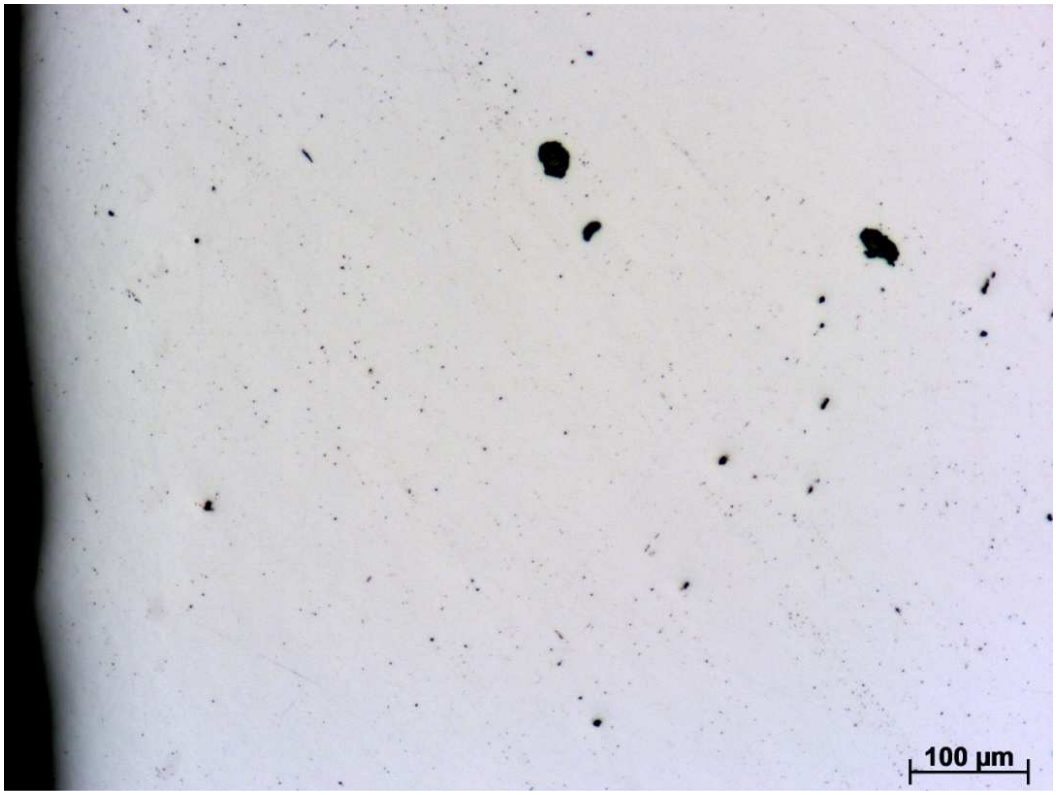
Obr. 5-30 Diagram závislosti Rz na tloušťce X u mat. 17 240

5.2.2 Tepelně ovlivněná oblast

Při řezání kovových materiálů technologiemi plazmového a laserového řezání dochází kromě tepelného působení v místě řezu i k přenosu tepla do základního materiálu v blízkosti řezu, vzniku tzv. tepelně ovlivněné oblasti. Tepelně ovlivněná oblast je zóna kolem řezu, kde došlo působením tepla ke změnám struktury, chemických a fyzikálních vlastností materiálu. Tyto změny jsou většinou nežádoucí, například vzhledem k dalším obráběcím operacím, vzniku vnitřního napětí a možnému vzniku trhlin, deformacím dílu, chemické reakci materiálu s okolní atmosférou.

Pro potřeby této práce byla zjišťována tepelně ovlivněná oblast u vzorků tl. 8mm, z materiálu 11 373 a 17 240, řezané laserem a plazmou. Vzhledem k fyzikální podstatě řezání vodním paprskem, tzn. studenému řezu, nebylo zjišťování tepelné ovlivnění vzorků touto metodou.

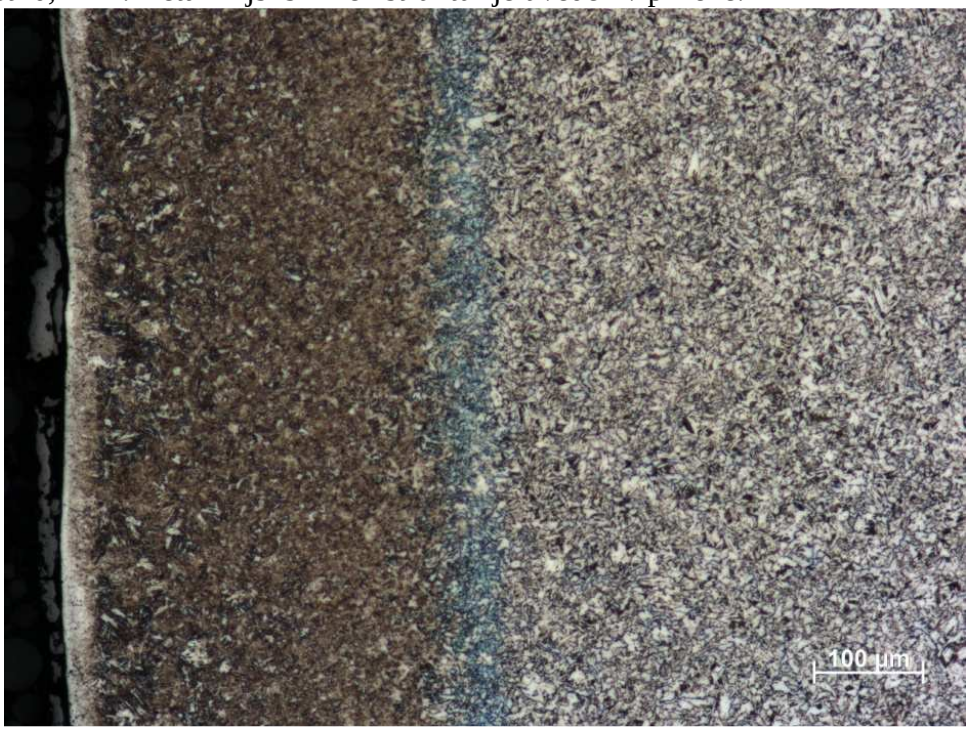
Ze vzorků byly odříznuty menší díly. Z každého vzorku to byly 2 kusy, jeden pro měření tvrdosti na horní straně řezu a druhý na spodní straně řezu. Pro usnadnění manipulace se vzorky, byly tyto zality do pryskyřice. Následovalo broušení a leštění, tak aby bylo možné povrch vzorku sledovat pod mikroskopem.



Obr. 5-31 Snímek laserem řezaného vzorku z mat. 11 373

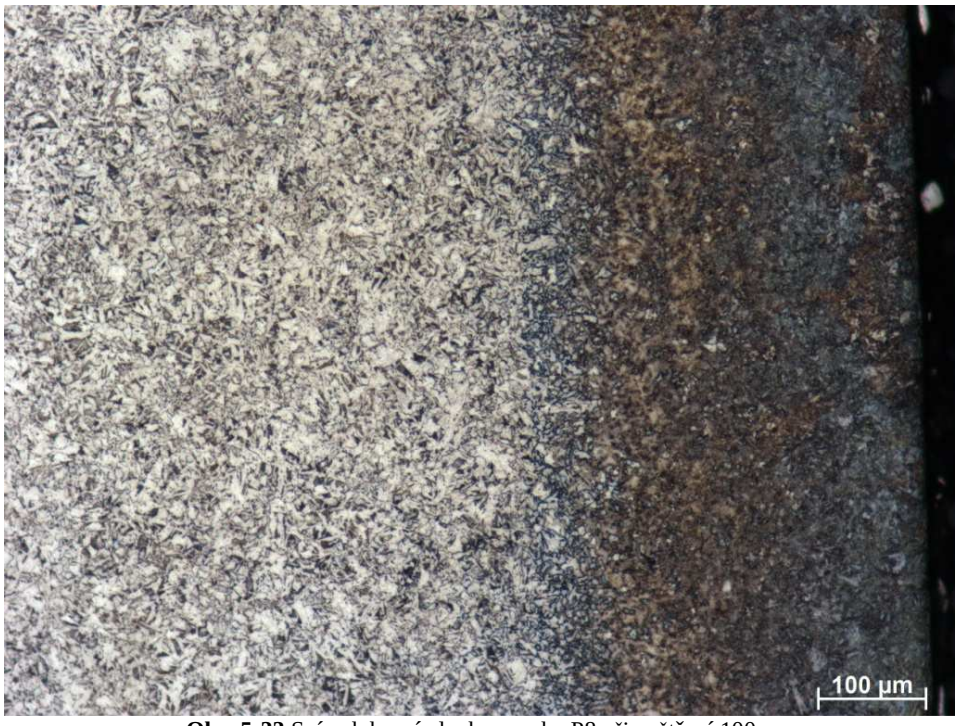
Při takto připraveném povrchu vzorku můžeme sledovat povrchové defekty, trhliny, staženiny, vměstky. Na obrázku (Obr. 5-31) lze pozorovat např. nečistoty v materiálu. Pro sledování struktury materiálu je nutné povrch vzorku leptat, aby došlo ke zviditelnění jednotlivých strukturních částí. Po leptání dojde i ke zviditelnění tepelně ovlivněné oblasti.

Na obrázku (Obr. 5-32) je uveden detail horní plochy vzorku L8 z materiálu 11 373, řezaný laserem. Na první pohled je viditelná zóna tepelného ovlivnění, od hrany zasahuje cca do vzdálenosti 0,4mm. Detailnější snímek struktur je uveden v příloze.



Obr. 5-32 Snímek horní plochy vzorku L8 při zvětšení 100x

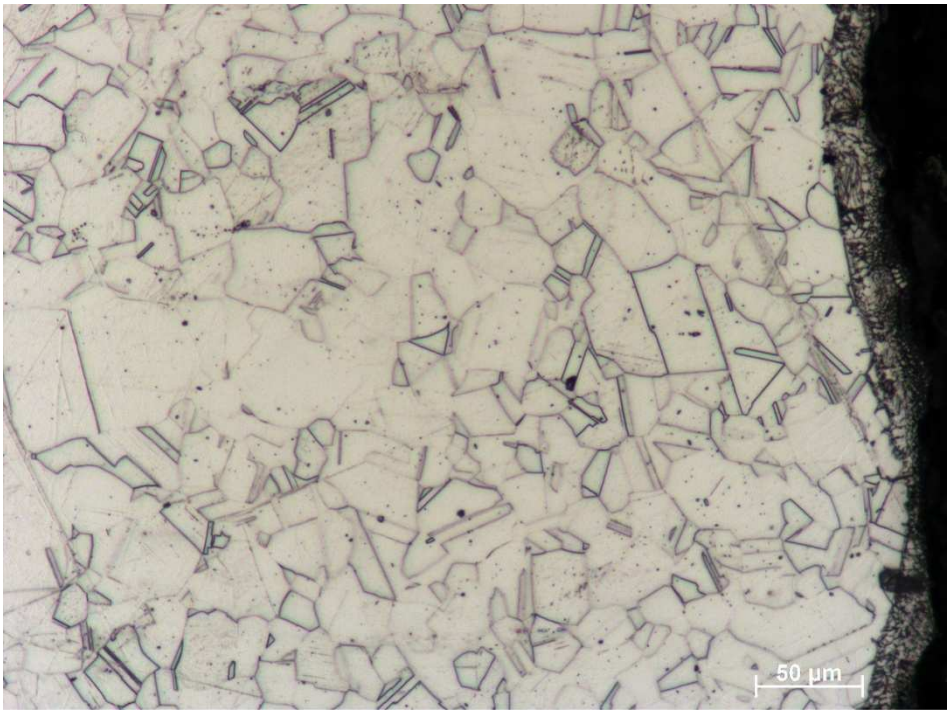
Na obrázku (Obr. 5-33) je znovu vidět výrazně zbarvená tepelně ovlivněná oblast na vzorku P8, z materiálu 11 373, řezaný plazmou. Tepelně ovlivněná oblast zasahuje do vzdálenosti cca 0,36mm od hrany řezu. Stejně jako u vzorku z laseru i zde je výrazná změna struktury materiálu v tepelně ovlivnění oblasti.



Obr. 5-33 Snímek horní plochy vzorku P8 při zvětšení 100x

Obr. 5-34 Snímek horní plochy vzorku NL8 při zvětšení 100x

Na obrázku výše (Obr. 5-34) je detail snímku struktury horní plochy vzorku NL8, materiál 17 240, řez laserem. Tepelně ovlivněná oblast (dále TOO) zasahuje cca do 0,05mm vzdálenosti od hrany řezu. Je patrný ostrý přechod TOO vůči základnímu materiálu. Na vzorku je znatelná stopa po laserovém paprsku.



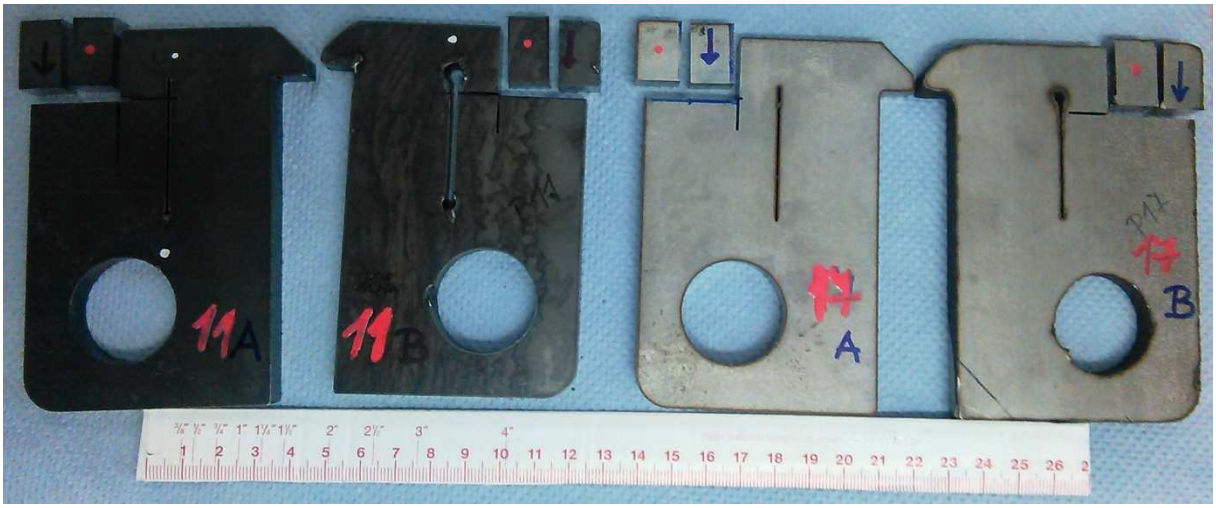
Obr. 5-35 Snímek horní plochy vzorku NP8 při zvětšení 200x

Z Obr. 5-35 je patrná kolísavá velikost tepelně ovlivněné oblasti vzorku NP8, materiál 17 240 řezaný plazmou, která se pohybuje od jednotek mikrometrů po 0,05mm.

U vzorků tloušťky 8mm je z měření patrné, že velikost tepelného ovlivnění materiálu je u obou metod velice podobné. Se změnou tloušťky ale dochází i ke změnám tohoto parametru, proto nelze brát toto měření závazné pro všechny situace.

5.2.3 Průběh změn tvrdosti materiálu

Na vzorcích tl. 8mm byly změřeny průběhy změny tvrdosti vzhledem ke vzdálenosti od místa řezání, tzv. měření mikrotvrdosti. Tyto změny jsou způsobeny tepelným ovlivněním materiálu v blízkosti řezu. Měření mikrotvrdosti je termín zavádějící, jelikož se jedná o použití malého vnikacího tělíska a malých zátěžných sil (v jednotkách desítek N) a tím pádem vzniku malých vtisků, které se obtížně měří. Je důležité připravit povrch v dostatečné kvalitě, tak jako metalografický výbrus.

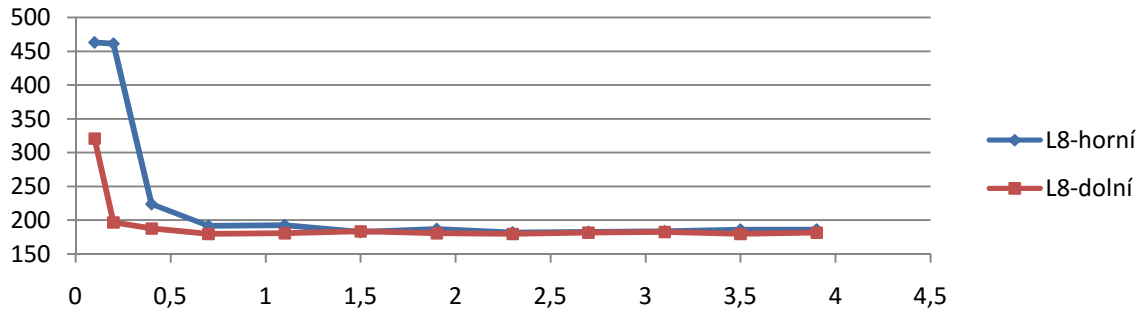


Obr. 5-36 Příprava vzorků pro měření tvrdosti

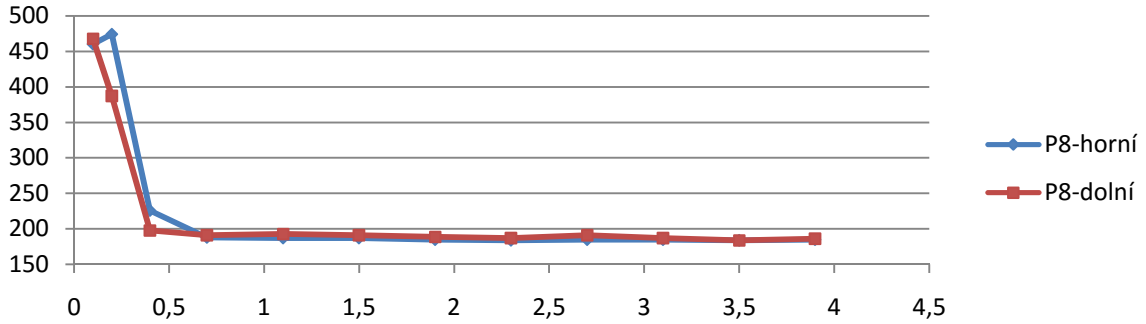
Zkouška tvrdosti probíhala dle normy ČSN EN ISO 6507 - Kovové materiály - Zkouška tvrdosti podle Vickerse, při zatěžující síle F=9,81N, která odpovídá symbolu HV1.
Tvrdosti byly měřeny v několika vzdálenostech od hrany řezu, postupně se zvětšujících o několik desetin milimetru, od 0,1mm po 3,9mm. Naměřené tvrdosti jsou vyneseny v následující tabulce. Průběhy velikostí tvrdosti jsou vyneseny do následujících diagramů.

	Vzdálenost od místa řezu [mm]											
Vzorek	0,1	0,2	0,4	0,7	1,1	1,5	1,9	2,3	2,7	3,1	3,5	3,9
L8-horní	463	461	224	192	193	183	187	182	183	184	186	186
L8-dolní	321	197	188	180	181	184	181	180	182	183	180	182
P8-horní	460	474	226	188	187	187	185	184	185	185	184	185
P8-dolní	468	387	198	191	193	191	189	187	191	187	184	186
NL8-horní	X	211	214	222	225	218	219	217	218	221	238	231
NL8-dolní	X	223	232	213	223	228	232	224	224	234	235	230
NP8-horní	X	212	214	211	205	210	209	208	216	217	222	221
NP8-dolní	X	210	213	210	207	206	201	198	199	204	194	202

Tab. 5-29 Seznam naměřených hodnot tvrdosti HV1 v příslušné vzdálenosti od řezu

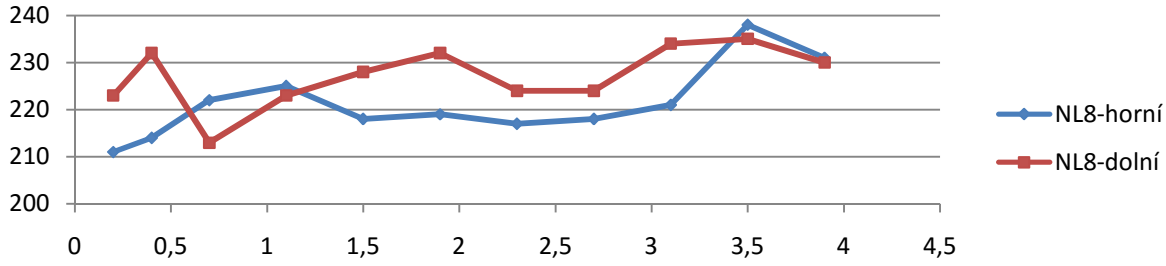


Obr. 5-37 Diagram průběhu změn tvrdosti vzorku L8

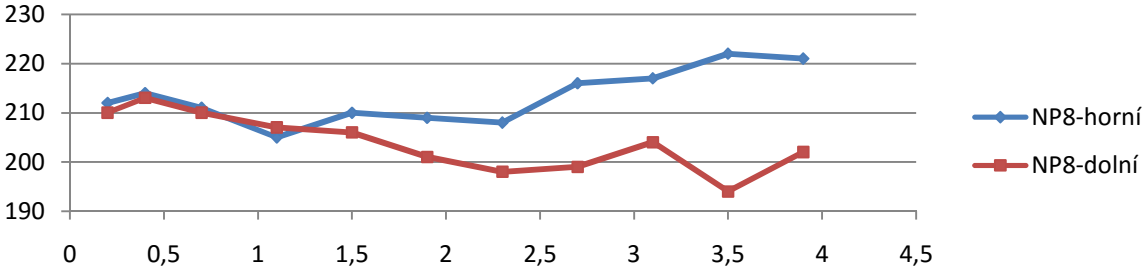


Obr. 5-38 Diagram průběhu změn tvrdosti vzorku P8

U vzorku zhotoveného laserovým řezáním (Obr. 5-37) je změna tvrdosti v horní a spodní části značně rozdílná. U vzorku zhotoveného plazmovým řezáním jsou si průběhy podobné. U obou technologií dochází ke změně tvrdosti do vzdálenosti cca 0,5mm od hrany řezu.



Obr. 5-39 Diagram průběhu změn tvrdosti vzorku NL8



Obr. 5-40 Diagram průběhu změn tvrdosti vzorku NP8

U materiálu 17 240 je z diagramů patrné (Obr. 5-39, Obr. 5-40), že nedochází ke změně tvrdosti tepelným ovlivnění. Měření bylo prováděno od vzdálenosti 0,2mm od hrany řezu. Tepelně ovlivněná oblast byla natolik úzká, že by vtisk indentoru zasahoval z části do ní, z části mimo, do neovlivněného materiálu. Změny v průběhu drsnosti jsou tak způsobeny pouze rozdílným umístěním vtisku vůči zrnům v základním materiálu.

6. TECHNICKO-EKONOMICKÉ HODNOCENÍ

6.1 Technické hodnocení

		Plazma Vanad Kompakt	Laser Trumpf Trulaser 3030	Vodní paprsek PTV Cobra
Rozměry pracovního stolu	mm	2000x6000	2000x3000	2000x3000
Příkon zdroje energie	kW	28	28	37
Řídicí systém		B&R	Sinumerik 840D	CNC886
Max. řezaná tl. konstr. oceli	mm	50	25	Více než 100
Řezání nekovových materiálů		ne	omezeně	ano
Šířka řezné spáry	mm	2-6	0,1-0,7	1-1,5
Teplota řezání		Horký řez	Teplý řez	Studený řez
Hlučnost při řezání		Velmi vysoká	Nízká	Vysoká

6.2 Ekonomické hodnocení

Ekonomické hodnocení variant je provedeno způsobem porovnání hodinových sazeb jednotlivých zařízení. Sortiment vyráběný těmito technologiemi se velmi často mění, je velice různorodý, proto se zdá jako výhodnější způsob hodnocení určení průměrné strojní hodinové sazby než náklady na výrobu série typového dílu. Při výpočtu se vychází ze vztahu:

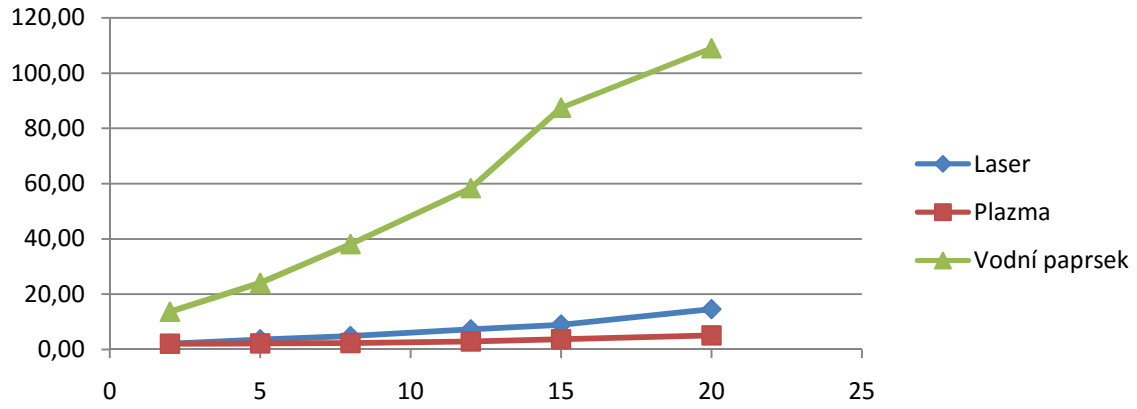
$$PHS\ [Kč/hod] = \frac{Náklady\ \ pracoviště\ [Kč/rok]}{Časový\ \ fond\ \ pracoviště\ [hod/rok]}$$

		Plazma Vanad Kompakt	Laser Trumpf Trulaser 3030	Vodní paprsek PTV Cobra
Celkové investiční náklady	Kč	3 270 000	15 880 000	4 388 000
Odpisové období	rok	5	5	5
Roční odpis	Kč/rok	654 000	3 176 000	877 600
Náklady na: údržbu	Kč/rok	50 000	60 000	60 000
El. energii	Kč/rok	420 000	525 000	480 000
Spotřební díly	Kč/rok	60 000	50 000	60 000
Technické plyny/Abrazivo	Kč/rok	220 000	500 000	350 000
Mzdy	Kč/rok	1 296 000	1 296 000	1 296 000
Náklady pracoviště	Kč/rok	2 700 000	5 607 000	3 123 600
Roční časový fond	Hod/rok	4000	4000	4000
Směnnost výroby		2	2	2
Průměrná hodinová sazba	Kč/hod	675	1402	781

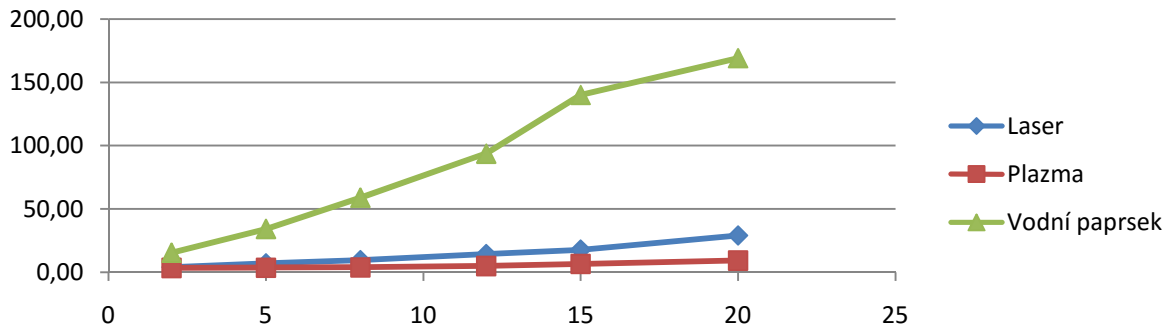
Při výpočtu se vycházelo ze zjištěných průměrných hodnot nákladů jednotlivých položek, průměrné spotřeby pomocného materiálu a energií. Cena zařízení byla zjištěna dle nabídkových cen. Mzdové náklady jsou uvažovány jako mzdy 1 pracovníka připravujícího řezné plány a 2 pracovníků obsluhy stroje.

V následující tabulce jsou uvedeny časy řezání jednotlivých vzorků a přepočet na cenu řezání dle ceny průměrné hodinové sazby.

11 373	Laser		Plazma		Voda	
Tloušťka [mm]	Čas [min]	Cena [Kč]	Čas [min]	Cena [Kč]	Čas [min]	Cena [Kč]
2	0,091	2,12	0,192	2,16	1,05	13,67
5	0,156	3,65	0,198	2,23	1,85	24,08
8	0,208	4,87	0,213	2,39	2,93	38,13
12	0,313	7,30	0,262	2,95	4,48	58,31
15	0,385	8,99	0,333	3,75	6,72	87,46
20	0,625	14,60	0,455	5,11	8,37	108,94
17 240	Laser		Plazma		Voda	
Tloušťka [mm]	Čas [min]	Cena [Kč]	Čas [min]	Cena [Kč]	Čas [min]	Cena [Kč]
2	0,022	0,51	0,195	2,19	1,02	13,28
5	0,102	2,38	0,364	4,10	-	-
8	0,208	4,87	0,403	4,54	-	-
12	0,833	19,47	0,470	5,29	8,52	110,89



Obr. 6-1 Diagram vývoje ceny řezání vzorků pro mat. 11 373



Obr. 6-2 Diagram vývoje ceny 1 metru řezání pro mat. 11 373

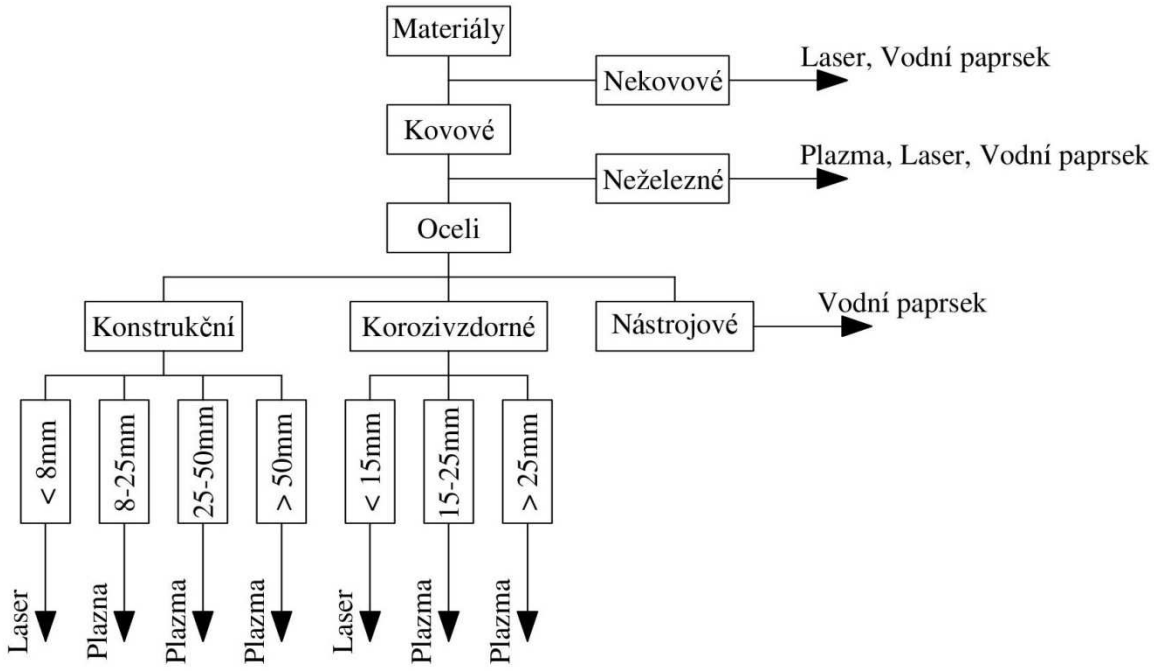
7. NÁVRH METODIKY

V následující tabulce (Tab. 7-1) jsou uvedeny požadavky na řezání s hodnocením vhodnosti jednotlivých variant. Pro jednotlivé případy jsou hodnoceny varianty dle známek 1-3, kde 1 znamená nejvhodnější, 2 znamená vhodný a 3 znamená nejméně vhodný. V hodnocení je zohledněna kvalita řezu, přesnost ale i ekonomická stránka řezání. Hodnocení vychází z naměřených dat, ekonomického hodnocení a vlastních zkušeností.

Požadavek	Plazma	Laser	Vodní paprsek
Konstrukční ocel do 8mm	2	1	3
Konstrukční ocel 8-25mm	1	2	3
Konstrukční ocel 25-50mm	1	-	2
Konstrukční ocel nad 50mm	1	-	1
Korozivzdorná ocel do 15mm	2	1	3
Korozivzdorná ocel 15-25mm	1	-	2
Korozivzdorná ocel nad 25mm	1	-	2
Nekovové materiály	-	Lze řezat	Lze řezat
Neželezné kovy	Lze řezat	Lze řezat	Lze řezat

Tab. 7-1 Hodnocení vhodnosti variant

Při řezání konstrukční oceli má zásadní vliv na volbu technologie tloušťka materiálu, která přímo ovlivňuje velikost řezných rychlostí a tím ekonomiku řezání. Pro korozivzdorné oceli platí podobné pravidlo. Pro ostatní materiály je uvedena pouze možnost řezání, vždy záleží na konkrétním druhu.



Obr. 7-1 Rozhodovací strom

8. ZÁVĚR

Diplomovou práci je možné rozdělit na dvě hlavní části.

V první, teoretické, části, se práce zabývá rešerší zejména nekonvenčních metod řezání materiálu, které jsou založeny na tepelných, chemických, fyzikálních či mechanických principech. Shrnuje použití nekonvenčních technologií obrábění a podrobněji se zabývá řezáním laserem, plazmou a vodním paprskem.

V druhé, praktické, části, se práce zabývá provedením experimentů řezání vzorků, popisem výrobních zařízení, na kterých byly experimenty provedeny a popisem procesu řezání tak, jak byly vzorky vyráběny. Následuje proces hodnocení součástí, měření rozměrů, měření kvality povrchu a zjišťování tepelného ovlivnění materiálu. Ke konci práce je zpracováno technicko-ekonomické hodnocení a návrh metodiky volby vhodné technologie.

Určit, která technologie je nejlepší, není možné. Každá technologie má své klady a zápory, svou oblast použití, ve které dominuje. Řezání laserem se vyznačuje vysokou přesností, ale také vysokými investičními náklady. Řezání vodním paprskem je univerzální technologie, kterou je možné dělit téměř libovolné materiály, avšak dosahované řezné rychlosti jsou oproti ostatním technologiím nízké a tím pádem roste cena řezání. Výhodou je, že nedochází k ovlivnění řezaného materiálu. Plazmové řezání se vyznačuje poměrně vysokými řeznými rychlostmi, nižšími investičními náklady a nižší přesností řezání, která je ale například pro svařované konstrukce často postačující.

Volba vhodné technologie tak závisí na konkrétním případu potřeby řezání ale také na strojním vybavení firmy, která bude preferovat technologii, kterou disponuje. Při nákupu nového zařízení je nutné vycházet z výrobního sortimentu firmy a jejích požadavků a nároků do budoucna.

Seznam použité literatury

[1] PÍŠKA, Miroslav a kol. *Speciální technologie obrábění.* Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009. 247 s. Učební texty vysokých škol. ISBN 978-80-214-4025-8.

[2] SADÍLEK, Marek. *Nekonvenční metody obrábění I.* 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2009. 146 s. ISBN 978-80-248-2107-8.

[3] MORÁVEK, Rudolf. *Nekonvenční metody obrábění.* 1.vyd. Plzeň: ZČU, 1994. 102 s. ISBN 80-7082-161-2.

[4] HUMÁR, A. *Technologie I. Technologie obrábění - 3. část*. http://docplayer.cz/13479-Technologie-i-technologie-obrabeni-3-cast.html. Brno: VUT, 2005

[5] MINAŘÍK, Václav. *Plamenové svařování*. 1. vyd. Praha: Scientia, 1997, 157 s. ISBN 80-7183-080-1.

[6] KOCMAN, Karel a PROKOP, Jaroslav. *Technologie obrábění.* Vyd. 2. Brno: CERM, 2005. 270 s. ISBN 80-214-3068-0.

[7] DAHOTRE, Narendra B. a HARIMKAR, Sandip P. *Laser fabrication and machining of materials.* New York: Springer, ©2008. xv, 558 s. ISBN 978-0-387-72343-3.

[8] HASSAN EL-HOFY. *Advanced Machining Processes*, McGraw-Hill, 2005

[9] ŘASA, Jaroslav, Přemysl POKORNÝ a Vladimír GABRIEL. *Strojírenská technologie 3 - 2. díl.* 2. vyd. Praha: Scientia, 2005, 221 s. ISBN 80-718-3336-3.

[10] VAŇEK, Petr. *Precizní řezy za zlomek ceny laseru.* Dělení, Spojování,Svařování, 1999. roč. 3.

[11] Příručka Návod k použití Vanad

[12] NOVÁK, Miroslav. Seriál na téma lasery – Hlavní typy laserů používaných v průmyslu. *LAO – průmyslové systémy s.r.o.*. [online]. 15.3.2011 [cit. 2016-03-08]. Dostupné z: http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu-128

[13] TRUMPF Česká Republika - *Řezání plamenem*. [online]. 2016 [cit. 2016-03-11]. Dostupné z: http://www.cz.trumpf.com/cs/produkty/laserova-technika/reseni/oblasti-pouziti/laserove-rezani/rezani-plamenem.html

[14] TELWIN S.P.A.. *MIG/TIG/MMA Welding machines, Spot welding machines, Plasma cutting systems, Battery chargers and starters.* [online]. 2013 [cit. 2016-03-30]. Dostupné z: http://www.telwin.com/webtelwin/site.nsf/webindex?openform&E

[15] VANAD 2000 a.s..*Vanad KOMPAKT: CNC plazmový řezací stroj, plazma řezačky. 2016*. [online]. [cit. 2016-01-18]. Dostupné z: http://www.vanad.cz/vanad-kompakt.

[16] HST TECHNOLOGIC s.r.o.. *Schéma hořáku - CP 251 G - CEBORA - Svařování. 2016*. [online]. [cit. 2016-03-30]. Dostupné z: http://www.hstcebora.cz/katalog/primusenstvi/plazmove-horaky/cp-251-g/schema-horaku-s137cz

[17] KJELLBERG VERTRIEB GmbH. *Outstanding performance and quality from all variants of the new HiFocus plasma torches*. [online]. [cit. 2016-04-17]. Dostupné z: http://www.kjellberg.de/About-us/Press/Press-Releases/page-10/Outstanding-performance-and-quality-from-all-variants-of-the-new-HiFocus-plasma-torches.html

[18] KJELLBERG VERTRIEB GmbH. *Brochure HiFocus series.* [online]. [cit. 2016-04-17]. Dostupné z: http://www.kjellberg.de/files/Documents/Plasma/Products/Machines/CNC/Brochure-HiFocus-series-de-en.pdf

[19] CONTROL ENGINEERING Česko. *Systém X20 od B&R.* [online]. [cit. 2016-04-18]. Dostupné z: http://www.controlengcesko.com/hlavni-menu/artykuly/artykul/article/system-x20-od-br/

[20] TRUMPF Česká Republika – *Trumpf TruLaser*. [online]. 2016 [cit. 2016-04-28]. Dostupné z: http://www.cz.trumpf.com/index.php?eID=tx_nawsecuredl&u=0&file=fileadmin/DAM/trumpf-machines.com/Produkte/Prospekte/Prospekt_TruLaser.pdf

[21] PTV, spol. s r.o. – *Produkty*. [online]. 2016 [cit. 2016-05-05]. Dostupné z: http://www.ptv.cz/produkty/

[22] Příručka Proces řezání PTV

[23] ČSN EN ISO 9013. *Tepelné dělení-Klasifikace řezů-Geometrické požadavky na výrobky na úchylky jakosti řezu*. Chotěboř: Český normalizační institut, 2003.

[23] ČSN EN ISO 6507. *Kovové materiály - Zkouška tvrdosti podle Vickerse*. Praha: Český normalizační institut, 2006.

[24] BOHDAN BOLZANO s.r.o. *Technická příručka* [online]. 2016 [cit. 2016-05-08]. Dostupné z: http://www.bolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka

Seznam obrázků

Obr. 2-1 Schéma elektrochemického obrábění [3] ... 13
Obr. 2-2 Schéma chemického obrábění [3] ... 13
Obr. 2-3 Schéma elektroerozivního obrábění [3] ... 14
Obr. 2-4 Schéma elektroerozivního řezání [6] ... 15
Obr. 2-5 Schéma plasmového hořáku [3] ... 15
Obr. 2-6 Schéma zařízení pro obrábění laserem [1] ... 16
Obr. 2-7 Schéma obrábění elektronovým paprskem [3] ... 17
Obr. 2-8 Schéma hořáku [5] ... 17
Obr. 2-9 Schéma obrábění ultrazvukem [3] ... 18
Obr. 2-10 Schéma obrábění paprskem vody [3] ... 19
Obr. 2-11 Schéma obrábění paprskem vody s abrazivem [3] ... 20
Obr. 2-12 Schéma zařízení pro řezání paprskem abraziva [9] ... 20
Obr. 3-1 Schéma plazmového hořáku bez přeneseného oblouku [8] ... 21
Obr. 3-2 Schéma plazmového hořáku s přeneseným obloukem [8] ... 22
Obr. 3-3 Schéma vzduchové plazmy [8] ... 23
Obr. 3-4 Schéma řezání s vodní clonou [8] ... 23
Obr. 3-5 Příklad plazmového zařízení pro ruční řezání [14] ... 24
Obr. 3-6 Porovnání konvenčního a HyDefinition hořáku [10] ... 24
Obr. 3-7 Schéma strojního plazmového hořáku [16] ... 25
Obr. 3-8 Průřez řezem plazmového paprsku [11] ... 26
Obr. 3-9 Směr řezání plazmou [11] ... 26
Obr. 3-10 Schéma tvaru paprsku plazmy [11] ... 26
Obr. 3-11 Schéma laserového zdroje [12] ... 27
Obr. 3-12 Schéma plynového laserového zdroje [12] ... 28
Obr. 3-13 Schéma zdroje vláknového laseru [12] ... 29
Obr. 3-14 Schéma DPSS Nd:YAG laseru se zadním buzením [12] ... 29
Obr. 3-15 Ukázka řezné spáry a místa zápalu ... 31
Obr. 3-16 Detail řezu u plechu tl. 8mm (mat. S235JR) ... 31
Obr. 3-17 Schéma řezání vodou [8] ... 32
Obr. 3-18 Schéma zařízení pro řezání vodním abrazivním paprskem [8] ... 33
Obr. 3-19 Schéma zařízení technologie IJM [8] ... 34
Obr. 4-1 CNC pálicí stroj Vanad Kompakt [15] ... 35
Obr. 4-2 Plazmová řezací jednotka HiFocus 161i neo [18] ... 36
Obr. 4-3 Plazmový hořák PerCut 210 [17] ... 36
Obr. 4-4 Rozstřel dílů hořáku PerCut 210 [18] ... 37
Obr. 4-5 Trumpf TruLaser 3030 [20] ... 39
Obr. 4-6 Povrch řezu při metodě řezání plamenem ... 40
Obr. 4-7 PTV Cobra [21] ... 41
Obr. 4-8 PTV JETS 3,8/60 Compact [21] ... 42
Obr. 4-9 Návrh vzorového dílu pro provedení experimentů ... 44
Obr. 4-10 Parametry měření ... 46
Obr. 5-1 Přední a zadní strana vzorku L2 ... 48
Obr. 5-2 Přední a zadní strana vzorku P2 ... 49
Obr. 5-3 Přední a zadní strana vzorku V2 ... 50
Obr. 5-4 Přední a zadní strana vzorku NL2 ... 51
Obr. 5-5 Přední a zadní strana vzorku NP2 ... 52

Obr. 5-6 Přední a zadní strana vzorku NVP2 53
Obr. 5-7 Přední a zadní strana vzorku L5 54
Obr. 5-8 Přední a zadní strana vzorku P5 55
Obr. 5-9 Přední a zadní strana vzorku V5 56
Obr. 5-10 Přední a zadní strana vzorku NL5 57
Obr. 5-11 Přední a zadní strana vzorku NP5 58
Obr. 5-12 Přední a zadní strana vzorku L8 59
Obr. 5-13 Přední a zadní strana vzorku P5 60
Obr. 5-14 Přední a zadní strana vzorku V8 61
Obr. 5-15 Přední a zadní strana vzorku NL8 62
Obr. 5-16 Přední a zadní strana vzorku NP8 63
Obr. 5-17 Přední a zadní strana vzorku L12 64
Obr. 5-18 Přední a zadní strana vzorku P12 65
Obr. 5-19 Přední a zadní strana vzorku V12 66
Obr. 5-20 Přední a zadní strana vzorku NL12 67
Obr. 5-21 Přední a zadní strana vzorku NP12 68
Obr. 5-22 Přední a zadní strana vzorku NVP12 69
Obr. 5-23 Přední a zadní strana vzorku P15 70
Obr. 5-24 Přední a zadní strana vzorku P15 71
Obr. 5-25 Přední a zadní strana vzorku V15 72
Obr. 5-26 Přední a zadní strana vzorku L20 73
Obr. 5-27 Přední a zadní strana vzorku P20 74
Obr. 5-28 Přední a zadní strana vzorku V12 75
Obr. 5-29 Diagram závislosti Rz na tloušťce X u mat. 11 373 76
Obr. 5-30 Diagram závislosti Rz na tloušťce X u mat. 17 240 76
Obr. 5-31 Snímek laserem řezaného vzorku z mat. 11 373 77
Obr. 5-32 Snímek horní plochy vzorku L8 při zvětšení 100x 78
Obr. 5-33 Snímek horní plochy vzorku P8 při zvětšení 100x 78
Obr. 5-34 Snímek horní plochy vzorku NL8 při zvětšení 100x 79
Obr. 5-35 Snímek horní plochy vzorku NP8 při zvětšení 200x 79
Obr. 5-36 Příprava vzorků pro měření tvrdosti 80
Obr. 5-37 Diagram průběhu změn tvrdosti vzorku L8 81
Obr. 5-38 Diagram průběhu změn tvrdosti vzorku P8 81
Obr. 5-39 Diagram průběhu změn tvrdosti vzorku NL8 81
Obr. 5-40 Diagram průběhu změn tvrdosti vzorku NP8 81
Obr. 6-1 Diagram vývoje ceny řezání vzorků pro mat. 11 373 84
Obr. 7-1 Rozhodovací strom 85

Seznam tabulek

Tab. 2-1 Rozdělení NMO dle využívaných fyzikálně-chemických principů [1] 12
Tab. 4-1 Chemické složení v % u zvolených ocelí 45
Tab. 5-1 Hodnocení vzorku L2 48
Tab. 5-2 Hodnocení vzorku P2 49
Tab. 5-3 Hodnocení vzorku V2 50
Tab. 5-4 Hodnocení vzorku NL2 51
Tab. 5-5 Hodnocení vzorku NP2 52

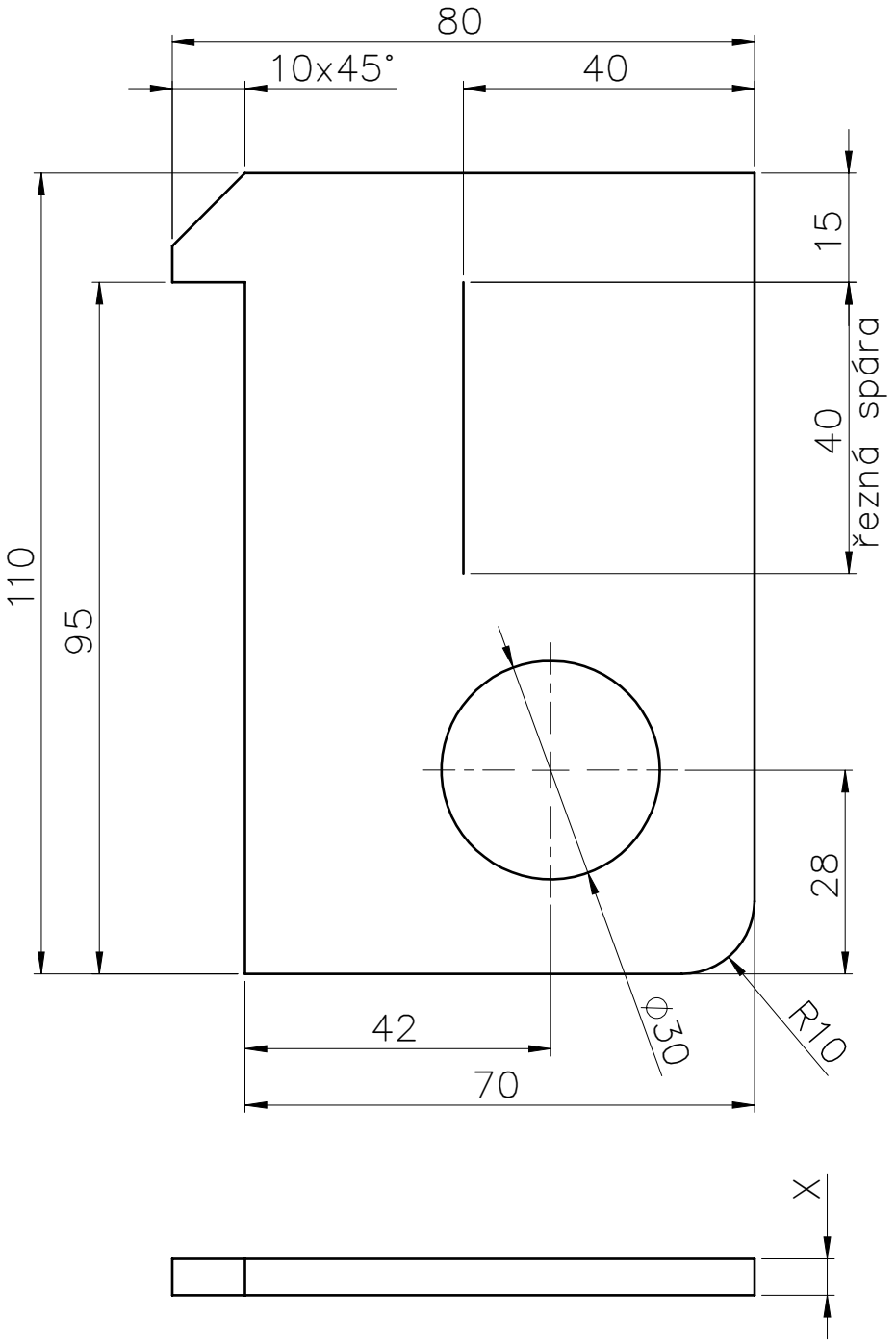
Tab. 5-6 Hodnocení vzorku NVP2 53
Tab. 5-7 Hodnocení vzorku L5 54
Tab. 5-8 Hodnocení vzorku P5 55
Tab. 5-9 Hodnocení vzorku V5 56
Tab. 5-10 Hodnocení vzorku NL5 57
Tab. 5-11 Hodnocení vzorku NP5 58
Tab. 5-12 Hodnocení vzorku L8 59
Tab. 5-13 Hodnocení vzorku P8 60
Tab. 5-14 Hodnocení vzorku V8 61
Tab. 5-15 Hodnocení vzorku NL8 62
Tab. 5-16 Hodnocení vzorku NP8 63
Tab. 5-17 Hodnocení vzorku L12 64
Tab. 5-18 Hodnocení vzorku P12 65
Tab. 5-19 Hodnocení vzorku V12 66
Tab. 5-20 Hodnocení vzorku NL12 67
Tab. 5-21 Hodnocení vzorku NP12 68
Tab. 5-22 Hodnocení vzorku NVP12 69
Tab. 5-23 Hodnocení vzorku P15 70
Tab. 5-24 Hodnocení vzorku P15 71
Tab. 5-25 Hodnocení vzorku V15 72
Tab. 5-26 Hodnocení vzorku L20 73
Tab. 5-27 Hodnocení vzorku P20 74
Tab. 5-28 Hodnocení vzorku V20 75
Tab. 5-29 Seznam naměřených hodnot tvrdosti HV1 v příslušné vzdálenosti od řezu 80
Tab. 7-1 Hodnocení vhodnosti variant 85

Seznam příloh

Příloha č.1 - Výkres vzorku pro provedení experimentu
Příloha č.2 - Snímky detailů vzorků
Příloha č.3 - Snímky metalografických výbrusů vzorků

PŘÍLOHA č. 1

Výkres vzorku pro provedení experimentu

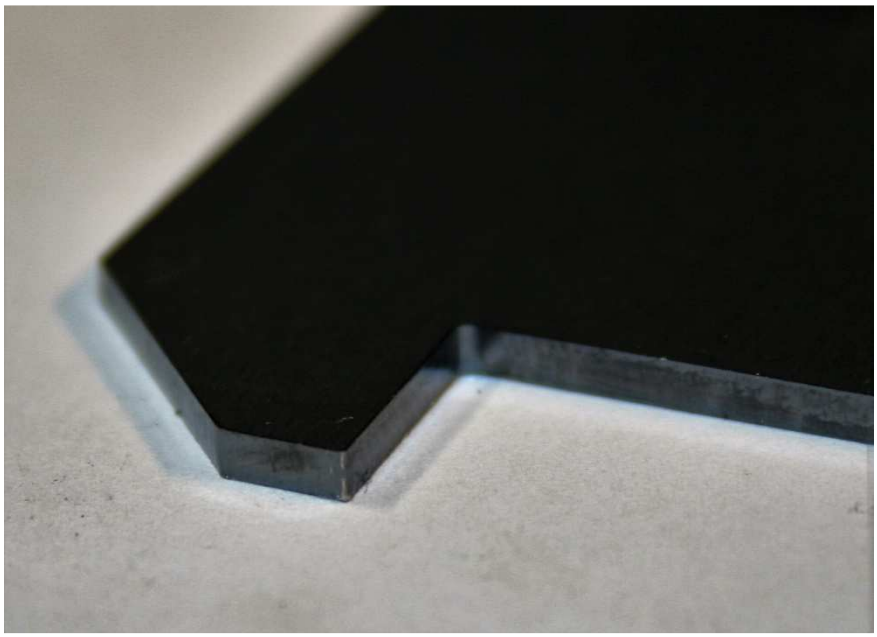


Pozn.: X=2mm
X=5mm
X=8mm
X=12mm
X=15mm
X=20mm

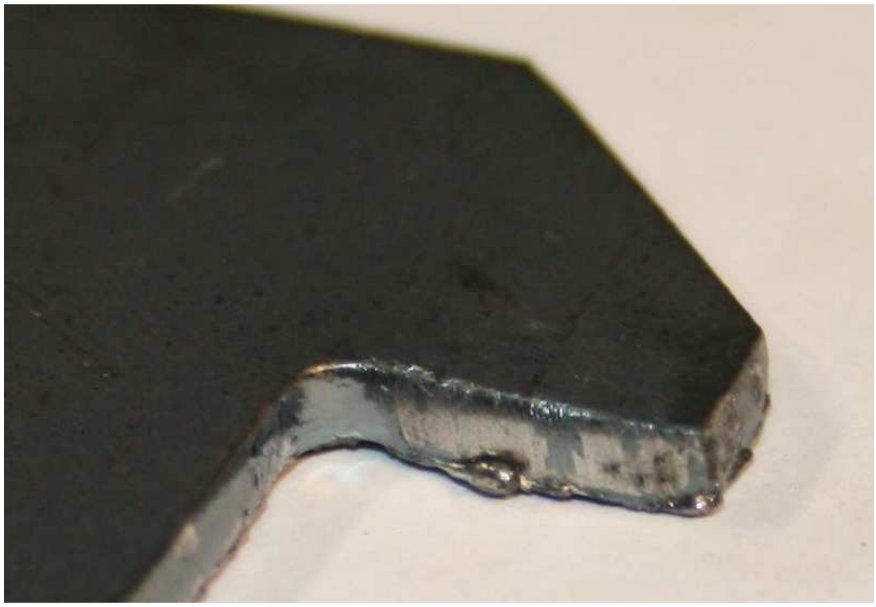
MATERIÁL: 11 373		POLOTOVAR: Px-110x80		ODSTRANIT OSTRÉ HRANY	NEUPRAVOVAT MĚŘÍTKO VÝKRESU / ZMĚNA
	NÁZEV	PODPIS	DATUM		PROMÍTÁNÍ
KRESLIL	Flíček		20.2.2016		ISO E
PŘEZKOUŠEL					FAKULTA STROJNÍ ZÁPADOČESKÉ UNIVERZITY V PLZNI / KATEDRA TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ
SCHVÁLIL					
VÝROBA					
Z. JAKOSTI					
PŘESNOST DLE ČSN ISO 2768-m-K				Č. VÝKRESU: DP_2016_S014N0106P_Vzorek	A4
TOLEROVÁNÍ PODLE ČSN ISO 8015				HMOTNOST: 0.28	MĚŘÍTKO:1:1 / LIST 1 Z 1 LISTŮ

PŘÍLOHA č. 2

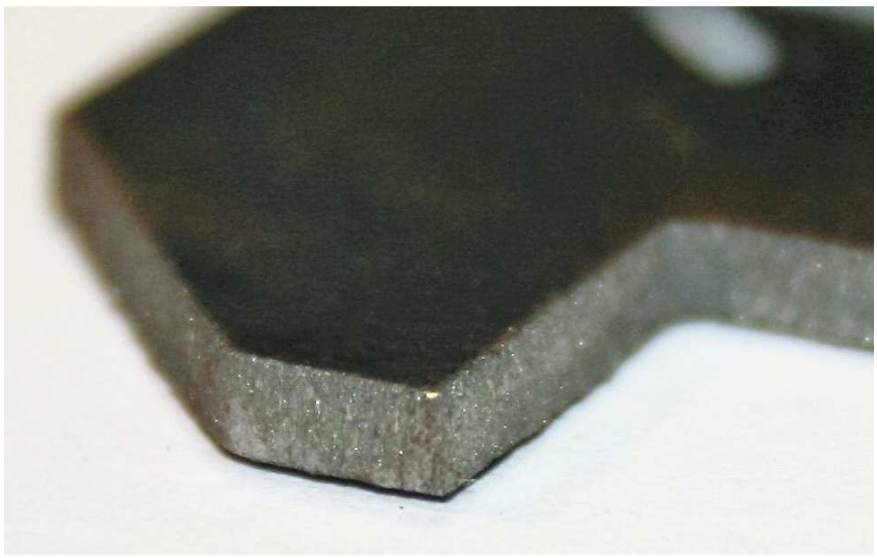
Snímky detailů vzorků



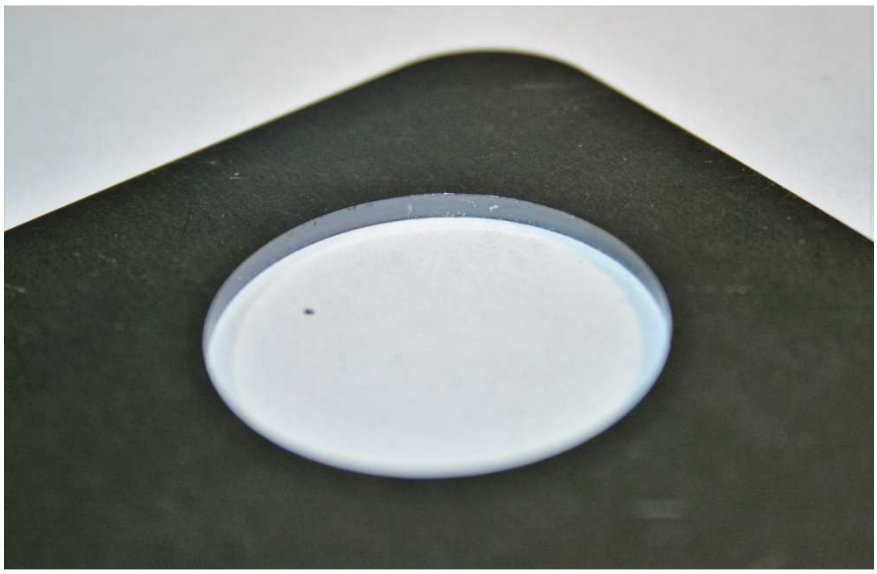
Obr. 1 Detail 1 vzorku L2



Obr. 2 Detail 1 vzorku P2

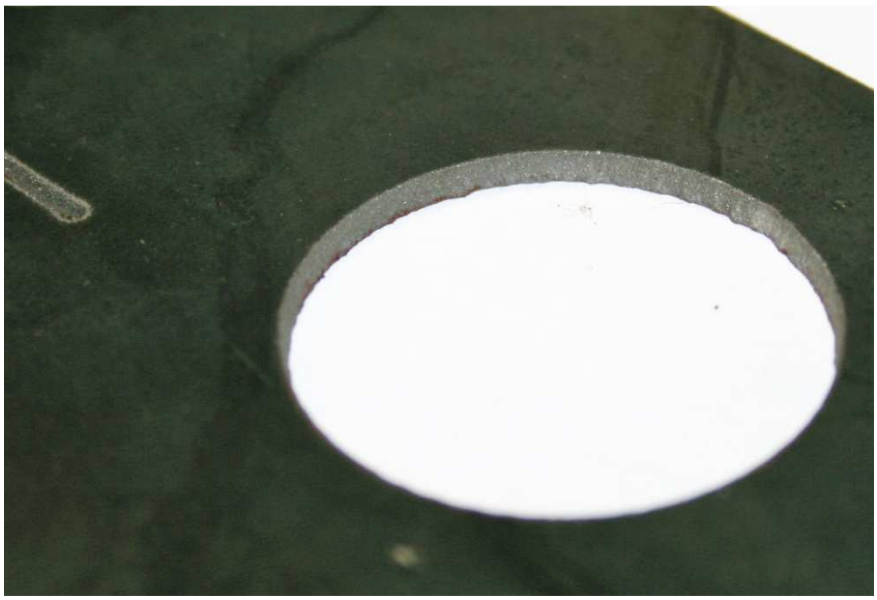


Obr. 3 Detail 1 vzorku V2

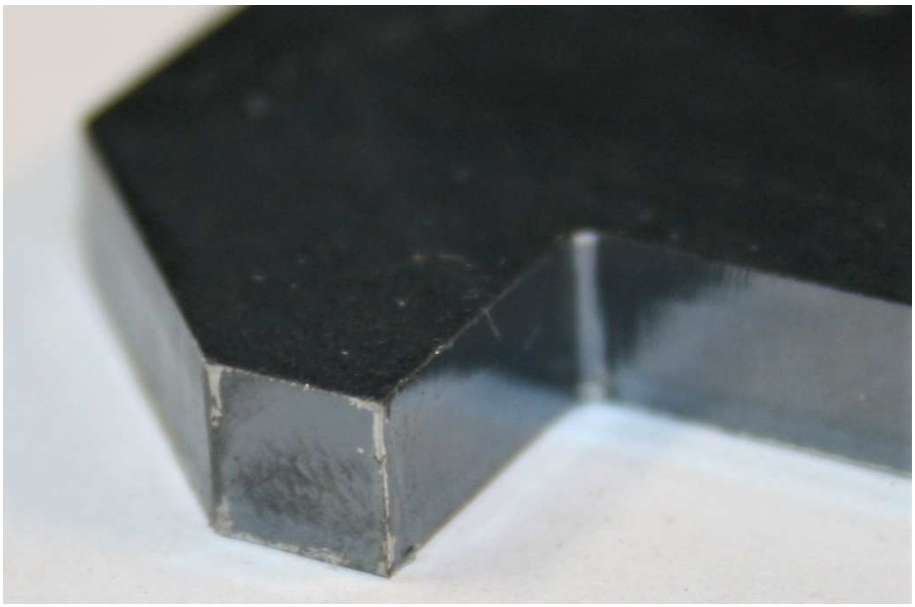


Obr. 4 Detail 2 vzorku L2

Obr. 5 Detail 2 vzorku P2



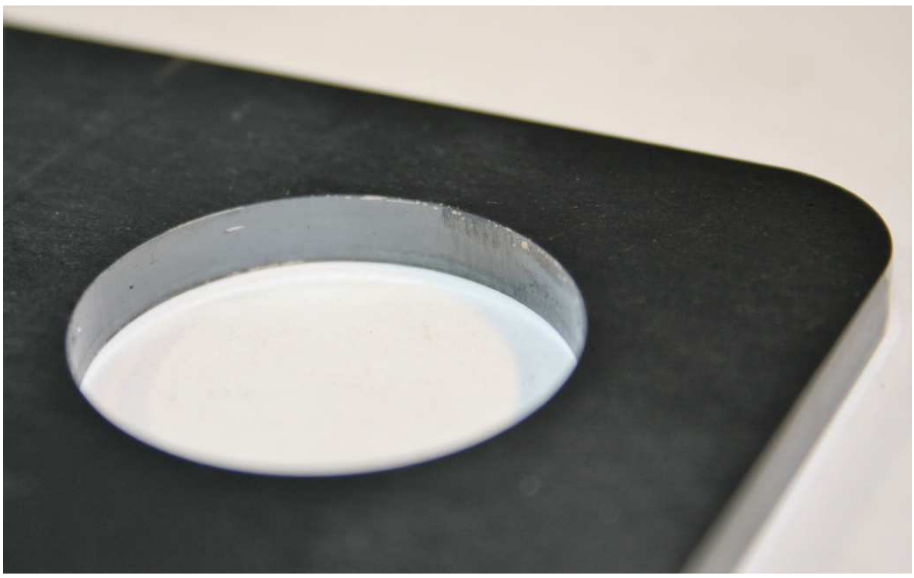
Obr. 6 Detail 2 vzorku V2



Obr. 7 Detail 1 vzorku L5

Obr. 8 Detail 1 vzorku P5

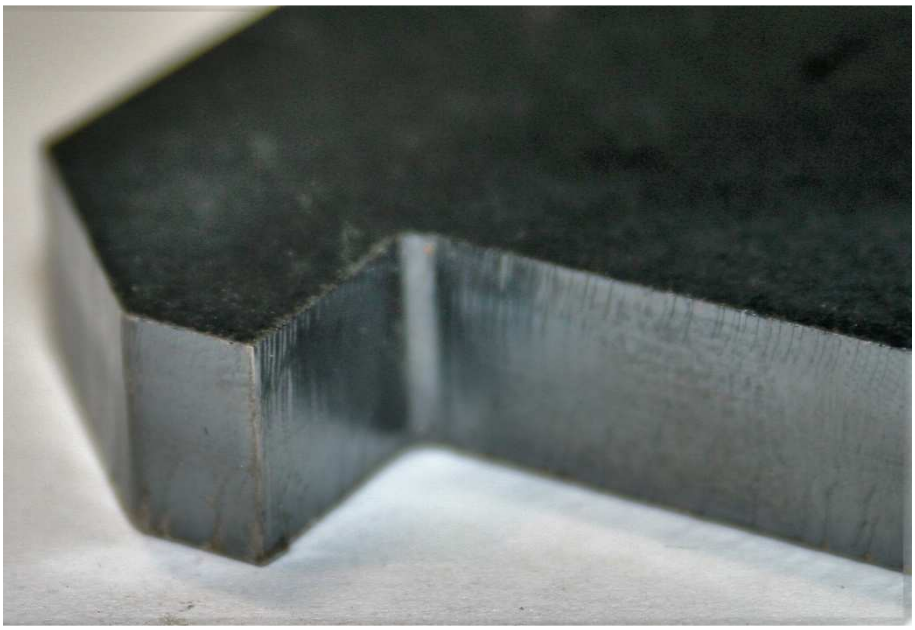
Obr. 9 Detail 1 vzorku V5



Obr. 10 Detail 2 vzorku L5

Obr. 11 Detail 2 vzorku P5

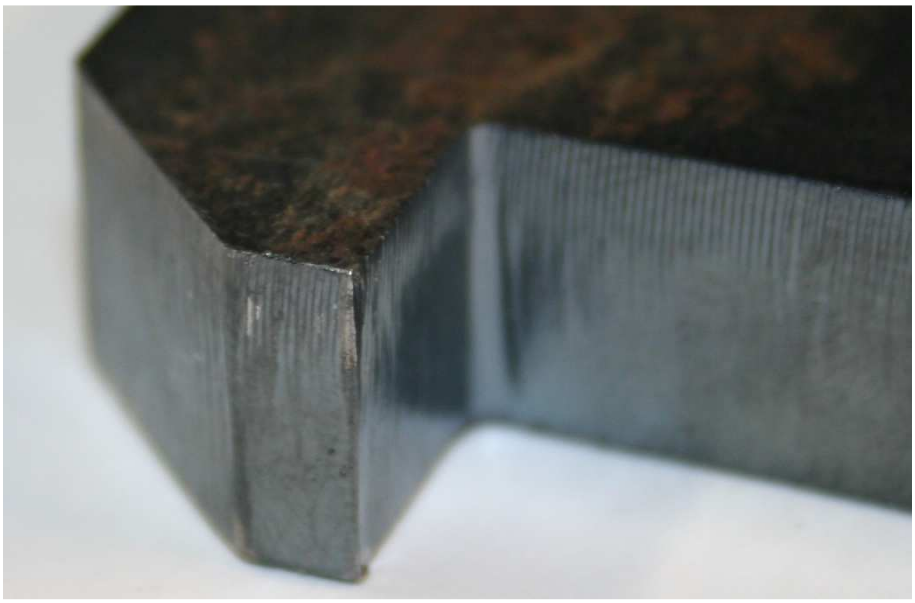
Obr. 12 Detail 2 vzorku V5



Obr. 13 Detail 1 vzorku L8

Obr. 14 Detail 1 vzorku P8

Obr. 15 Detail 1 vzorku V8



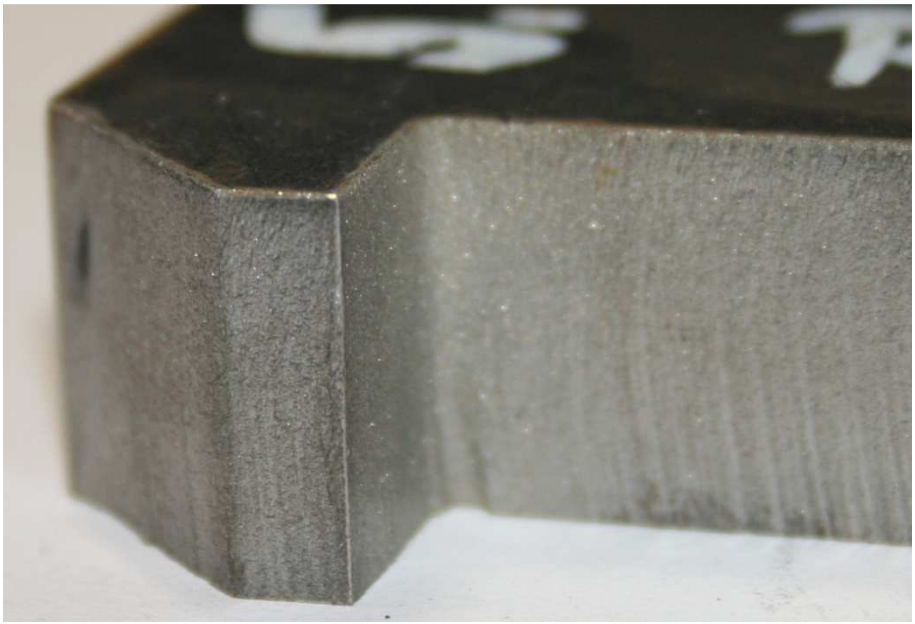
Obr. 16 Detail 1 vzorku L12

Obr. 17 Detail 1 vzorku P12

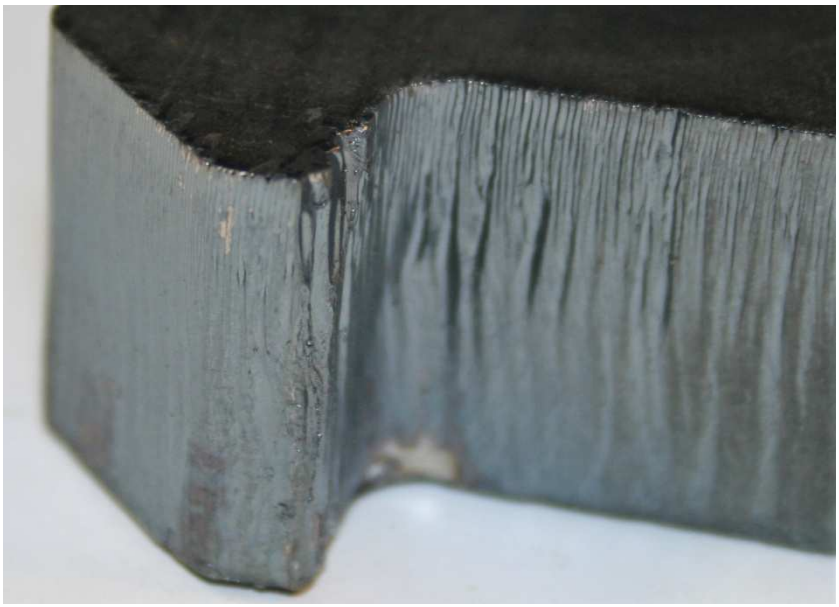
Obr. 18 Detail 1 vzorku V12

Obr. 19 Detail 2 vzorku P12

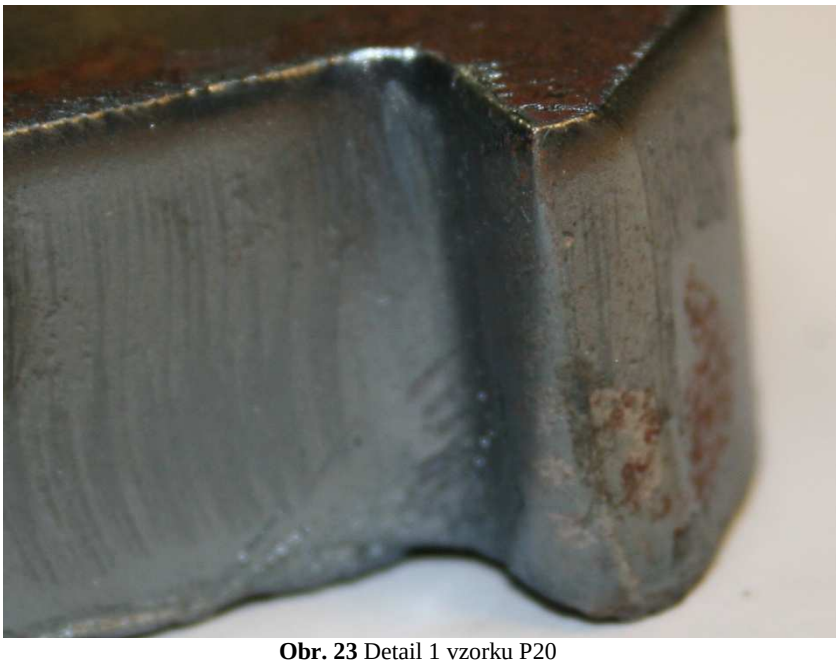
Obr. 20 Detail 1 vzorku P15



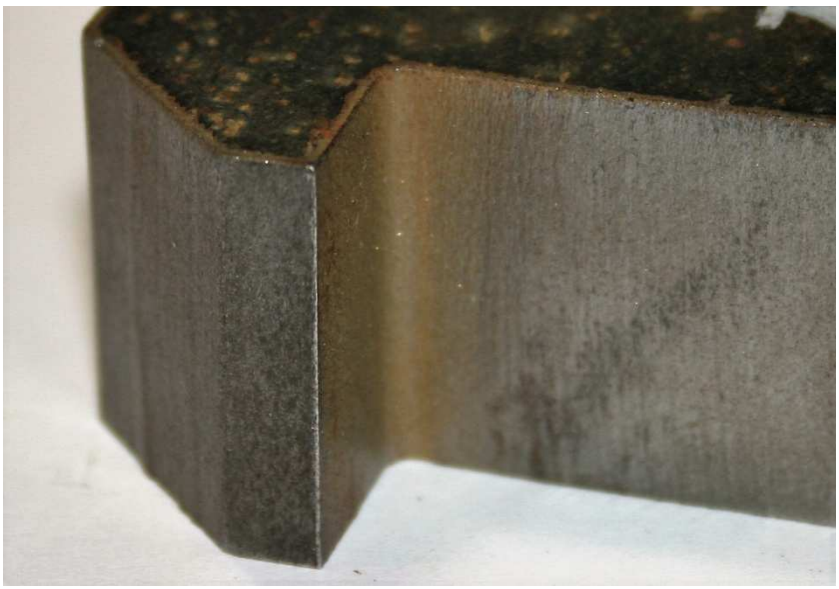
Obr. 21 Detail 1 vzorku V15



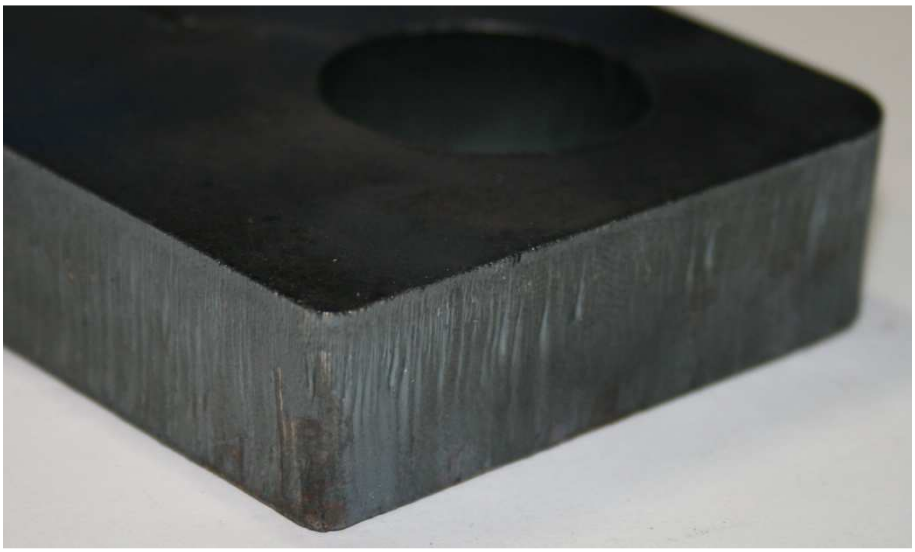
Obr. 22 Detail 1 vzorku L20



Obr. 23 Detail 1 vzorku P20

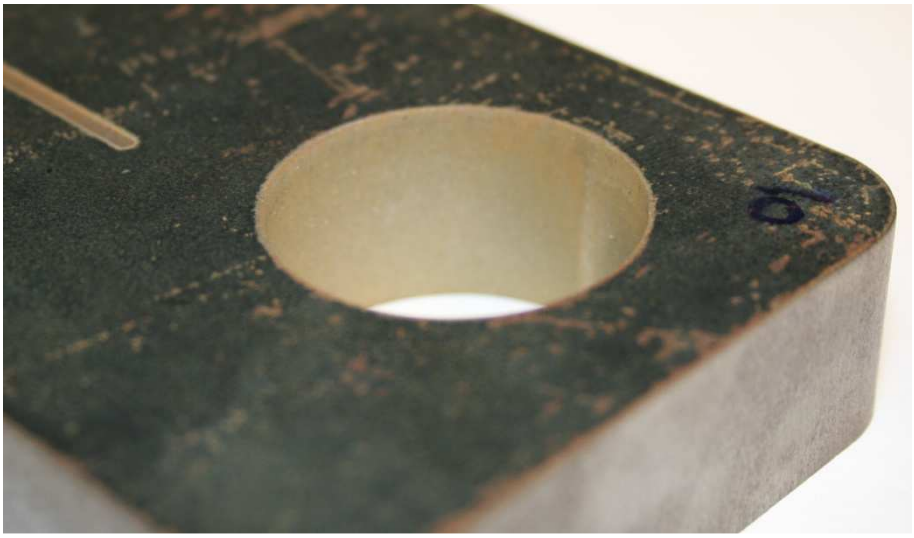


Obr. 24 Detail 1 vzorku V20

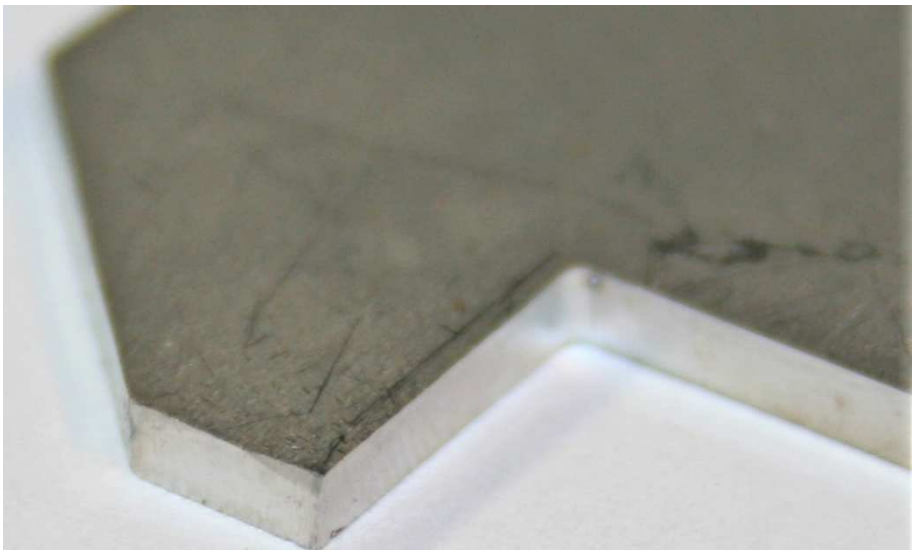


Obr. 25 Detail 2 vzorku L20

Obr. 26 Detail 2 vzorku P20

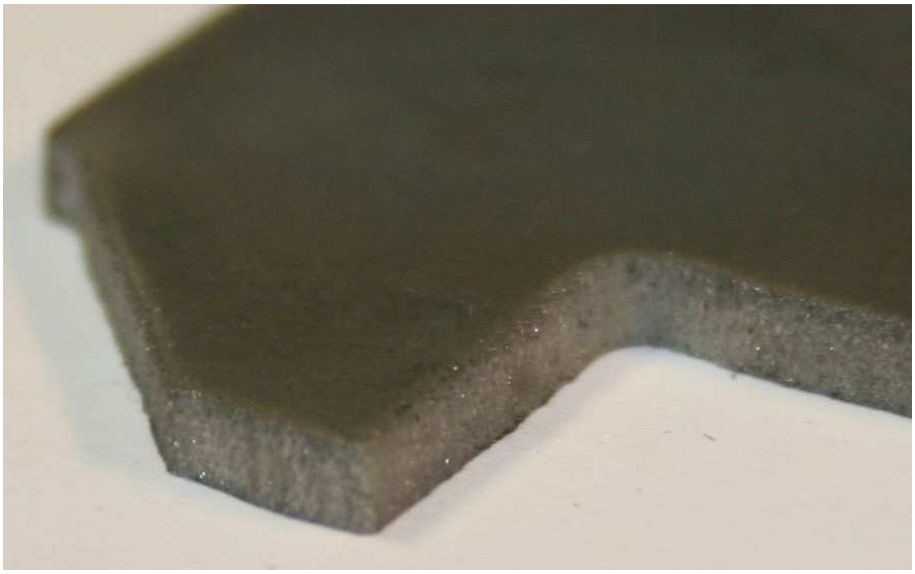


Obr. 27 Detail 2 vzorku V20



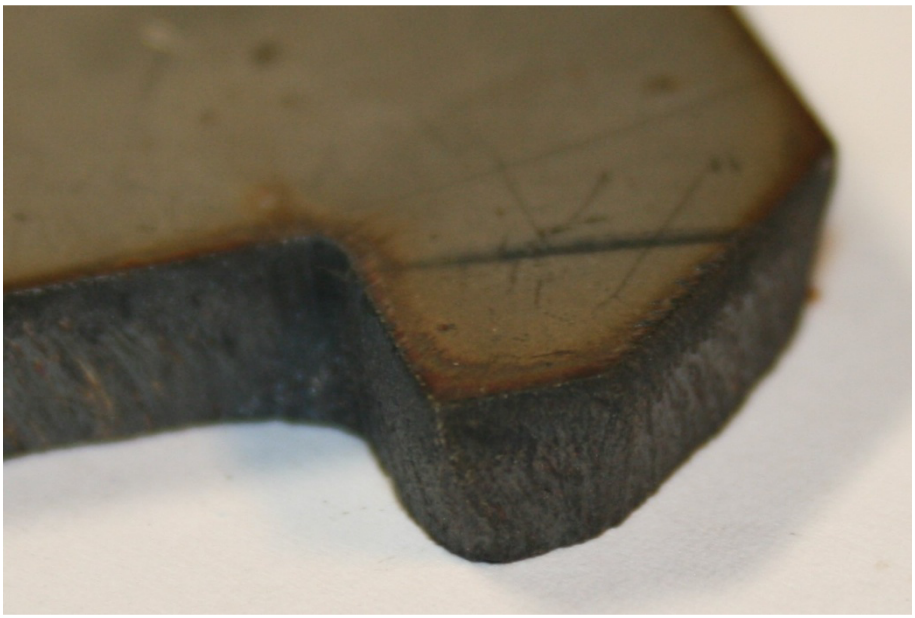
Obr. 28 Detail 1 vzorku NL2

Obr. 29 Detail 1 vzorku NP2



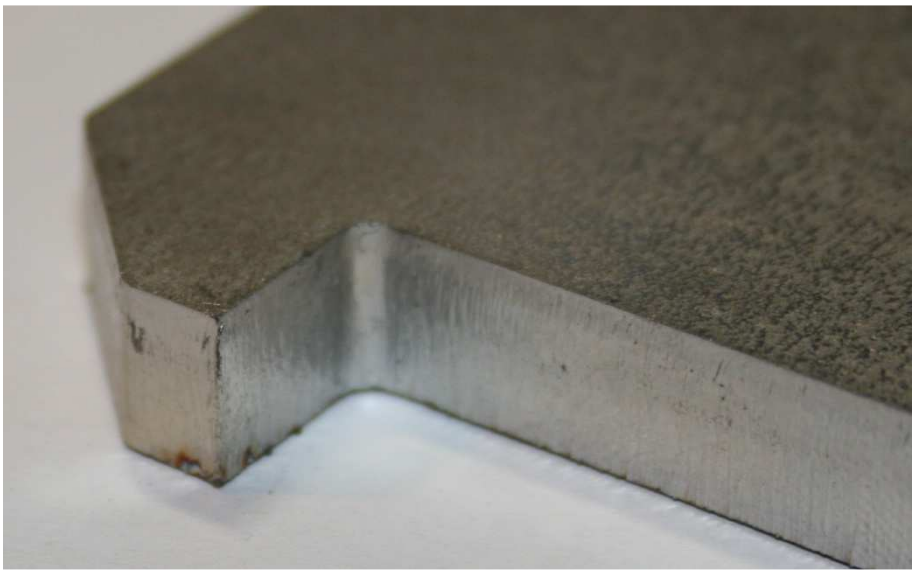
Obr. 30 Detail 1 vzorku NVP2

Obr. 31 Detail 1 vzorku NL5



Obr. 32 Detail 1 vzorku NP5

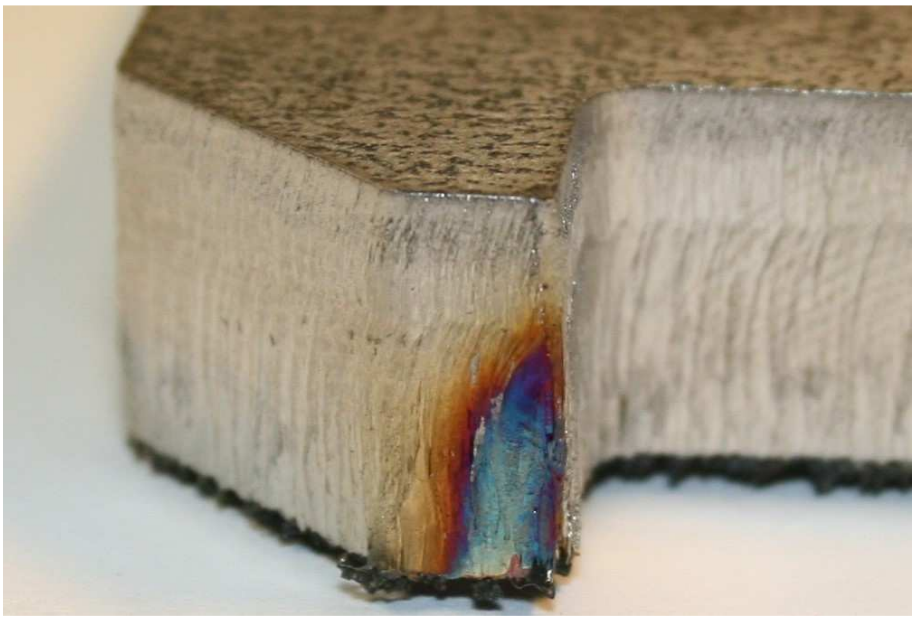
Obr. 33 Detail 1 vzorku NP5



Obr. 34 Detail 1 vzorku NL8

Obr. 35 Detail 1 vzorku NP8

Obr. 36 Detail 2 vzorku NL8



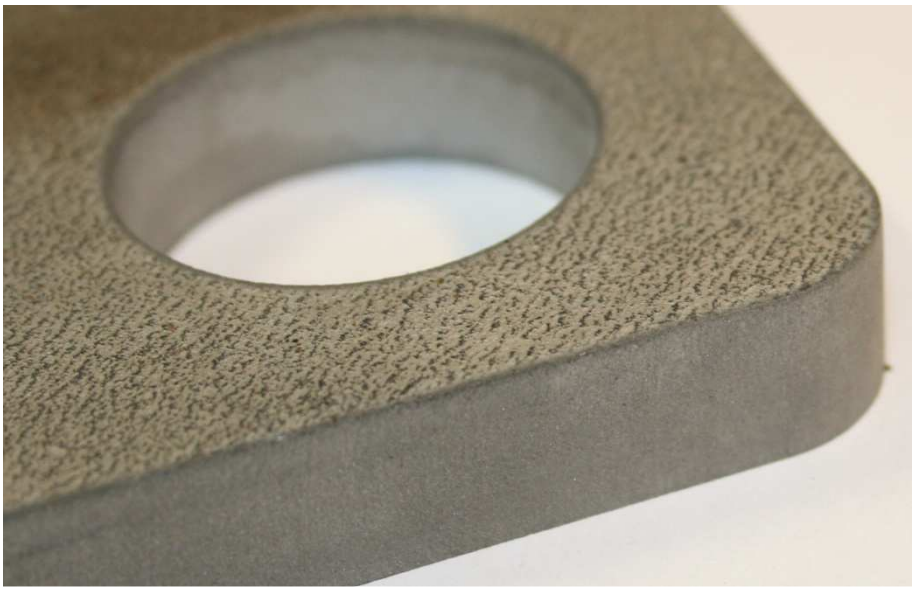
Obr. 37 Detail 1 vzorku NL12

Obr. 38 Detail 1 vzorku NP12

Obr. 39 Detail 1 vzorku NVP12

Obr. 40 Detail 2 vzorku NL12

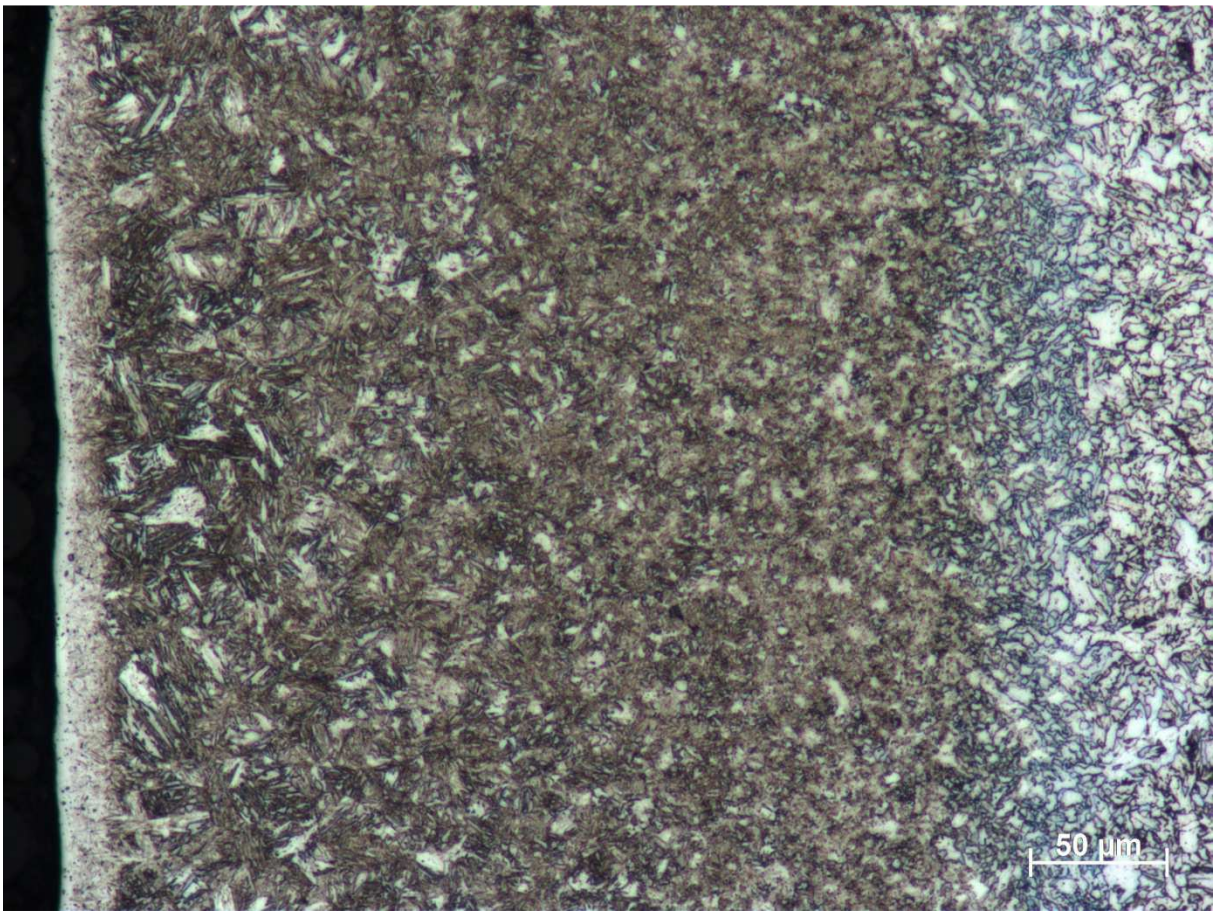
Obr. 41 Detail 2 vzorku NP12



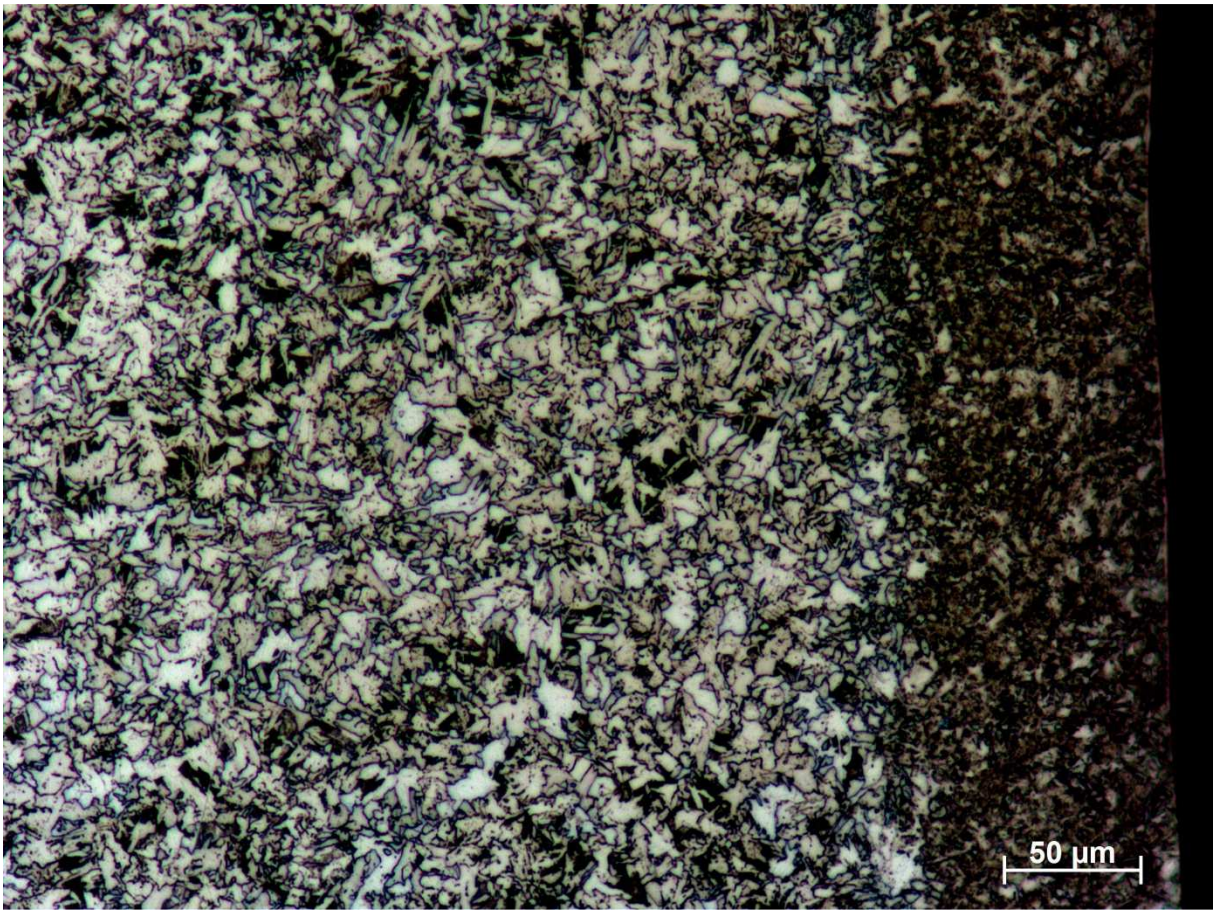
Obr. 42 Detail 2 vzorku NVP12

PŘÍLOHA č. 3

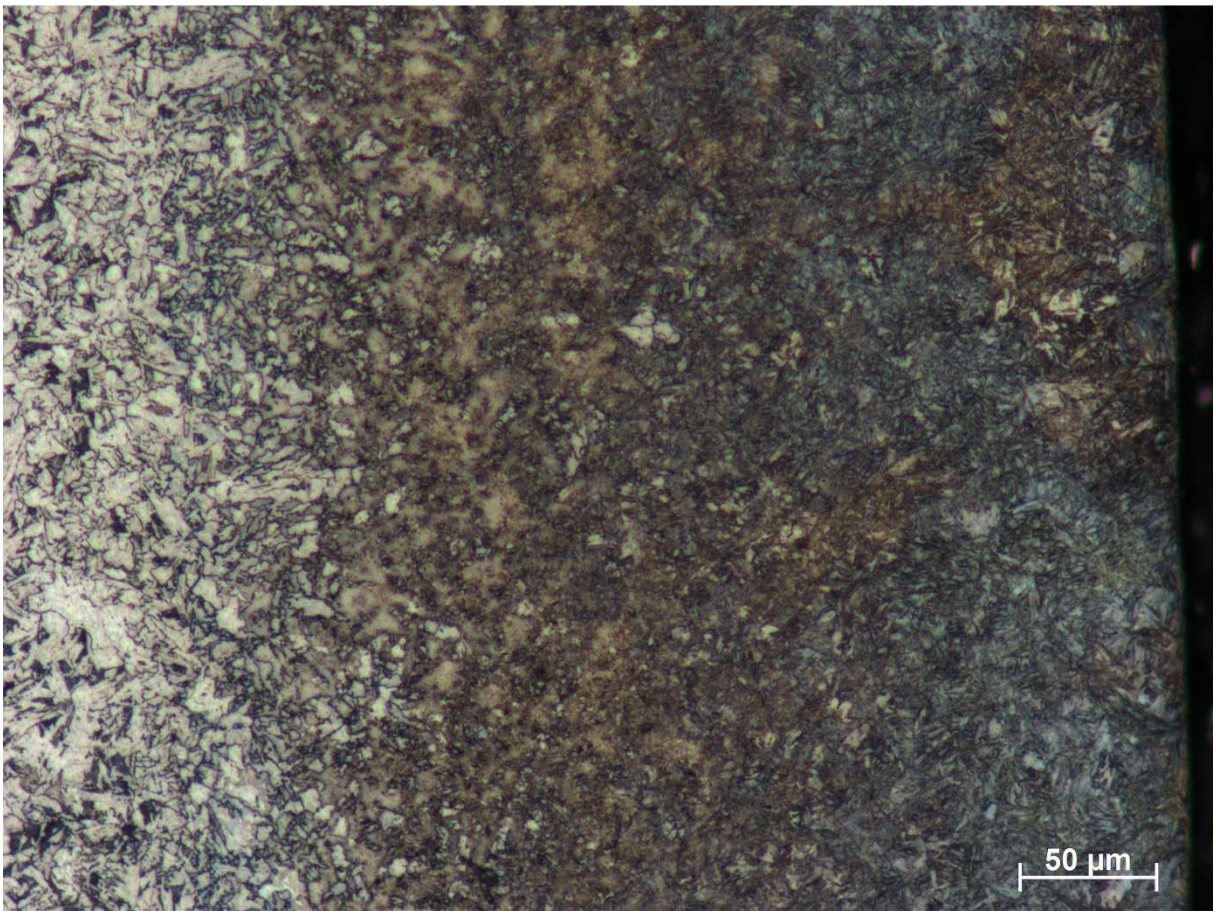
Snímky metalografických výbrusů vzorků



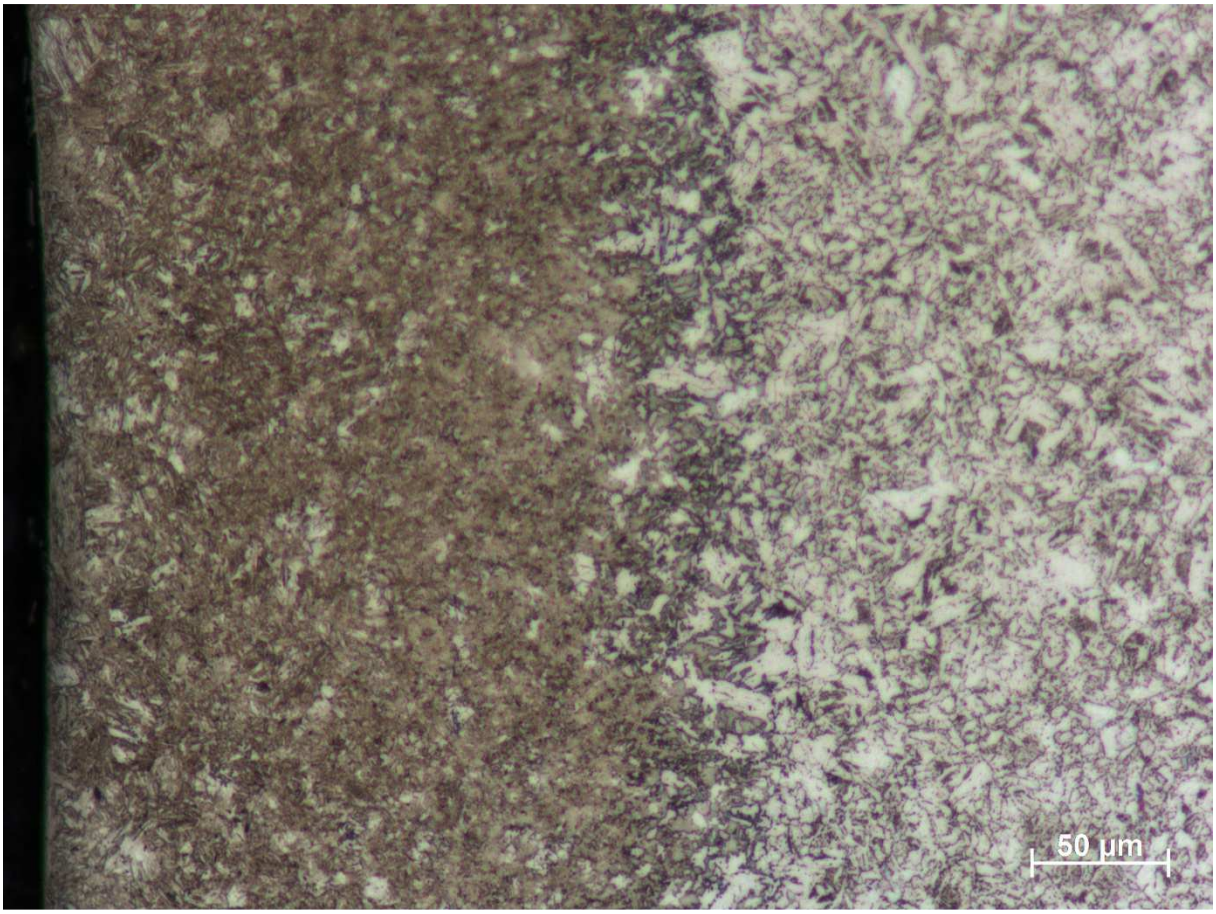
Obr. 1 Metalografický výbrus horní plochy vzorku L8 při zvětšení 200x



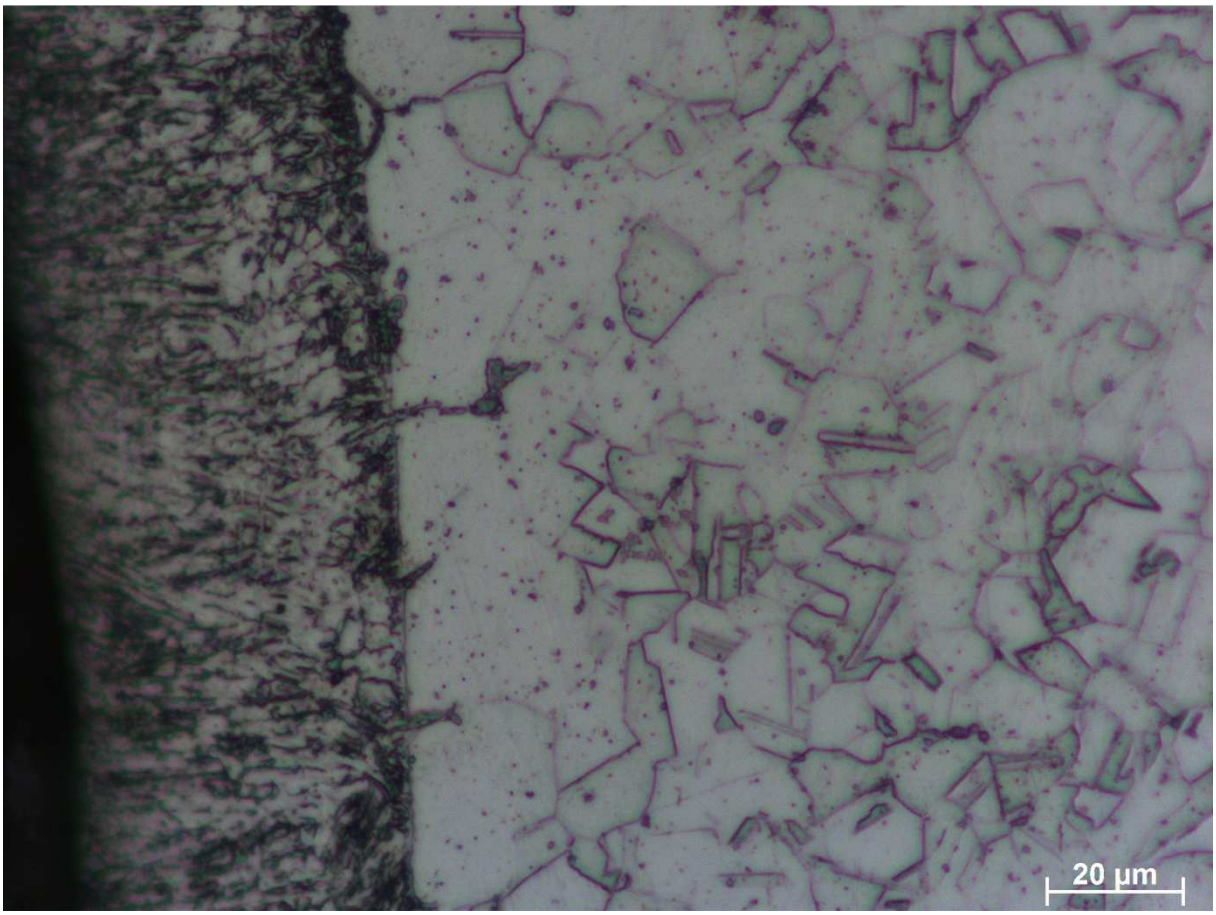
Obr. 2 Metalografický výbrus dolní plochy vzorku L8 při zvětšení 200x



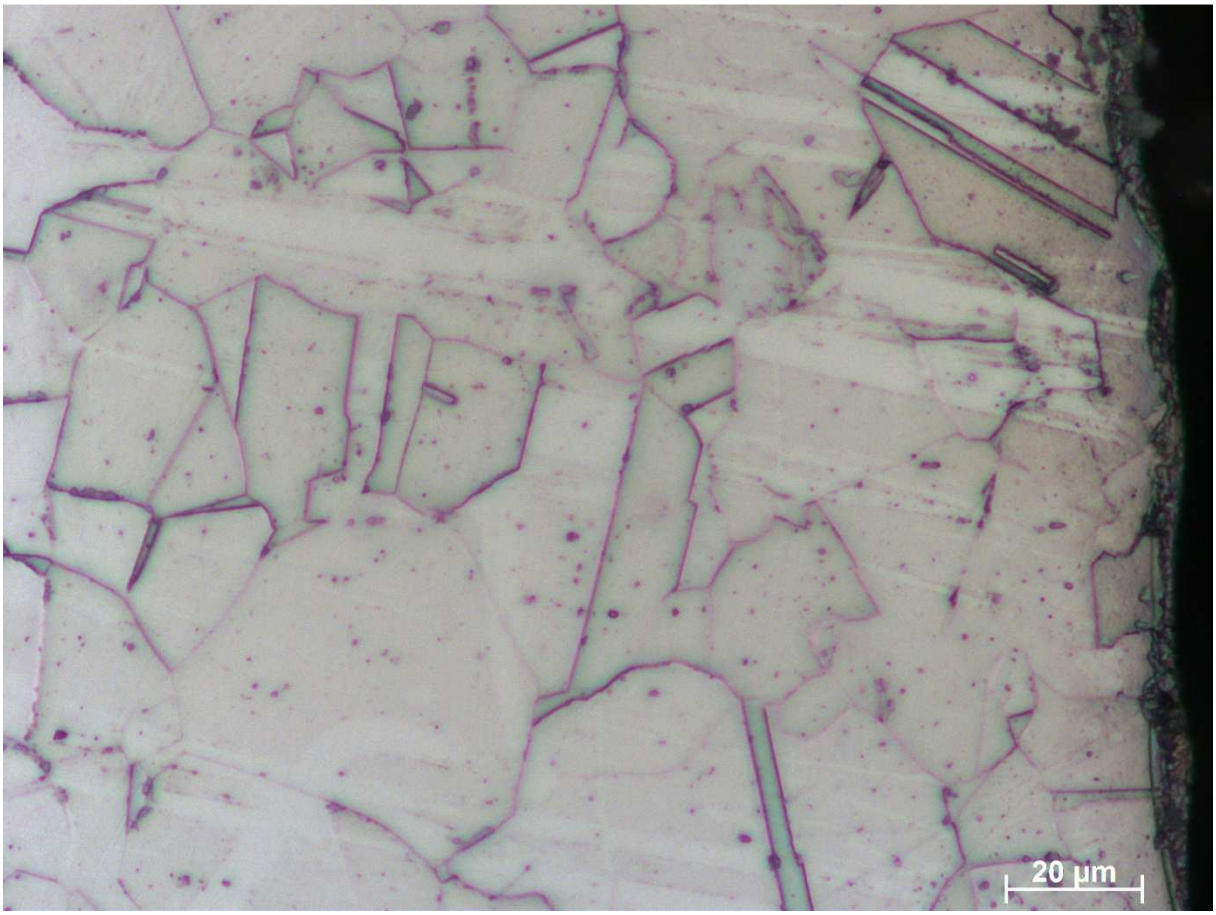
Obr. 3 Metalografický výbrus horní plochy vzorku P8 při zvětšení 200x



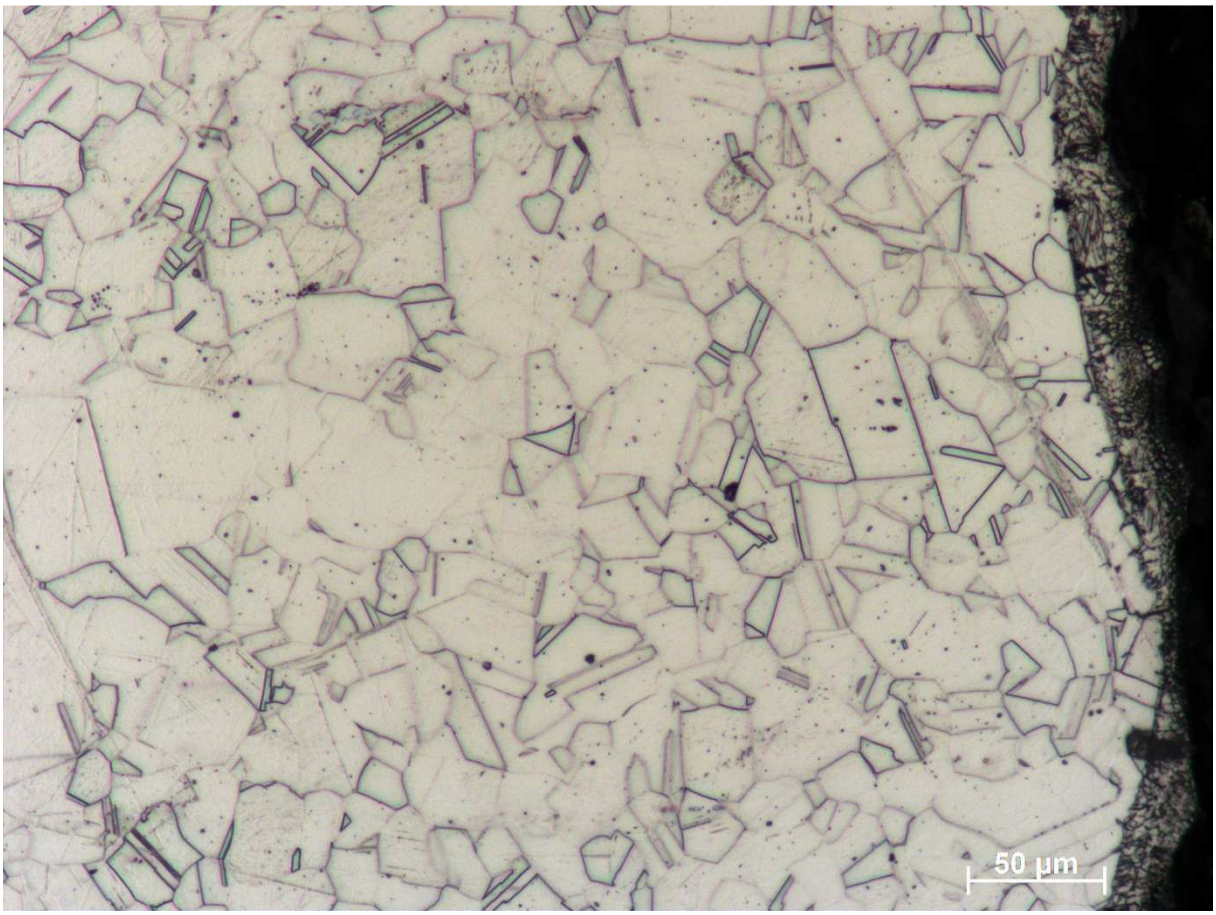
Obr. 4 Metalografický výbrus dolní plochy vzorku P8 při zvětšení 200x



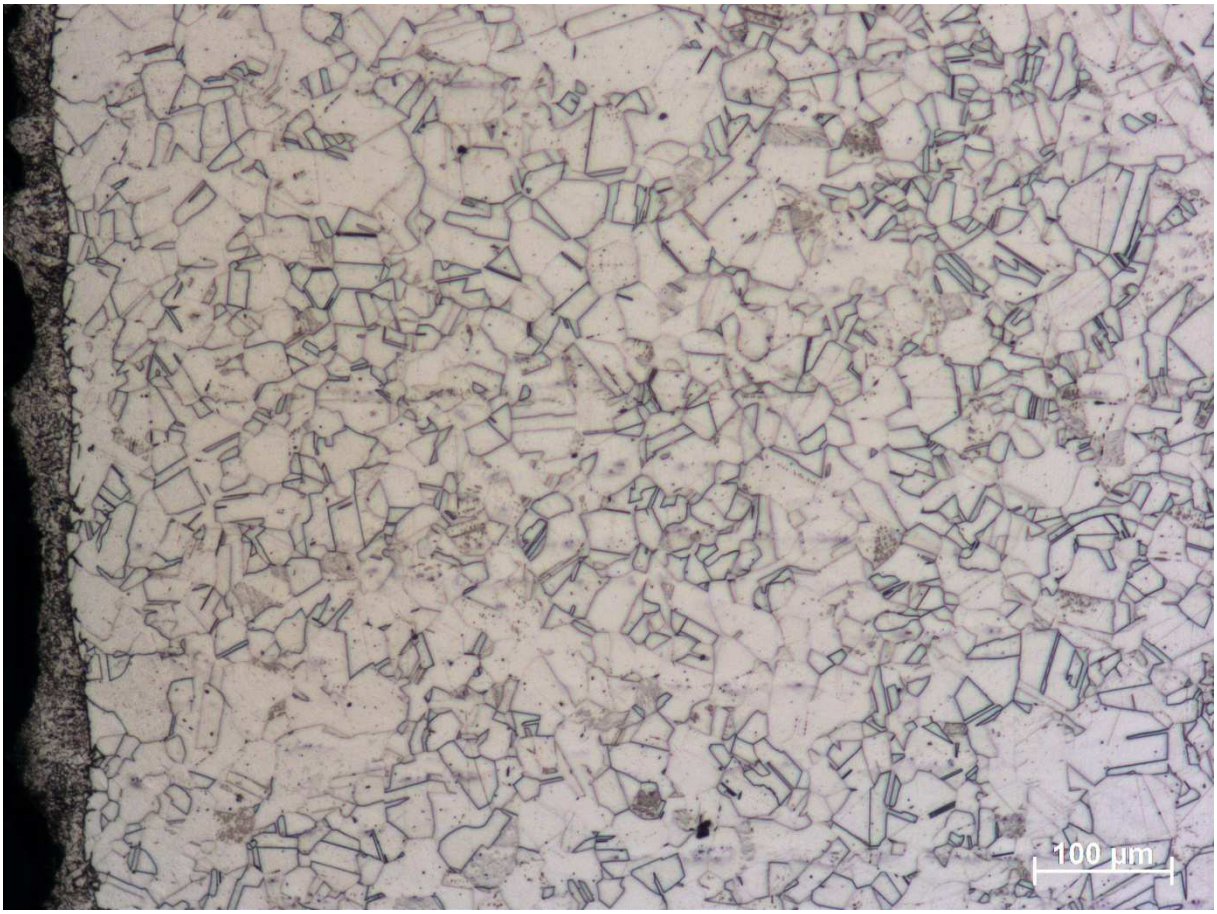
Obr. 5 Metalografický výbrus horní plochy vzorku NL8 při zvětšení 500x



Obr. 6 Metalografický výbrus dolní plochy vzorku NL8 při zvětšení 500x



Obr. 7 Metalografický výbrus horní plochy vzorku NP8 při zvětšení 200x



Obr. 8 Metalografický výbrus dolní plochy vzorku NP8 při zvětšení 100x