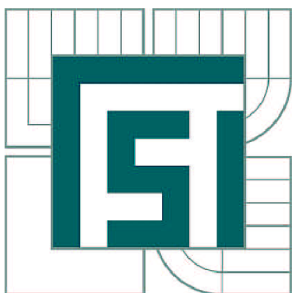


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

TECHNOLOGIE ŘEZÁNÍ PLAZMOVÝM PAPRSKEM

TECHNOLOGY PLASMA BEAM MACHINING

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. ONDŘEJ SEDLÁK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. KAREL OSIČKA, Ph.D.

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie
Akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Ondřej Sedlák

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie (2303T002)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Technologie řezání plazmovým paprskem

v anglickém jazyce:

Technology Plasma Beam Machining

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Rozbor nekonvenční metody řezání plazmovým paprskem z hlediska přesnosti obrábění a jakosti povrchu.

Cíle diplomové práce:

Úvod.

Rozbor technologických možností řezání plazmovým paprskem.

Vliv technologických parametrů na jakost povrchu a přesnost obrábění.

Vyhodnocení jakosti povrchu a přesnosti pro konkrétní součást.

Technicko-ekonomické vyhodnocení.

Závěr.

Seznam odborné literatury:

1. BARCAL, J. Nekonenční metody obrábění, Skriptum FSI ČVUT, Praha : Vydavatelství ČVUT, 1989.
2. KOČMAN, K. a PROKOP, J. Technologie obrábění. 1.vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2001. 270 s. ISBN 80-214-1996-2.
3. MAŇKOVÁ, I. Progresivní technologie, 1 vyd. Košice: Vienala, 2000. 275 s. ISBN 80-7099-430-4.
4. HÍREŠ, O., HATALA, M., HLOCH, S., Delenie kovových materiálův okružnou pílou, vodným prúdom a plazmovým oblúkom, 1. vyd. Jiří Pustina: Ostrava - Poruba 2007. ISBN 978-80-8073-769-6
5. OBERG, E., JONES, F.D., HORTON, H.L., RYFFEL, H.H. Machinery's hand-book. 25th Edition. New York: Industrial Press Inc., 1996. 2547 s. ISBN 0-8311-2595-0.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Karel Osička, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/2011.

V Brně, dne 19.11.2010

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá nekonvenční metodou dělení kovů, konkrétně technologií řezání plazmovým paprskem. V úvodu práce je zpracována literární studie sledující danou problematiku z teoretického hlediska. Jádrem práce tvoří praktická část, která se věnuje výrobě vzorků na plazmovém pálicím stroji Hypertherm HPR 260. Na vypálených vzorcích je sledována a vyhodnocována jakost povrchu a rozměrová přesnost pro každou vyrobenou součást. Posledním bodem práce je technicko-ekonomické vyhodnocení pálených součástí. Závěrem je provedeno zhodnocení dosažených výsledků.

Klíčová slova

Plazma, plazmový paprsek, dělení kovů, jakost povrchu, rozměrová přesnost, technicko-ekonomické vyhodnocení.

ABSTRACT

This diploma thesis focuses on the unconventional method of metal separation, namely on the cutting technology based on the plasma arc. The introductory part deals with studies which focus on the given issue from a theoretical point of view. The core of the work rests in the practical part which is dedicated to the production of samples using a plasma burning machine called Hypertherm HPR 260. The burned samples are monitored and assessed for the surface quality and dimensional accuracy for every created part. The final part of the work is dedicated to the techno-economic assessment of the burned parts. In the end, the evaluation of the attained results is made.

Key words

Plasma, plasma arc, metal separation, surface quality, dimensional accuracy, techno-economic assessment

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SEDLÁK, O. *Technologie řezání plazmovým paprskem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 68 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Karel Osička, Ph.D..

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma *Technologie řezání plazmovým paprskem* vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

.....
Ondřej Sedlák

Poděkování

Děkuji tímto Ing. Karlu Osičkovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce.

Dále bych chtěl poděkovat firmě Alweco s.r.o. se sídlem v Senetářově. Konkrétně Lubomíru Strakovi, za možnost vyhotovení vzorků a rady při vytváření diplomové práce. V neposlední řadě patří také poděkování i obsluze pálicího stroje, a to Michalovi Šenkovi a Stanislavu Muchovi za výrobu vzorků a praktické ukázky dělení.

OBSAH

Abstrakt	4
Abstract	4
Prohlášení.....	5
Poděkování.....	6
Obsah	7
Úvod	9
1 Rozbor technických možností řezání plazmovým paprskem	10
1.1 Vznik plazmy	10
1.2 Princip dělení materiálu plazmou	10
1.3 Zařízení pro dělení materiálu plazmou	11
1.3.1 Ruční zařízení	11
1.3.2 Strojní automatizované zařízení	12
1.4 Druhy plazmového oblouku	13
1.4.1 Transferovaný plazmový oblouk	13
1.4.2 Netransferovaný plazmový oblouk	13
1.5 Plyny používané pro řezání plazmou.....	14
1.6 Plazmové hořáky.....	15
1.6.1 Chlazení hořáků	16
1.6.2 Stabilizace paprsku.....	16
1.7 Vývoj dělení plazmovým paprskem	17
1.8 Metody dělení materiálu plazmovým obloukem.....	17
1.8.1 Konvenční dělení.....	17
1.8.2 Dvojplynové dělení – “Dual flow“	18
1.8.3 Dělení s vodní clonou	18
1.8.4 Dělení se vstřikováním vody.....	18
1.8.5 Dělení pod vodou	19
1.8.6 Vysoce přesné dělení Hy-Definition	19
1.9 Řezací fáze	20
1.10 Druhy děleného materiálu	21
1.11 Použití plazmy pro další technologie výroby	21
1.12 Bezpečnost a životní prostředí	21
2 Vliv technologických parametrů na jakost povrchu a přesnost obrábění	23
2.1 Zavedené pojmy pro výpalek	23
2.2 Základní technologické parametry	24
2.2.1 Směr dělení materiálu	24
2.2.2 Rychlost dělení materiálu.....	24
2.2.3 Nastavení proudu a napětí	25
2.2.4 Opotřebením spotřebních dílů.....	25
2.2.5 Průměr trysky a paprsku	26
2.2.6 Vzdálenost hořáku a materiálu	26
2.3 Sledované parametry a jejich vyrobiteľnosť	27
2.3.1 Reliéf dělené plochy.....	27
2.3.2 Úhel dělených hran a tepelně ovlivněná oblast (TOO)	28
2.3.3 Vyrobiteľnosť výpalku.....	28
2.3.4 Efektivita strojního dělení plechů.....	29
2.4 Vady při dělení materiálu	30

2.4.1 Vady na řezné ploše	30
2.4.2 Vady na řezných hranách	32
3 Vyhodnocení jakosti povrchu a přesnosti pro konkrétní součást.....	35
3.1 Cíle experimentu	35
3.2 Návrh součástí	35
3.3 Volba materiálu	36
3.4 Specifika plazmového dělicího centra	36
3.5 Průběh experimentu	39
3.5.1 Parametry řezání pro jednotlivé součásti	40
3.6 Vyhodnocení součástí	45
3.6.1 Vyhodnocení součástí podle normy ČSN EN ISO 9013.....	46
3.7 Shrnutí	54
4 Technicko-ekonomické vyhodnocení	56
4.1 Investiční a provozní náklady.....	56
4.2 Stanovení ceny	57
4.2.1 Cena výroby součástí	58
4.3 Shrnutí	62
Závěr	63
Seznam použitých zdrojů.....	64
Seznam použitých zkratk a symbolů.....	66
Seznam příloh	68

ÚVOD

Obrábění plazmovým paprskem patří do nekonvenčních, jinak řečeno progresivních, metod obrábění. Do těchto technologií se zahrnují takřka všechny metody, které vznikaly po roce 1940, až do dnešní doby. Progresivní technologie používají pro úběr materiálu buď energie známé v jiné podobě, nebo nové energie, které se dříve pro obrábění nepoužívaly. Je možno uvést například tyto energie: mechanická, elektrická, chemická, elektrochemická, tepelná, elektrotepelná a další. Tyto energie jsou soustředěny do jednoho místa – bodového, plošného či objemového, kde se provádí úběr materiálu.

Hlavními představiteli progresivních metod dělení materiálu, jsou technologie řezání pomocí plazmového paprsku, vodního paprsku, laserového paprsku, svazkem elektronů a další. Podle procesu obrábění, je možné zmiňované metody rozdělit na elektrotepelné (elektronový, laserový, plazmový paprsek), mechanické (vodní a abrazivní paprsek) a elektrochemické. V roce 1989 pojmenoval Taniguchi procesy, které pracují s paprskem o vysoké energetické hladině, jako energeticko-paprskové. Tyto energetické paprsky jsou tvořeny velmi malými částicemi, a to volnými elektrony, ionty a fotony.

Jako první zavedl pojem plazma vědec Irwing Langmuir na začátku 20. století. Plazma je tvořena z elementárních částic, a to kladně nabitých iontů a volných elektronů. V nynější době je považována za čtvrté skupenství hmoty o vysoké tepelné energii. Vznik plazmy je zapříčiněn ionizací a disociací plynu při teplotě dosahující 20 000°C. Plazma je elektricky a magneticky vodivá. Navenek se chová elektro-neutrálně z důvodu vyrovnaného počtu kladně a záporně nabitých částic. Nejčastější výskyt plazmy na zemi je ve formě blesků. Ve vesmíru se plazma objevuje v mnoha podobách.

Energii pro obrábění ve formě plazmového oblouku začali jako první zkoumat vědci Gerdien a Lotz v roce 1922. Plazmový oblouk je v atmosféře značně nestabilní a proto ho stabilizovali pomocí vodní stěny. V roce 1955 byl poprvé plazmový paprsek použit na dělení materiálu, jako náhrada řezání kyslíkovým plamenem. Nejdříve se plazma používala pro speciální účely armádního a kosmického průmyslu na dělení těžko obrobitelných materiálů. Za posledních 15 roků se dělení materiálu pomocí plazmového paprsku stalo dostupným takřka každé průmyslové firmě, která dělí jak kovový, tak i nekovový materiál. Z tohoto důvodu je plazmové řezání velice rozšířené.

Celosvětově se tato progresivní technologie dělení materiálu začala označovat zkratkou PBM, podle anglického názvu Plasma Beam Machining. Označení PBM se používá při dělení vodivého i nevodivého materiálu. Při dělení pouze vodivého materiálu je používána zkratka PAM, z anglického názvu Plasma Arc Machining [1], [2].

Mezi hlavní cíle práce se řadí vypracování literární studie dané problematiky. Dále podle této studie bude provedeno vyhodnocení jakosti povrchu a přesnosti vyrobených součástí. Pro každý vzorek bude zpracováno technicko-ekonomické vyhodnocení. Závěrem bude provedeno zhodnocení dosažených výsledků práce, jak z ekonomického, tak i z technologického hlediska.

1 ROZBOR TECHNICKÝCH MOŽNOSTÍ ŘEZÁNÍ PLAZMOVÝM PAPERSEM

Technické možnosti řezání plazmovým paprskem jsou velice rozsáhlé. Nejčastější použití paprsku je v technické praxi při dělení kovových i nekovových materiálů.

1.1 Vznik plazmy

Plazma je stav hmoty odborně nazývaná jako ionizovaný plyn, který obsahuje částice záporně nabitých elektronů a kladně nabitých iontů. Koncentrace těchto dvou elementů v plazmě je velmi vysoká a jejich objemová hustota je stejná. Plazma může vzniknout několika způsoby. Jeden ze způsobů vzniku plazmy je ohřátí plynu na vysokou teplotu. Druhý způsob, který se používá v technické praxi, je vznik plazmy pomocí elektrického výboje mezi anodou a katodou. To znamená, že elektrická energie se mění v tepelnou.

Při tomto vzniku plazmy, je plyn jen částečně ionizovaný a dosahuje teploty maximálně 20 000K, v závislosti na druhu ionizovaného plynu. Teplota úplně ionizovaného plynu dosahuje až 100 000K, ovšem ta je v běžné praxi nedosažitelná.

Jelikož plazma obsahuje oproti plynům volné částice, je elektricky a magneticky vodivá a schopna vytvářet elektrické a magnetické pole. Efekt vytváření polí zapříčiňuje jev zvaný kvazi-neutralita. Tento jev vzniká v důsledku stejné objemové hustoty iontů a elektronů. Jak už bylo zmíněno, za klidného stavu plazma vystupuje jako neutrální ionizovaný plyn.

Důležitým faktorem, který ovlivňuje dělení materiálu je stabilizace plazmy, jelikož se vyskytuje v nestabilní podobě. Název stabilizace znamená udržet plazmu v tenkém válcovém paprsku po dobu nezbytně nutnou k rozdělení materiálu. Plazmu je možno stabilizovat dvěma základními a ověřenými postupy. V historii se nejdříve plazma stabilizovala pomocí vody a poté pomocí plynu [1], [2], [3].

1.2 Princip dělení materiálu plazmou

Dělení materiálu úzkým plazmovým paprskem pracuje na tepelném a dynamickém účinku plazmy. Plazmový paprsek vzniká pomocí elektrické energie a plazmového plynu mezi neodtavující se katodou a řezaným materiálem. Katoda je umístěna v dělicím hořáku a bývá vyrobena z wolframu, hafnia a dalších materiálů. Řezaný materiál je napojen na kladný pól a vytváří tak anodu. Paprsek vystupující z hořáku má velkou hustotu energie. Hustota je udávána $10^8 - 10^9 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Tato hustota energie je měřena na makroskopické úrovni a je měřena jako střední hodnota dopadajícího paprsku na plochu obrobku.

Důsledkem působení paprsku se obráběný materiál taví, sublimuje, odpařuje a rozstříkává. Dynamickým účinkem plazmového plynu je roztavený materiál z místa řezu odfukován ve formě tekutého kovu, a tak vzniká řezná mezera (obr. 1). Plazmový paprsek je stabilizován a chráněn před okolní atmosférou pomocí ochranného plynu nebo vody [1].



Obr. 1 Plazmové řezání [8]

1.3 Zařízení pro dělení materiálu plazmou

Stroje, pro dělení materiálu plazmovým paprskem, lze rozdělit na ruční a strojní zařízení.

1.3.1 Ruční zařízení

Ruční zařízení pro dělení materiálu je konstruováno jako přenosné. Skládá se ze dvou částí, samotného zařízení (zdroj energie) a řezacího hořáku. Hořáky jsou zpravidla výměnné. Po výměně ručního hořáku za strojní a po upevnění do konzoly řezacího stolu, lze ruční zařízení použít mechanizovaně. Ruční zařízení se používá zejména pro dělení menších tloušťek materiálů. Pro konstrukční ocel se maximální řezaná tloušťka pohybuje mezi 20 – 30 mm v závislosti na druhu zařízení a kvalitě řezu. Příklad ručního zařízení od firmy Hypertherm je uveden na obrázku 2. Obrázek je doplněn o oba zmiňované typy hořáků [3].



Obr. 2 Ruční řezací zařízení Powermax 85 s hořáky [3]

1.3.2 Strojní automatizované zařízení

Strojní zařízení se skládá z těchto základních částí:

- zdroje energie,
- řídicí jednotky,
- řezacího stolu včetně pohyblivého suportu,
- řezacího hořáku,
- kompresoru,
- filtračního zařízení,
- směšovací jednotky.

Řezací hořák je připevněn na suport, který se pohybuje po řezacím stole. Řezací stůl je propojen s filtračním zařízením, které odsává dýmy vzniklé při řezání materiálu. Pohyb hořáku zabezpečuje řídicí jednotka, vybavena NC nebo CNC řízením. Hořák je propojen kabely ke zdroji elektrické energie. Dále je propojen se směšovací jednotkou. Do směšovací jednotky jsou dodávány plyny z tlakových lahví. Jediný plyn nedodávaný z lahví je vzduch. Vzduch je nasávaný z atmosféry přes čistící jednotku, kompresorem stlačován a dodáván ke směšovací jednotce. Oproti ručnímu řezání je strojové mnohokrát výkonnější. Pro větší produktivitu práce se vyrábějí pracovní stoly, které jsou osazeny 2 i 3 řezacími hořáky. Takto osazené stoly se používají pro sériovou výrobu součástí. Zařízení se v největší míře používají pro dělení tabulového plechu. Specializace mechanizované plazmy nekončí u dělení plechů, ale lze ji využít pro 3D dělení profilů, svařování a nanášení povlaků. Strojní zařízení je schopno rozdělit konstrukční ocel o tloušťce materiálu až 180 mm. Jako příklad dělicího zařízení je uveden pálicí stůl od firmy Vanad 2000 a.s. řady Kompakt (obr. 3). Stůl je dodáván včetně všech komponentů. Je vyráběn univerzální a proto je na něj možno přimontovat i další technologie výroby, a to kyslíkové řezání, plazmové a mikroúderové značení, speciální navrtávací a frézovací hlavy [2], [4].



Obr. 3 Plazmový stůl [9]

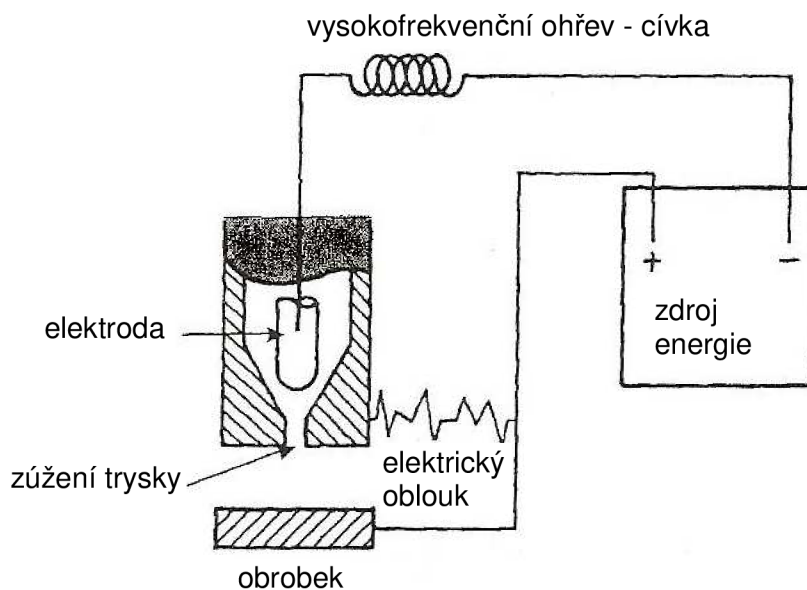
1.4 Druhy plazmového oblouku

Na utváření geometricky přesného paprsku, který je technologicky v praxi použitelný pro dělení materiálu, má největší vliv několik aspektů.

Plazmový paprsek po vzniku prochází přes výstupní trysku, která mu utváří jeho tenký průřez. Aby po výstupu z trysky udržel paprsek požadovaný tvar, je stabilizován ochranným plynem nebo kapalinou. Rychlost výletu paprsku dosahuje $1500 - 2500 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Mezi parametry řídicí kvalitu paprsku patří: druh plazmového a stabilizačního plynu, velikost proudu a napětí, stupeň ionizace, průměr trysky, hustota energie paprsku, kvalita elektrického oblouku, vzdálenost hořáku a materiálu [1].

1.4.1 Transferovaný plazmový oblouk

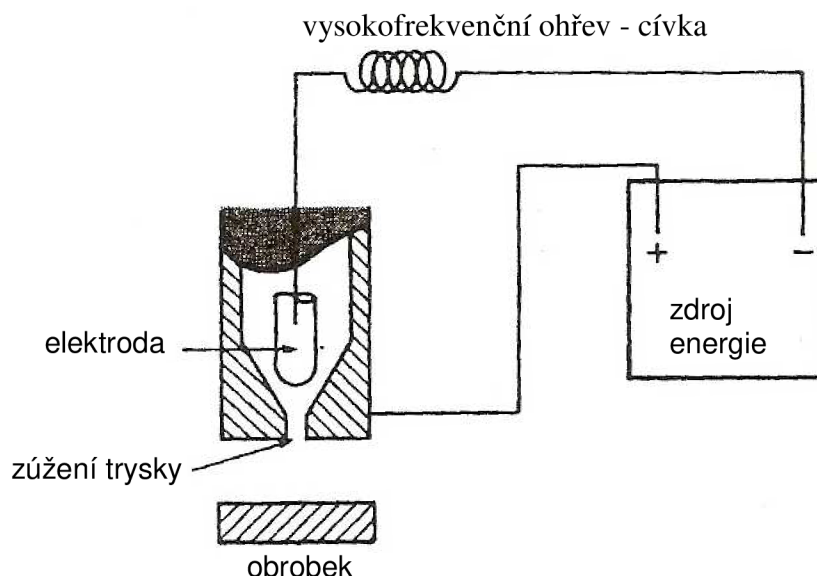
Při tomto způsobu zapojení (obr. 3a), vzniká plazmový oblouk mezi elektrodou a řezaným materiálem. Tímto typem oblouku lze řezat všechny vodivé materiály a je označován PAM. Tento druh se používá například pro dělení oceli, hliníku a dalších pouze kovových materiálů. Tento způsob hoření oblouku je při řezání produktivnější oproti netransferovanému oblouku [1].



Obr. 3a Schéma zapojení transferovaného plazmového oblouku [1]

1.4.2 Netransferovaný plazmový oblouk

Při druhém způsobu řezání (obr. 3b), vzniká plazmový oblouk mezi výstupní tryskou a wolframovou elektrodou. Tryska je nejčastěji vyráběna z mědi. Tímto typem oblouku lze řezat všechny materiály, jak vodivé, tak i nevodivé. Je označován PBM, jeho použití je v malé míře pro dělení keramiky a plastů. Nevýhoda zapojení tohoto oblouku, je v brzkém opotřebení výstupní trysky. Paprsek je lépe zaostřený, i když používaná vzdálenost je větší jak při transferovaném oblouku [1].



Obr. 3b Schéma zapojení netransferovaného plazmového oblouku [1]

Oba tyto typy plazmového oblouku jsou v praxi používány současně. Pro zapálení oblouku se používá netransferovaný (tzv. pilotní oblouk). Pro řezání se používá transferovaný (tzv. řezací oblouk). Tento způsob je nazýván jako kombinovaný plazmový oblouk (obr. 3a). Jeho použití pramení z hospodárnosti při opotřebení výměnných komponent plazmového hořáku [1].

1.5 Plyny používané pro řezání plazmou

Nejčastější rozdělení plynů používaných při plazmovém dělení materiálu je podle jejich použití:

- **Plazmový plyn** protéká přes plynovou konzolu, která řídí jeho průtok do hořáku. V hořáku je pomocí oscilátoru za vysoké teploty ionizován, kde z něj vzniká plazmový paprsek. Hlavní používané plyny jsou filtrovaný vzduch, jednoatomový argon Ar, helium He, dvouatomový kyslík O₂, dusík N₂, oxid uhličitý CO₂ a směsi Ar a N₂, (H5, H35), N₂ a H₂ (F5).
- **Ochranný plyn** chrání obráběný materiál a paprsek plazmy před okolní atmosférou. Používané plyny jsou filtrovaný vzduch, dusík N₂, argon Ar, směsi O₂ a N₂, H5, H35 a F5.
- **Fokusační plyn** se pro dělení materiálu používá jen zřídka. Jeho užití je především při svařování plazmou, kde zajišťuje přesné zaostření a tenkost paprsku. Nejvíce používané plyn jsou argon Ar, směsi Ar a H₂, Ar a N₂.

Každý plazmový plyn se liší potenciálem energie. Tepelná energie při vzniku plazmy se vytváří dvěma pochody: ionizací - což je rozpad atomů na částice (ionty a elektrony) a disociací - což je rozpad molekul na atomy. U argonu, helia a dalších jednoatomových plynů vzniká energie pouze ionizací. Ionizační energie je 2 – 4 násobná oproti disociační. Z důvodu rozdílného potenciálu energie je i teplota různých druhů paprsků odlišná.

Příklad plazmových teplot paprsků:

- dusíková plazma N_2 – 7 000 K,
- vodíková plazma H_2 – 8 000 K,
- argonová plazma Ar – 15 000 K,
- heliová plazma He – 20 000 K,
- plazma stabilizovaná vodou – až 35 000 K.

Použití plynů se dále liší podle řezaného materiálu, používaného plazmového zdroje a hořáků. Všeobecně používané plyny pro určitý druh materiálu jsou uvedeny v tabulce 1 [1], [2], [5], [7], [14].

Tab. 1 Přiřazení plynů k dělenému materiálu [1], [2], [5], [7]

Dělený materiál	Plazmový plyn	Ochranný plyn
Konstrukční ocel	O_2 Ar N_2	Vzduch O_2 $O_2 + N_2$ $O_2 + H_2$
Nerezavějící a vysoce legovaná ocel	N_2 Ar + H_2	N_2 Ar O_2
Neželezné kovy	Vzduch N_2 O_2 Ar + H_2	Vzduch N_2 $O_2 + N_2$
Kompozitní materiály	Vzduch O_2 Ar + N_2 Ar + H_2	$O_2 + N_2$ $O_2 + H_2$

1.6 Plazmové hořáky

Hořáky je možno rozdělit a klasifikovat podle:

- chlazení (přímé a nepřímé),
- druhu chlazení (kapalinové, plynové),
- druhu plazmového plynu (oxidační, neoxidační),
- použití (ruční a strojní),
- druhu stabilizace,
- druhu elektrody (wolframová, lanthanová, háfniová a thoriová),
- velikosti výkonu,
- průměru výstupní trysky.

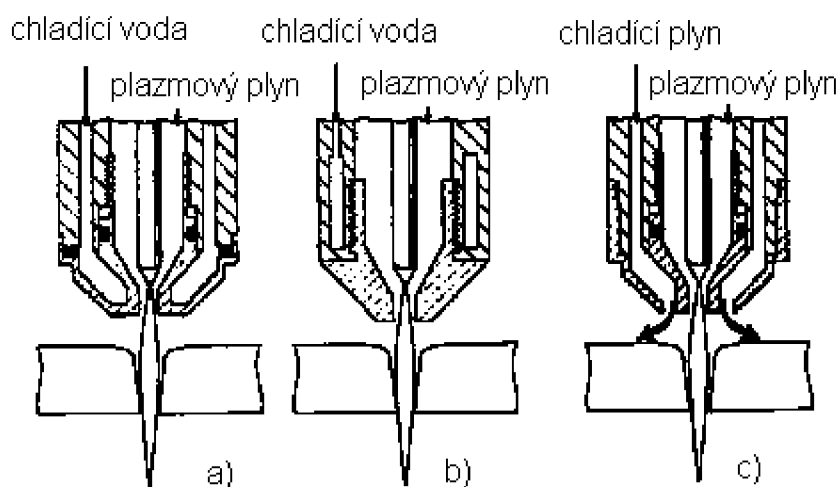
Komponenty hořáku se vyrábí výměnně, z důvodu omezené životnosti. Nejmenší životnost má výstupní tryska a elektroda. Jejich největší opotřebení vzniká při zapalování oblouku. Na obrázku 4 jsou vidět součásti moderního strojního hořáku. U konstrukce ručního hořáku se nepoužívá zadržovací víčko [2], [3].



Obr. 4 Součásti hořáku [3]

1.6.1 Chlazení hořáků

Při řezání vzniká extrémně vysoká teplota. Následkem vysoké teploty jsou součásti hořáku tepelně namáhány. Z tohoto důvodu je nevyhnutelné jeho chlazení. Hořáky jsou chlazené kapalinou nebo proudem plynu. Médium pro chlazení kapalinou je nejčastěji voda, která je do hořáku přiváděna čerpadlem pod stanoveným tlakem. Při chlazení plynem se používá stlačený vzduch dopravovaný do hořáku kompresorem. Chladící médium cirkuluje v hořáku ve vyrobených kanálcích, a tím ho chladí. Konstrukce hořáku jsou znázorněny na obrázku 5 [1], [2].



Obr. 5 Plazmové hořáky s rozdílným chlazením a) přímé chlazení vodou, b) nepřímé chlazení vodou, c) chlazení plynem [1]

1.6.2 Stabilizace paprsku

Jak už bylo zmíněno, stabilizace plazmy se používá z důvodu zaostření paprsku. Stabilizace je prováděna ochranným plynem nebo vodou. Plyn i voda jsou dodávány přes hořák k paprsku a chrání ho po dobu řezání materiálu. Přiváděná voda vytváří tzv. vodní clonu. V nemalé míře stabilizační media přispívají k chlazení hořáku i děleného materiálu. Speciální typ řezání je pod vodou, kde je stabilizace prováděna samotnou kapalinou. Pokud je stabilizace prováděna kapalinou, je plazmový paprsek schopen zvýšit výkon i kvalitu řezu a zmenšit tepelně ovlivněnou oblast materiálu. Stabilizace pomocí plynu je znázorněna na obrázku 7 a stabilizace vodou na obrázcích 8, 9 [2].

1.7 Vývoj dělení plazmovým paprskem

Historie dělení plazmovým paprskem se začala průmyslově vyvíjet od 60. let 20. století. Vývoj této nekonvenční metody uvádí O. Híreš, M. Hatala a S. Hloch [2].

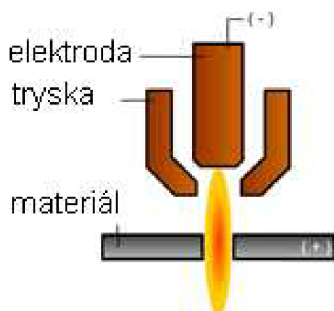
- 1957 – Konvenční dělení plazmovým obloukem.
- 1962 – “Dual flow“ dělení plazmovým obloukem.
- 1963 – Vzduchové dělení plazmovým obloukem.
- 1968 – Dělení plazmovým obloukem se vstřikováním vody.
- 1972 – Dělení plazmovým obloukem s vodní clonou.
- 1977 – Dělení plazmovým obloukem pod vodou.
- 1980 – Nízkoproudové vzduchové dělení plazmovým obloukem.
- 1983 – Kyslíkové dělení plazmovým obloukem.
- 1990 – “Hy-Definition“ dělení plazmovým obloukem.

1.8 Metody dělení materiálu plazmovým obloukem

Při dělení materiálu plazmovým paprskem je rozeznáváno několik druhů dělení, které se postupně vyvíjely. Nejstarší metoda dělení je konvenční. Dále následují metody: dvojplynové dělení “Dual flow“, dělení s vodní clonou, dělení se vstřikováním vody, dělení pod vodou a nejnovější metoda Hy-Definition [2].

1.8.1 Konvenční dělení

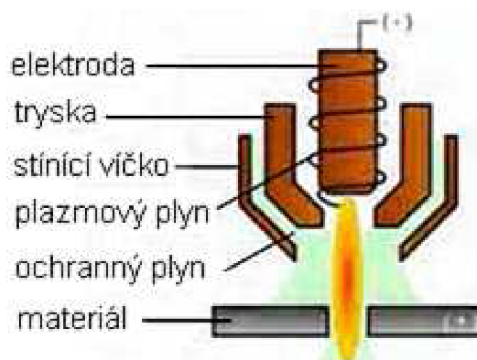
U tohoto způsobu dělení se používá pouze plazmový plyn bez ochranného media. Nejčastější užití konvenční metody je při ručním dělení materiálu. Plyn, ze kterého vzniká plazma, je stlačený vzduch. Maximální tloušťka děleného materiálu je 16 mm, při nastaveném proudu 100 A. Kvalita řezu oproti dalším metodám je nejnižší a tento způsob nejméně výkonný. Princip dělení je vyobrazen na obrázku 6 [2], [3].



Obr. 6 Konvenční dělení [3]

1.8.2 Dvojplynové dělení – “Dual flow“

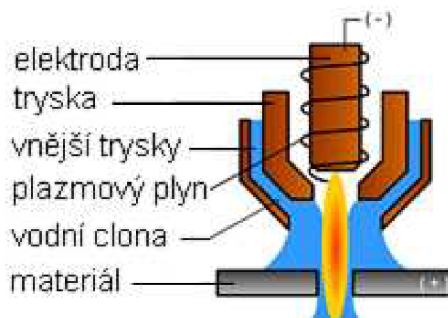
U této varianty dělení materiálu jsou použity dva plyny, proto je nazývána dvojplynová “Dual flow“ (obr. 7). První plyn je použit jako plazmový (vzduch, kyslík, dusík), druhý jako ochranný (kyslík, dusík, argon). Maximální dosahované výkony a tloušťky řezaného materiálu jsou oproti konvenční metodě desetkrát vyšší. Dvojplynový způsob dělení je v praxi nejvíce rozšířen pro jeho kvalitní a čistý řez bez okují [2], [3].



Obr. 7 Dvojplynové dělení [3]

1.8.3 Dělení s vodní clonou

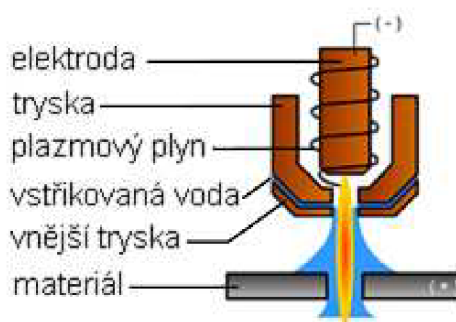
Tato varianta je obdobou dvojplynového dělení. Rozdíl je pouze v ochraně plazmového paprsku. Paprsek je chráněn tzv. vodní clonou (obr. 8). Clona zabraňuje přístupu okolní atmosféry k paprsku. Varianta je používána pouze pro mechanizovanou výrobu, nejčastěji pro dělení nerezavějících ocelí a hliníku. Obrobený povrch je přesný a kvalitní [2], [3].



Obr. 8 Dělení s vodní clonou (3)

1.8.4 Dělení se vstřikováním vody

Při této variantě dělení materiálu je využíván pouze jeden plyn a to plazmový. Ochrana paprsku a materiálu je zabezpečena pomocí vody, která je úzkými kanálky vstřikována do proudu paprsku při jeho výstupu z hořáku. Vstříknutím vody do paprsku se jí malá část odpaří (10%) a zbytek tvoří ochrannou clonu (90%). Voda vstříknutá do paprsku plazmy má za následek zvýšení hustoty energie paprsku a zmenšení jeho průřezu. Obrobený povrch je velmi hladký. Používané hodnoty plazmového proudu jsou v rozsahu 260 až 750 A. Tloušťka děleného materiálu pro konstrukční ocel dosahuje 150 mm. Metoda je uvedena na obrázku 9 [2], [3].



Obr. 9 Dělení se vstříkváním vody [3]

1.8.5 Dělení pod vodou

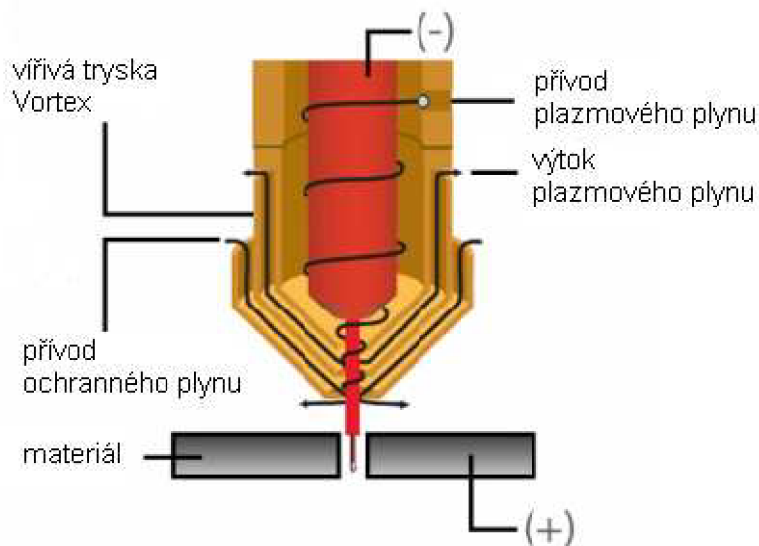
Při dělení touto metodou se používá pouze plazmový plyn. Ochranu tvoří kapalina. Vodní lázeň zabraňuje vzniku škodlivých dýmů, a částečně tlumí nebezpečné UV záření a vznikající hluk. Spotřební součásti hořáku mají vyšší životnost díky intenzivnímu chlazení. Zároveň tepelně ovlivněná oblast řezaného materiálu je velmi malá. Hloubka ponoření hořáku je od 50 do 100 mm. Metoda je pokládána za nejvíce ekologickou [1].

1.8.6 Vysoce přesné dělení Hy-Definition

Metoda byla vyvinuta a patentována společností Hypertherm, která patří mezi přední světové společnosti zabývající se plazmovým dělením materiálu. Hlavní odlišnosti této metody jsou v konstrukci hořáku, řízení elektrického oblouku a průtoku plynu. Hořák je vybaven speciální vysokorychlostní vířivou tryskou Vortex, jak ukazuje obrázek 10. Tryska vytváří velký vír plynu okolo elektrody, který má pozitivní vliv na vznik přesného plazmového oblouku v požadovaném místě. Z důvodu zapálení oblouku v teoreticky potřebném místě, vzniká minimální opotřebením trysky a elektrody. Do měděné elektrody je připájena hafniová špička. Při zapálení plazmového oblouku se část špičky roztaví a při jeho zhasnutí vyletí společně s paprskem ven. Tento nežádoucí proces je u metody Hy-Definition ošetřen pomocí mikroprocesorového zařízení. Mikroprocesor řídí nastavení proudu a průtok plynu při zapálení, průběhu a zhasnutí oblouku. Dále eliminuje vzniklé teplotní šoky. Stabilizuje špičku trysky při přechodu z roztaveného na tuhý kov a to bez výletu části roztavené trysky. Při užití těchto inovací lze dosáhnout stabilního plazmového paprsku s minimálním opotřebením spotřebních dílů hořáku.

Jak je vidět na obrázku 10, vysokorychlostní tryska je chráněna keramickou izolací. Díky izolaci je při řezání možný dotyk s materiálem, aniž by zanikl oblouk. Tato výhoda je značně uplatňována při ručním řezání. Metoda Hy-Definition umožňuje 600 – 1200 zapálení oblouku při stejné kvalitě řezu. Dvojplynová metoda umožňuje pouze 400 – 600 zapálení oblouku. Uvažovaná délka řezu je stejná. Přesný paprsek zajišťuje vysokou rozměrovou a úhlovou přesnost. Přesnost je dodržena za podmínek správného nastavení výšky hořáku, požadované čistoty plynů, rychlosti dělení a bezvibračního pohybu hořáku.

Pokud zanedbáme snadno odstranitelné okraje, lze Hy-Definition srovnat s dělením materiálu laserem. Ovšem je nutné podotknout, že laser dosahuje přesnější ostrohrannosti [2], [3].



Obr. 10 Hy-Definition [3]

1.9 Řezací fáze

Předfuk – je první fáze celého řezacího procesu. Plazmový plyn je přiváděn mezi elektrodu a trysku. Předfuk se provádí pro vytvoření dostatečného proudu a víru plazmového plynu. Současně je spuštěn i ochranný plyn. Potřebná doba předfuku trvá asi 2 sekundy.

Pilotní oblouk – se vytváří mezi elektrodou a tryskou. Vzniká po připojení pomocného vysokofrekvenčního napětí o hodnotě 5 – 10 kV. Proud je udržovaný v nízkých hodnotách 2 – 10 A. Hoření oblouku způsobuje opotřebení elektrody a trysky. Proto je důležité, aby pilotní oblouk co nejrychleji přecházel na řezací. Současně je spuštěn ionizátor, který ionizuje plazmový plyn. Hoření pilotního oblouku trvá 1 – 4 sekundy, dle technologie dělení.

Řezací oblouk – vzniká z pilotního oblouku. Při potřebném přiblížení hořáku a děleného materiálu se zvýší elektrický proud. Pilotní oblouk se přenesse z trysky na dělený materiál. Po přenesení se odpojí pomocné vysokofrekvenční napětí z trysky a vzniká samostatný řezací oblouk mezi elektrodou a materiálem. Hodnota řezacího napětí se pohybuje od 100 do 250 V. Je důležité, aby nevznikl dvojitý oblouk, jak mezi elektrodou a tryskou, tak i mezi elektrodou a děleným materiálem. Vznikem dvojitého oblouku dojde ke zničení trysky, kterou nelze dále používat. Po vzniku řezacího oblouku je elektrický proud dále zvyšován na stanovenou hodnotu. Vzdálenost hořáku nad děleným materiálem je snímána snímači, a tím je hořák udržován v optimální výšce.

Dofuk – je poslední část řezacího procesu. Po ukončení řezacího oblouku stále proudí plazmový a ochranný plyn. Důsledkem průtoku plynu se hořák chladí intenzivněji. Z tohoto důvodu se provádí tato závěrečná fáze řezacího procesu, která trvá obvykle 10 sekund [2], [5].

1.10 Druhy děleného materiálu

Konstrukční ocel – je nejčastěji dělený materiál plazmovým paprskem. Nejvíce používaný plazmový/ochranný plyn je kyslík/vzduch. Pro zkvalitnění řezu lze užít dražší variantu dělení materiálu, kdy ochranný plyn vzduch, je nahrazen kyslíkem nebo dusíkem. V praxi se dusík pro dělení konstrukčních ocelí takřka nepoužívá. Použitím jmenovaných plynů se dosahuje nejkvalitnější integrity povrchu. Pro různé tloušťky materiálu jsou používány i různé druhy plynů. Ocel lze dělit v rozsahu tloušťky 1 – 180 mm. Používané proudy se pohybují v rozsahu 15 – 750 A. Průrazná hloubka paprsku do plného materiálu je 20 – 40 mm.

Legovaná ocel a nerezavějící ocel – se v praxi dělí nejčastěji dvěma způsoby, u kterých je dosahováno kvalitního povrchu. První způsob je “Dual flow“. Druhý způsob je se vstřikováním vody do hořáku. Používané plazmové plyny jsou dusík, směs argon-vodík (H35). Ochranný plyn je dusík nebo vzduch. Jak už bylo uvedeno, maximální tloušťka děleného materiálu je 150 mm. Průrazná hloubka je nižší, než u konstrukčních ocelí.

Hliník – se dělí stejnými způsoby jako nerezavějící ocel. Upřesnit lze poměr směsi plazmového plynu argon/vodík (H35) v poměru 65% a 35% a dusík/vodík (F5) v poměru 95% a 5%. Dobré kvality a nízké ceny řezu je dosahováno použitím plynu vzduch/vzduch.

Keramika – a další neželezné kovy se plazmovým paprskem dělí velmi zřídka. Častěji jsou aplikovány jiné technologie pro jejich dělení. Například laserový paprsek, vodní a abrazivní paprsek a svazek elektronů [1], [2], [5], [8].

1.11 Použití plazmy pro další technologie výroby

Technologie plazmového oblouku se uplatňuje nejen při dělení materiálu, ale také v dalších odvětvích výroby.

Značně rozsáhlá je technologie svařování plazmovým paprskem. Princip vzniku paprsku je stejný jak při dělení materiálu. Konstrukce hořáku je obdobná. Plazmový a ochranný plyn je doplněn o plyn fokusační, který paprsek zaostřuje. Při svařování lze dosáhnout velké hloubky průvaru pomocí efektu “key hole“. V poloze vodorovné natupo se svařuje materiál tloušťky až 10 mm bez nutnosti úkosů. Sváry jsou zhotoveny na jeden průchod a pouze z jedné strany. Svařování plazmou je v řadě případů kombinováno se svařováním v ochranné atmosféře metodou MIG. Kombinací těchto dvou metod vzniká svár vysoké kvality i hloubky průvaru. Další odvětví svařování je mikroplazmou. Mikroplazmou lze svařovat kovové folie tloušťky 0,1 až 2 mm.

Již méně známé výrobní postupy, užívající plazmový paprsek, jsou technologie pájení, obrábění a předehřev před obráběním, značení plazmou, provádění kovových nástřiků a tepelné zpracování [10].

1.12 Bezpečnost a životní prostředí

Při dělení plazmovým paprskem vznikají vysoce jedovaté dýmy a zplodiny (např. oxidy dusíku). Tyto zplodiny je nutno odsávat a filtrovat, aby neškodily životnímu prostředí a obsluze strojů. Negativním jevem je i vysoký hluk. Ten při řezání dosahuje až 90 dB v místě působení obsluhy. Další

škodlivé jevy působící, jak na životní prostředí, tak na obsluhu, jsou například ultrafialové záření, infračervené záření a vznik prachu [5], [6].

2 VLIV TECHNOLOGICKÝCH PARAMETRŮ NA JAKOST POVRCHU A PŘESNOST OBRÁBĚNÍ

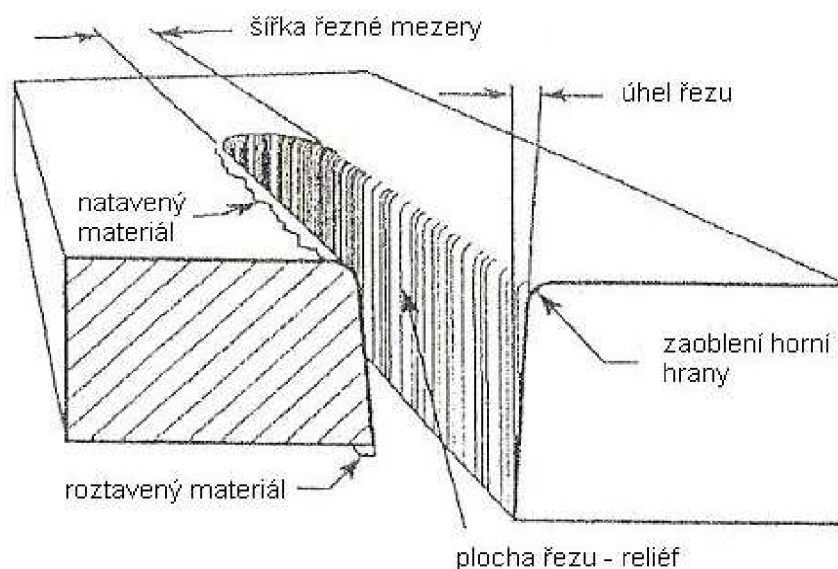
Mezi hlavní technologické aspekty ovlivňující jakost a přesnost obrobeného povrchu lze zařadit:

- velikost nastavení proudu a napětí,
- tloušťku a druh řezaného materiálu,
- rychlost dělení,
- volbu plazmového a ochranného plynu,
- opotřebení trysky, elektrody a dalších spotřebních dílů,
- průměr trysky a paprsku,
- výšku nastavení hořáku,
- vibrace při řezání.

Všeobecně se plazmovým řezáním dosahuje srovnatelné přesnosti jako při hrubovacích operacích u konvenčního obrábění. Při použití moderních metod dělení plazmou (Hy-Definition), lze přesnost a kvalitu povrchu optimalizovat [1], [2].

2.1 Zavedené pojmy pro výpalek

Výrobek zhotovený technologií dělení plazmovým paprskem se nejčastěji nazývá výpalek nebo obrobek (obr. 11). Při řezání vzniká mezi výpalkem a zbytkem materiálu řezná spára. Šířka řezné spáry má většinou dvojnásobnou hodnotu průměru trysky. Na ploše řezné spáry zůstává stopa po paprsku, která je nazývána reliéf povrchu. Podle reliéfu lze konstatovat kvalitu nastavení stroje a opotřebení trysky. Vzniká-li řez pod úhlem, šířka řezné spáry není rovnoběžná a v určité tloušťce materiálu se šířka spáry liší. Na horní ploše odpadového materiálu je po řezu zbytek nataveného materiálu. Naopak horní hrana výpalku bývá zaoblená důsledkem prvního styku oblouku s materiálem. Na spodních hranách výpalku i zbytku materiálu je většinou ztuhlý kov, který neodpadl při dělení. Tento zbytek lze většinou jednoduše odstranit [2].



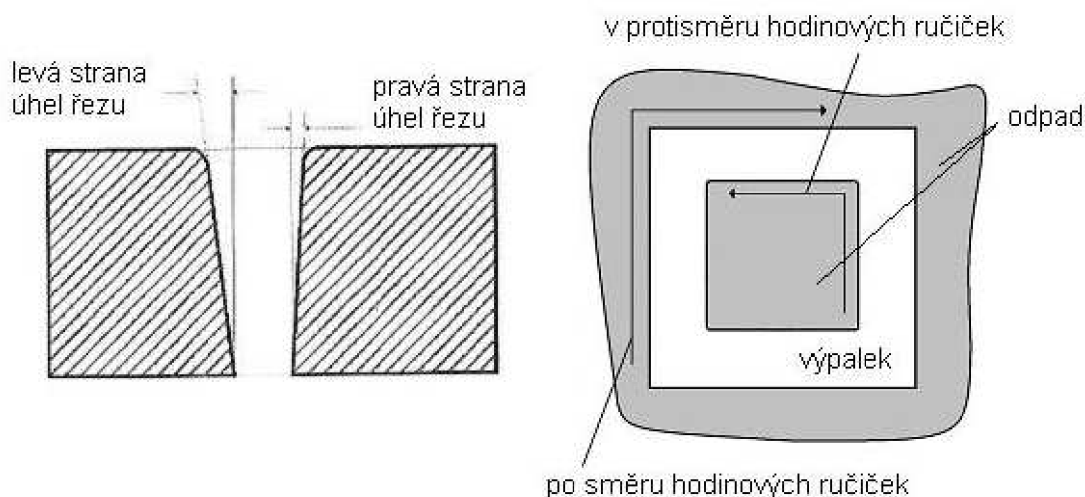
Obr. 11 Výpalek [2]

2.2 Základní technologické parametry

Do technologických parametrů dělení plazmovým paprskem, jsou řazeny tyto parametry: směr dělení, rychlost dělení, nastavení proudu a napětí, průměr a opotřebení trysky, a také vzdálenost hořáku od děleného materiálu.

2.2.1 Směr dělení materiálu

Plazmový plyn je dodáván mezi elektrodu a trysku do hořáku, přes vířivý kroužek. Plyn se po výstupu z kroužku pohybuje ve spirálovém-vířivém pohybu. Tímto efektem je dána hladkost sloupce plynu a paprsku. Dalším efektem proudění plynu jsou rozdílné úhly řezaných ploch. Při použití běžně užívaných plynů se v praxi vnější kontury řezou po směru hodinových ručiček a vnitřní kontury proti směru hodinových ručiček. To zajišťuje ostřejší úhly výpalku a méně ostré úhly na odpadovém materiálu. Směr řezání a ostrost úhlů je vyobrazena na obrázku 12 [5].



Obr. 12 Směr dělení a úhly řezu [5]

2.2.2 Rychlost dělení materiálu

Nastavení správné rychlosti řezání je velmi důležité, protože značně ovlivňuje úhel řezu, reliéf dělené plochy, velikost a stupeň přilnutí nataveného a roztaveného kovu, který ulpívá na výpalku. Rychlost řezání je závislá na tloušťce a druhu materiálu. Pohybuje se v hodnotách od $0,2$ do $7,5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$.

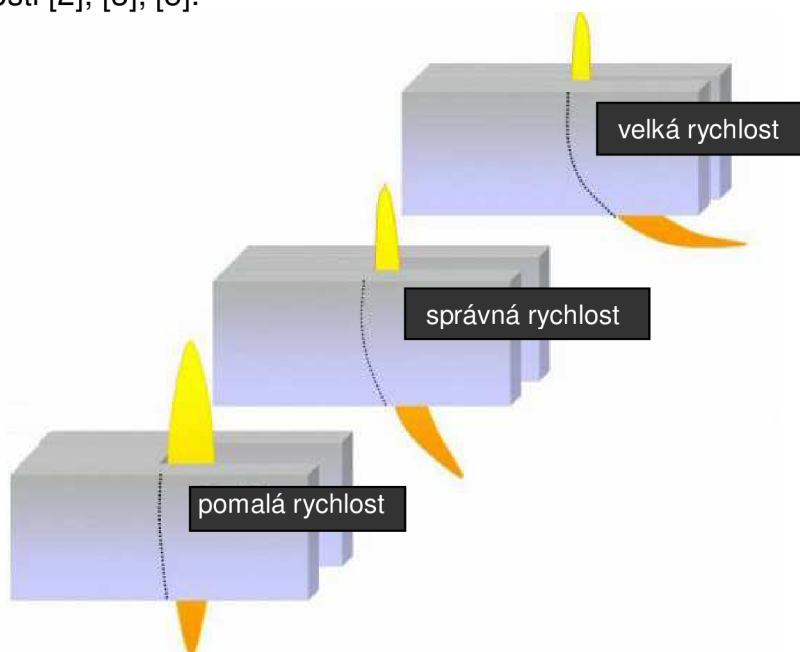
Při dělení je možné podle řezné rychlosti rozeznat tři druhy oblouku:

Oblouk zůstává kolmý k ploše materiálu – jeho použití je nejčastější při dělení hliníku a nízkolegované nerezavějící oceli za použití vzduchu jako plazmového plynu.

Oblouk zaostává ve směru posuvu – tento typ oblouku je ideální a nejpoužívanější. Používá se pro všechny dělené materiály i plyny. Úhel vzhledem k ose hořáku by neměl překročit 5 až 10° .

Oblouk předbíhá osu hořáku ve směru posuvu – používá se při dělení tenkých materiálu nejčastěji z nízkolegované oceli. Úhel vzhledem k ose hořáku by neměl překročit 5° .

Vznik hladké dělené plochy je podmíněn správným nastavením rychlosti. Ta je správně nastavena, pokud je úběr materiálu prováděn na náběžné hraně řezného paprsku. Na obrázku 13 jsou seřazeny oblouky dle řezné rychlosti [2], [3], [5].



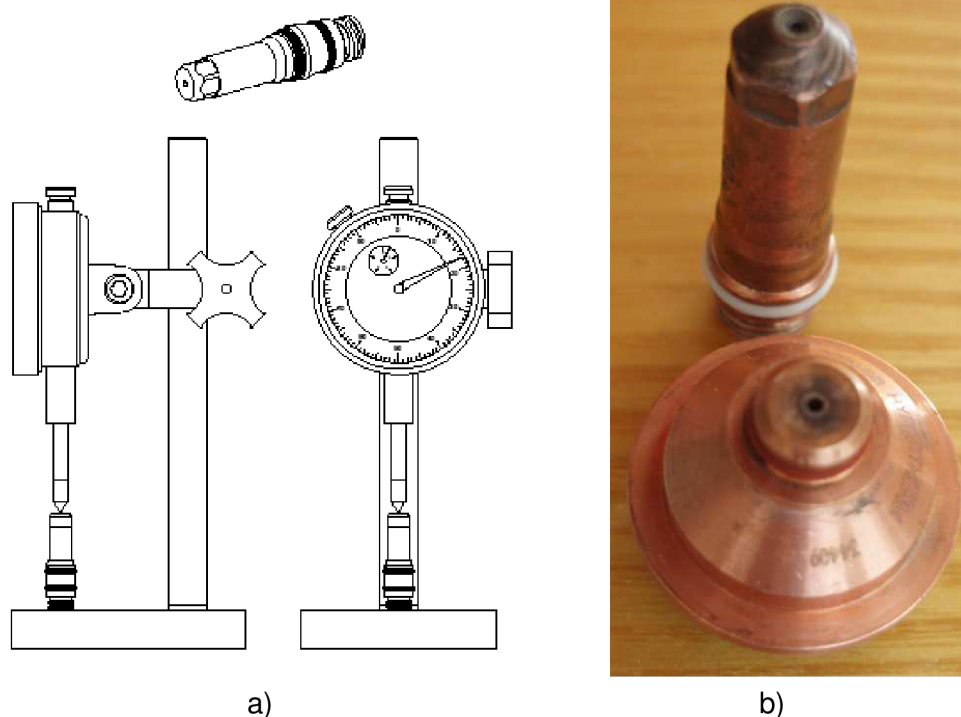
Obr. 13 Závislost rychlosti na průběhu oblouku [3]

2.2.3 Nastavení proudu a napětí

Při dělení plazmovým paprskem se používá stejnosměrný proud. Nastavení proudu a napětí je závislé na tloušťce a druhu řezaného materiálu, tak jako řezná rychlost. Používané proudy jsou 15 – 1200 A a napětí 100 – 250 V_{ss} (stejnosměrného napětí). Při zvolení malého proudu dochází k nedopálení materiálu. Naopak velké proudy způsobují velké zaoblení hrany a těžko odstranitelné otřepy z výpalku. Každému řezacímu proudu, který lze nastavit při dělení materiálu je přiřazena pálicí sestava hořáku. Sestava se skládá ze dvou komponentů, a to elektrody a trysky. Obvyklé rozdělení pálicích sestav podle proudů u zdroje HPR 260 firmy Hypertherm je 30 A, 45 A, 80 A, 130 A, 200 A a 260 A sestava. Následná regulace proudu po zvolení sestavy je možná plynule v plném rozsahu zdroje [2], [5].

2.2.4 Opatřebení spotřebních dílů

Nejvíce opotřebovávané díly hořáku jsou elektroda a tryska. Jejich výměna je doporučována současně. Výměnu provádí operátor, pokud hloubka vytavení elektrody dosahuje jednoho milimetru, nebo kruhový otvor trysky je oválný, či jinak deformovaný. Měření hloubky vytavení elektrody je znázorněno na obrázku 14a. Měření se provádí pomocí hloubkoměru, na kterém se odečítá hloubka aktuálního vytavení elektrody. Opatřebovaná sestava je vidět na obrázku 14b [2].



Obr. 14 a) Měření vytavení elektrody [5], b) Vyřazená sestava

2.2.5 Průměr trysky a paprsku

K dosažení kvalitního řezu je dobré volit průměr trysky co nejmenší. Čím menší je průměr trysky, tím je paprsek užší a má větší intenzitu energie. Ovšem malý průměr trysky se snadněji a rychleji opotřebovává. Proto se volí optimální, v závislosti na opotřebení a intenzitě energie paprsku. Průměr je také závislý na tloušťce děleného materiálu, a tím i na proudu zdroje. V praxi používané průměry trysek jsou v rozsahu 0,79 – 6,35 mm [1].

2.2.6 Vzdálenost hořáku a materiálu

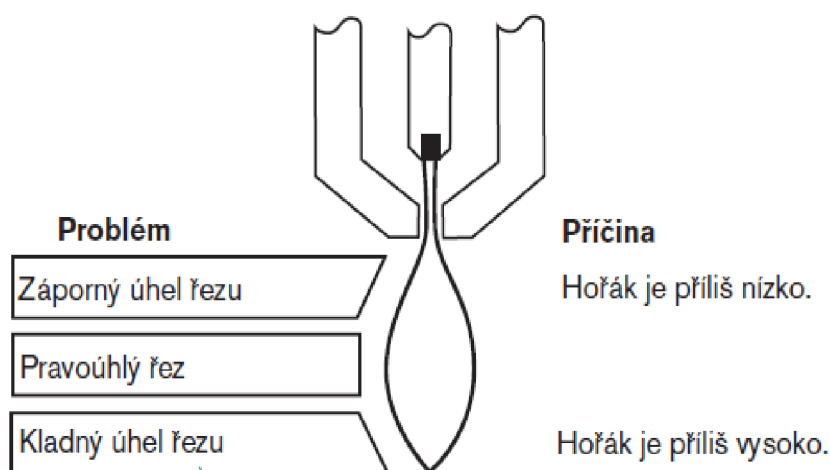
Hodnota vzdálenosti při zapálení oblouku a propálení materiálu je větší než řezná výška. Po zapálení a propálení hořák automaticky sjede na řeznou výšku. Při propalování materiálu větších tloušťek se doporučuje vyjetí hořáku směrem od materiálu o hodnotu, která se rovná tloušťce děleného materiálu. Poté následné sjetí na řeznou výšku. U většiny plazmových zdrojů se oblouk nezapálí, pokud je výška větší jak 10 mm.

Regulace vzdálenosti oblouku v průběhu řezu lze přesně nastavit pouze u strojního dělení. Nejpoužívanější metoda nastavení vzdálenosti je automatická regulace výšky. Regulace se provádí pomocí předem nastaveného napětí. Tím je hořák udržován v konstantní vzdálenosti od materiálu. Hodnota napětí je závislá jak na výšce, tak i na řezné rychlosti. Při řezání malých zaoblení a ostrých rohů se rychlost řezání snižuje. Z tohoto důvodu se automatická regulace v rozích vypíná, jelikož by při snížení rychlosti došlo ke snížení vzdálenosti.

Druhá metoda nastavení vzdálenosti je bez regulace, tzv. manuální. Vzdálenost je nastavena operátorem před začátkem řezání na jednu hodnotu.

Tato hodnota se udržuje po celou dobu řezu, pokud ji operátor v průběhu nezmění. Nevýhoda této varianty je, že při dlouhém řezu a tenkých tloušťkách děleného materiálu dochází k jeho zvlnění. Tím se může vzdálenost neúměrně snížit a vzniknout nekvalitní dělená plocha. Následně může dojít k dotyku hořáku a materiálu, což je nežádoucí.

Rozsah optimální řezné výšky je 2 – 6 mm v závislosti na tloušťce materiálu a nastaveném proudu. Pokud není dodržena vzdálenost, dochází k podřezání hrany výpalku. Při krátkém oblouku vzniká záporný úhel řezné hrany. Při dlouhém oblouku kladný úhel řezné hrany (obr. 15) [2], [5].



Obr. 15 Vliv délky oblouku na úhel řezu [5]

2.3 Sledované parametry a jejich vyrobiteľnosť

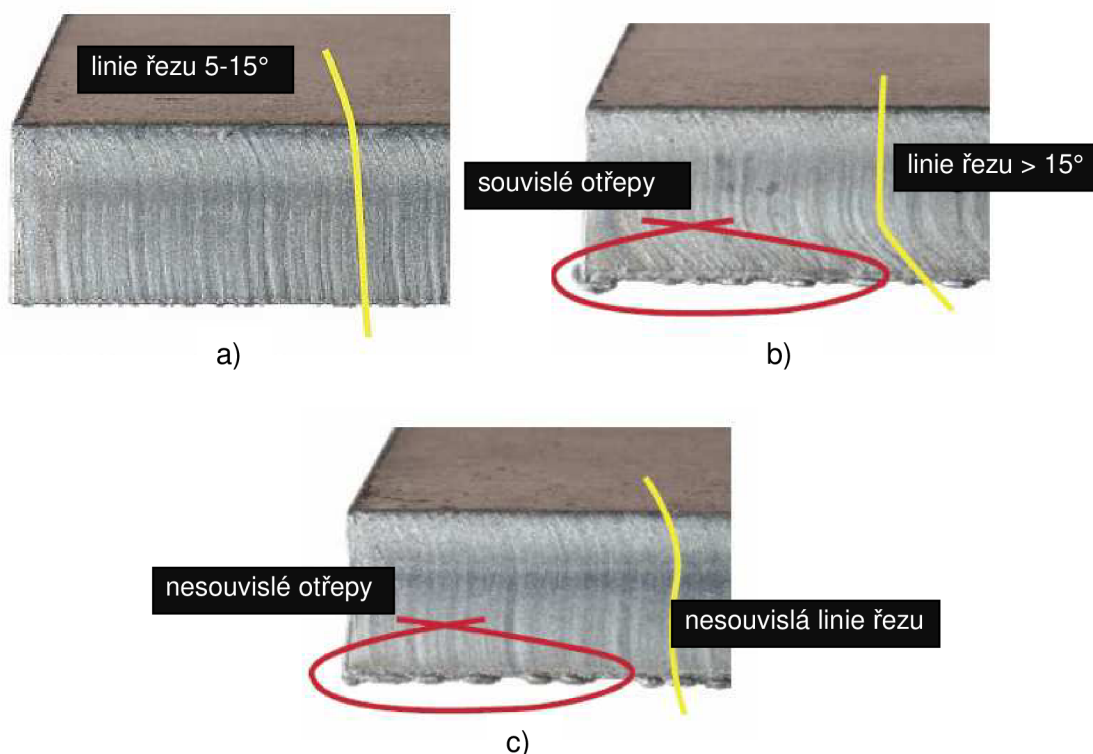
Na výpalku je najčastejšie sledovaná integrita dělené plochy a ďalej lze měřit rozměrovou přesnost výrobku. Jako každá technologie má i technologie dělení plazmovým paprskem některá svá omezení, na které je třeba dbát, aby byl výpalek vyrobiteľný.

2.3.1 Reliéf dělené plochy

Reliéf dělené plochy je najvíce ovlivňován nastavením řezné rychlosti a vzdálenosti hořáku od výpalku. Správny reliéf dělené plochy je znázorněn na obrázku 16a. Stopa řezné linie zaostává za osou hořáku o 5 – 15°. Na spodní hraně výpalku se nevytváří takřka žádné otřepy. Hladkost povrchu je optimální.

Stopa řezné linie zaostává o více než 15°. Dělená plocha je hrubá a na výpalku zůstávají souvislé snadno odstranitelné otřepy (obr. 16b). Rychlost dělení je vysoká nebo hořák je příliš vzdálený. Tento nevhodný reliéf se odstraňuje snížením rychlosti a vzdálenosti hořáku.

Stopa řezné linie je nesouvislá, dělená plocha značně hrubá. Na spodní straně zůstávají otřepy ve formě těžko odstranitelných bublin (obr. 16c). Rychlost dělení je pomalá nebo hořák příliš nízko. Tento nevhodný reliéf se odstraňuje zvýšením rychlosti a vzdálenosti hořáku [3].



Obr. 16 Reliéf plochy a) správný reliéf; b, c) špatný reliéf [3]

2.3.2 Úhel dělených hran a tepelně ovlivněná oblast (TOO)

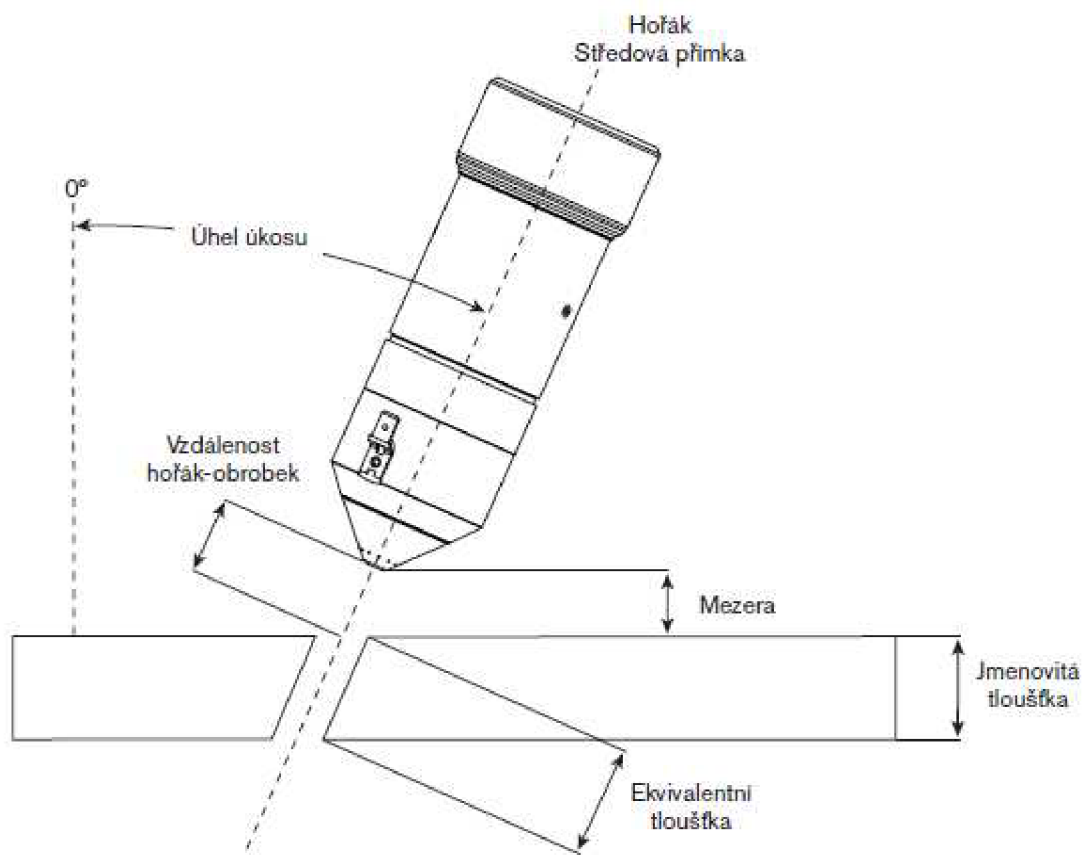
Výpalek se považuje za optimální, pokud průměrný úhel odchytky všech řezaných hran nepřekročí 4°. Toto pravidlo je bráno při použití nejrozšířenější metody "Dual flow".

V porovnání s kyslíkovým dělením materiálu, je TOO při dělení plazmovým paprskem velmi malá, v důsledku vysoké rychlosti dělení. Hloubka TOO se různí podle tloušťky děleného materiálu a rychlosti dělení. Hloubka se pohybuje v rozmezí 0,25 – 1,25 mm. Tepelně ovlivněná oblast děleného materiálu je v dolní části řezu větší jak v horní, a to více než dvojnásobně [1], [6].

2.3.3 Vyrobitelnost výpalku

Při návrhu a konstrukci výpalku je třeba brát zřetel na jeho vyrobitelnost. Ostré hrany musí být navrženy tak, aby nebyly při pálení utaveny. Ostré vnitřní oblouky nesmějí mít radius menší, jak poloměr paprsku. Při pálení děr do tlustých materiálů, se minimální průměr díry doporučuje volit vyšší jak 1,5 násobek tloušťky materiálu. Minimální tloušťka řezné spáry nesmí být konstruována menší jak průměr paprsku, z důvodu nevyrobitelnosti. Některé plazmové stoly jsou schopny hořák ustavit pod úhlem. Tímto způsobem mohou vznikat výpalky s úkoso. Řezaný úhel mezi materiálem a středovou přímkou hořáku nesmí překročit 45°. Parametry nastavované pro řezání pod úhlem se mírně liší od parametrů, které jsou nastavovány při kolmém řezu. Při šikmém řezu je brána tzv. ekvivalentní tloušťka. Tato tloušťka určuje

skutečnou tloušťku materiálu, kterou musí paprsek proniknout. Na obrázku 17 je znázorněn šikmý řez [2], [5], [6].



Obr. 17 Šikmé dělení materiálu [6]

2.3.4 Efektivita strojního dělení plechů

Po návrhu a konstrukci všech součástí, které jsou páleny z jedné tloušťky materiálu, je důležité jejich správné rozmístění na tabuli plechu. Rozmístění součástí provádí nainstalovaný NC – program, nebo operátor ručně. Z důvodu efektivity a rychlosti jsou používány častěji programy. Nejčastěji používaný je systém CAPP (Computer Aided Process Planning). Program provádí výpočty technologických parametrů, programuje pohyby hořáku, provádí korekce, určuje nájezdy a výjezdy při řezání, a také stanovuje technologický postup výroby součástí [2].

2.4 Vady při dělení materiálu

Vady při dělení materiálu vznikají jak na dělené ploše, tak i na řezných hranách výpalků.

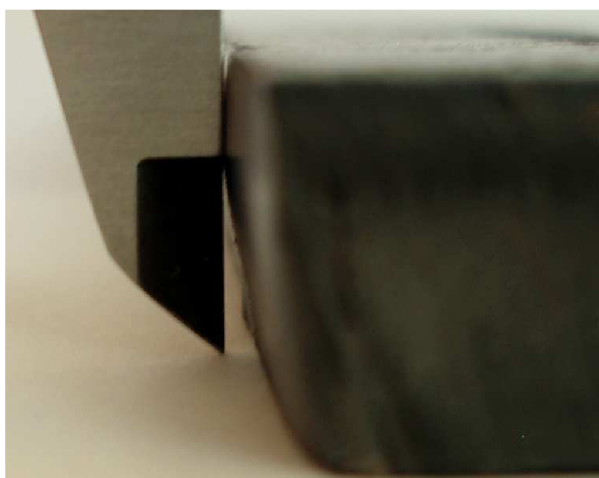
2.4.1 Vady na řezné ploše

Vady, které se vyskytují při dělení plazmovým paprskem na řezné ploše, uvádí O. Híreš, M. Hatala a S. Hloch. Nejčastější vady jsou [2]:

- odchylka úhlu dělení,
- vypálení pod dělenou hranou,
- rozšíření dělicí mezery,
- vyhloubení dělené plochy
- nepravidelný tvar dělené plochy,
- nadměrné opoždění stopy dělení,
- místní odchylky opoždění stopy dělení,
- nepravidelná hloubka stopy dělení,
- zápaly,
- nerovnost dělené plochy.

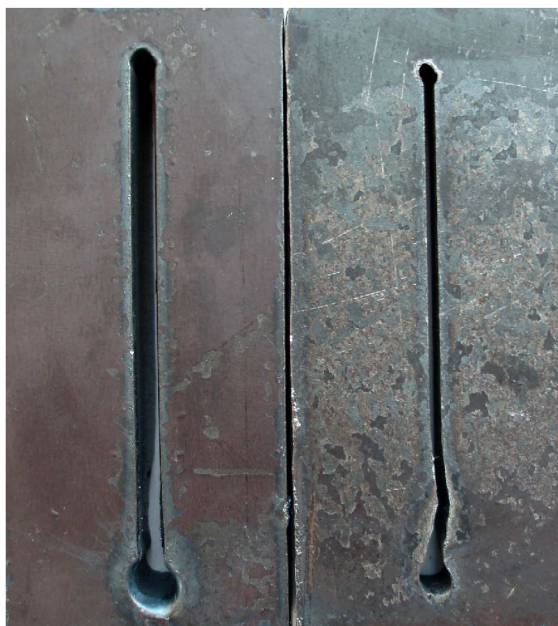
Veškeré jmenované vady lze minimalizovat optimalizací řezných podmínek. Podrobně popsány jsou dále nejčastěji se vyskytující vady řezu při dělení plazmovým paprskem:

Odchylky úhlů – tato vada se při dělení plazmovým paprskem vyskytuje na každém výpalku. Při teoreticky přesném řezání přímých řezů, dělená plocha a plocha děleného materiálu svírají pravý úhel. Ovšem v praxi při dělení vznikají tyto odchylky úhlů. Odchylku úhlu lze klasifikovat za přijatelnou, pokud nepřekročí 3 – 4° oproti ideálnímu řezu. Odchylka je způsobena spirálovým vířením plazmového plynu nebo nevhodně zvolenými parametry řezu. V největší míře tato odchylka vzniká při dělení ocelí s vysokým obsahem legujících prvků. Na obrázku 18 je vidět odchylka úhlu při dělení na dolní ploše děleného materiálu [2], [6].



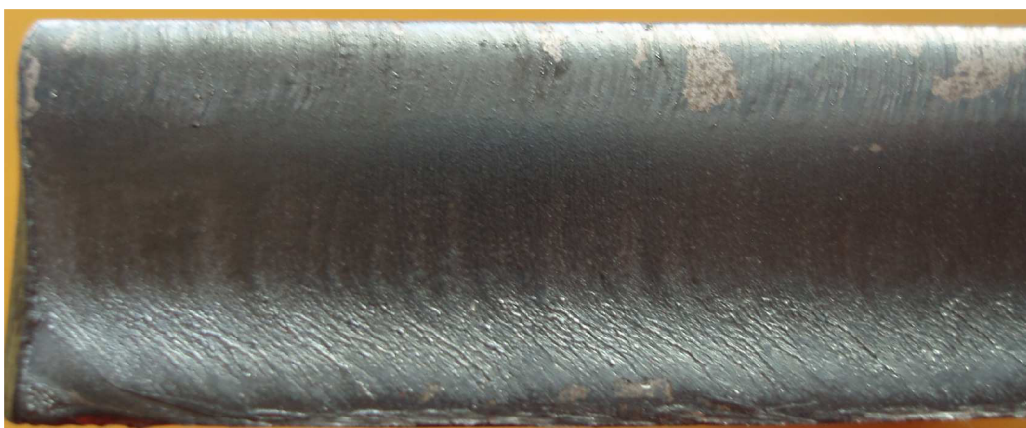
Obr. 18 Odchylka úhlu dělení

Rozšíření dělicí mezery – tento druh vady vzniká v horní nebo dolní části dělené plochy. Pokud rozšíření dělicí mezery vzniká v horní části, lze ho redukovat: snížením vzdálenosti hořáku od děleného materiálu, snížením řezné rychlosti nebo výměnou opotřebované pálicí sestavy (elektroda, tryska). Pokud rozšíření mezery vzniká v dolní části, redukuje se zvýšením řezné rychlosti, zvýšením vzdálenosti hořáku od děleného materiálu nebo výměnou pálicí sestavy. Na obrázku 19 je znázorněna velikost řezné mezery na horní a dolní ploše výpalku [2], [6].



Obr. 19 Šířka řezné mezery – vlevo horní plocha, vpravo dolní plocha

Vyhlobení dělené plochy – každý výpalek je mírně zakřivený dovnitř. Tento jev je typický pro plazmové dělení. Pokud je vyhloubení dělené plochy příliš hluboké (obr. 20), lze ho eliminovat zvýšením vzdálenosti hořáku [6].



Obr. 20 Vyhlobení dělené plochy, tloušťka 15 mm

Nepravidelné opoždění stopy dělení – tuto vadu podrobně popisuje kapitola 2.3.1.

Nepravidelná hloubka stopy dělení a zápaly – jsou to obdobné vady, které vznikají v důsledku nerovnoměrného pohybu hořáku, nebo opotřebované pálící sestavy. Zápaly vznikají, pokud je povrch děleného materiálu silně zkorodovaný. Nepravidelnou hloubku stopy dělení lze pozorovat na obrázku 21 [2].



Obr. 21 Nepravidelná hloubka stopy dělení, tloušťka 12mm

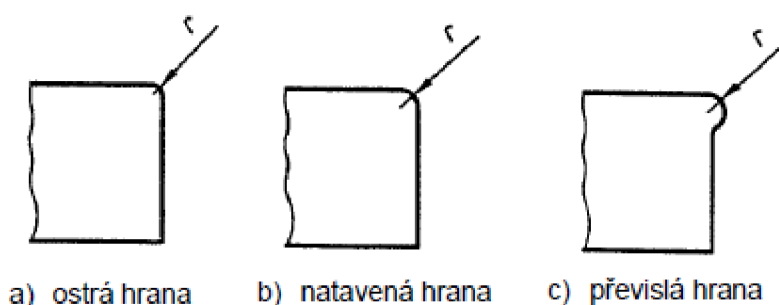
2.4.2 Vady na řezných hranách

Vady, které vznikají na řezných hranách, uvádí O. Híreš, M. Hatala a S. Hloch. Nejčastější vady na hranách jsou [2]:

- natavení hrany dělení,
- řada ztuhlých kapek,
- převis dělené hrany,
- odtavení horní části dělené hrany,
- přilepené otřepy,
- trhliny,
- odchylka způsobená na začátku dělení,
- okuje.

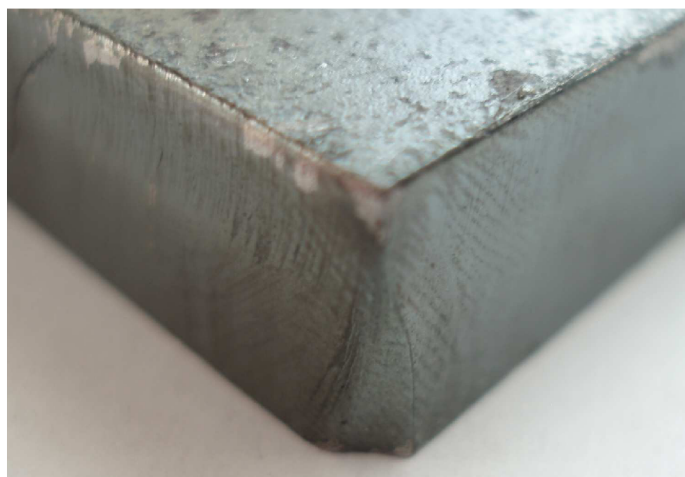
Rozbor některých nejčastěji se vyskytujících vad na řezných hranách výpalku:

Natavení a převis hrany dělení – jsou nejčastější vady, které se vyskytují na horní hraně obrobku. Častěji vznikají hrany natavené. Geometrie hrany je definována poloměrem r . Podle poloměru se hrana vyskytuje ve třech podobách (obr. 22). Hrana může být ostrá, natavená nebo převislá. Natavení nebo převis hrany lze odstranit změnou některých parametrů. Parametry dělení ovlivňující hranu jsou: vzdálenost hořáku od materiálu, rychlost řezání, druh paprsku, průměr a opotřebení trysky, povrch materiálu (oxidy na povrchu) [2], [11].



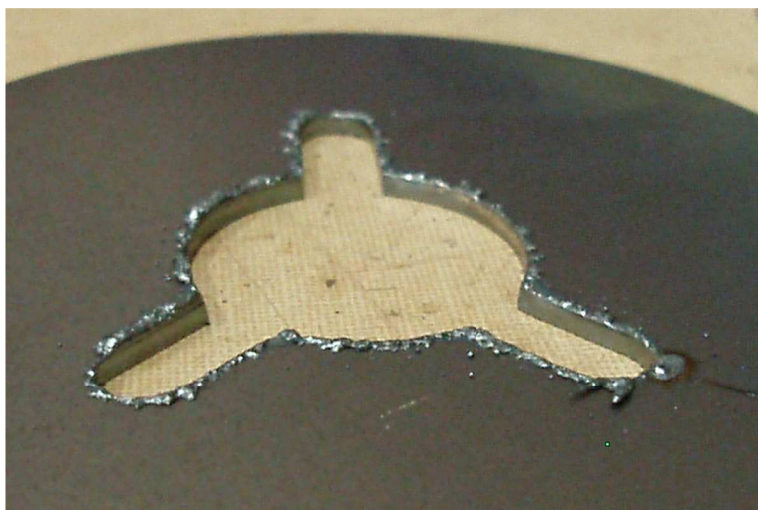
Obr. 22 Druhy natavení hrany [11]

Odtavení horní (dolní) hrany – je vada, která vzniká při dělení tvarových ploch, ostrých vnějších oblouků a rohu (obr. 23). Důsledkem zpomalení řezné rychlosti při řezání ostrých hran se materiál více zahřívá. Zdroj tepelné energie působí po delší čas na jednom místě, a tím může dojít k natavení hrany. Zmírnit tuto vadu lze zvýšením vzdálenosti hořáku od materiálu nebo snížením proudu. Provedením těchto úprav může ovšem dojít k nedoříznutí rohu. Proto je důležité zvolit optimální poměr nastavení řezných parametrů, kdy vzniká pouze malé, nebo žádné natavení a roh je zcela oddělen [2].



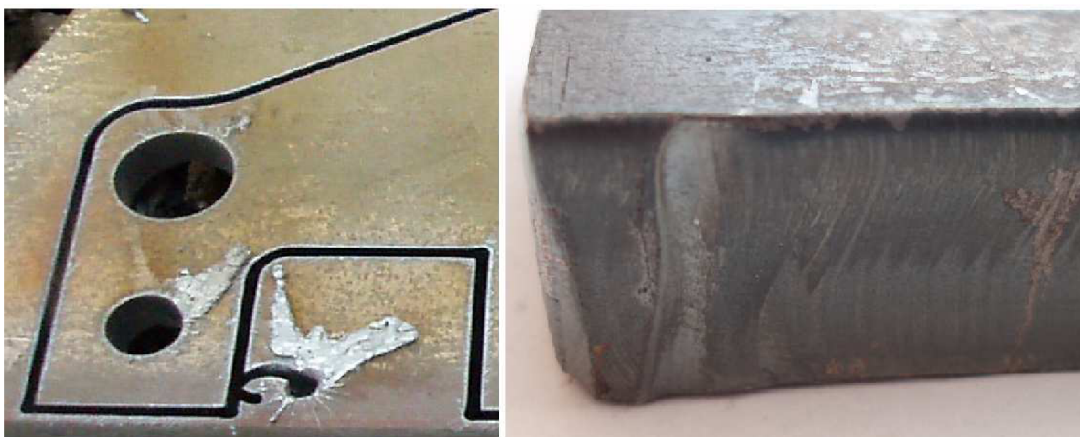
Obr. 23 Odtavení dolní hrany rohu, tloušťka 20 mm

Otřepy – vznikají na dolní hraně dělené plochy každého výpalku (obr. 24). Pokud jsou správně nastaveny parametry dělení, otřepy lze snadno odstranit bez poškození plochy obrobku. Pokud jsou otřepy na hraně přivařeny (přilepeny), není snadné jejich odstranění bez poškození plochy výpalku. Těžko odstranitelné otřepy se odstraňují broušením nebo jinou konvenční metodou obrábění. Otřepy se rozdělují podle jejich druhu na souvislé hladké, souvislé ostré a otřepy ve formě kapek nebo bublin (perlovité otřepy). Kapkovité a hladké otřepy jsou typické pro konstrukční ocel. Ostré otřepy se nejčastěji vyskytují při dělení hliníku a legované oceli. Otřepy a jejich druhy jsou popsány již dříve v kapitole 2.3.1 [2], [5].



Obr. 24 Otřepy při tvarovém řezu, tloušťka 5 mm

Odchylka řezu na začátku dělení (zápal) – vzniká propalováním materiálu a zpožděním rozjezdu hořáku na začátku řezu. Odchylka řezu na obrobku vzniká minimálně, pokud je propálení provedeno na odpadovém materiálu a v dostatečné vzdálenosti od výpalku (obr. 25). Odchylka řezu se dále eliminuje tečným najetím paprsku na obvod obrobku. Pokud není možné propálení provádět v dostatečné vzdálenosti od výpalku, umísťuje se propal na těch hranách obrobku, které nejsou konstrukčně nebo technologicky důležité [2].



Obr. 25 Zápal a odchylka řezu na začátku dělení

Okuje – se vyskytují na dělených hranách a ploše výpalku. Vznikají v důsledku tepelného ovlivnění materiálu. Další důsledky vzniku jsou vysoký obsah legujících prvků, nízký tlak ochranného plynu a zkorodovaný povrch děleného materiálu. Pokud se okuje utváří do ucelené kůry, jsou snadno odstranitelné. Oproti tomu okuje vyskytující se ve formě výronků, jsou odstranitelné obtížněji [2].

3 VYHODNOCENÍ JAKOSTI POVRCHU A PŘESNOSTI PRO KONKRÉTNÍ SOUČÁST

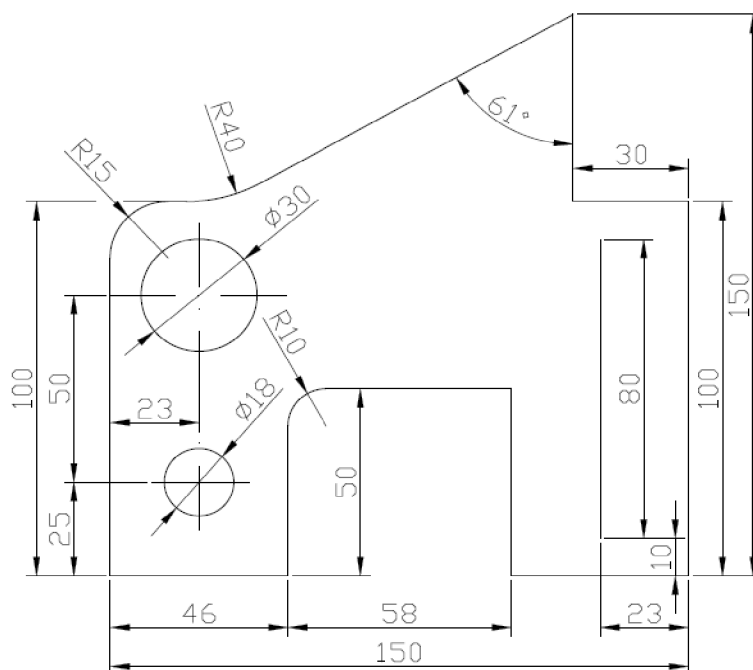
Praktická část práce je věnována výrobě výpalků a jejich následným vyhodnocením. Na výpalcích je vyhodnocována jakost děleného povrchu a rozměrová přesnost vyrobených součástí.

3.1 Cíle experimentu

Experiment se provádí na konkrétní součásti, která je navržena, zhotovena a následně vyhodnocována. Hlavním cílem experimentu je vyhodnocení jakosti povrchu a geometrické přesnosti navržené součásti. Konkrétní součásti jsou vyrobeny pomocí odlišných parametrů, které se volí při dělení plazmovým paprskem. Tyto rozdílné parametry jsou posuzovány z funkčního, technologického a ekonomického hlediska. Zhotovení výpalků bylo provedeno ve firmě Alweco s.r.o.

3.2 Návrh součásti

Při návrhu se vychází ze součásti, kterou firma vyrábí. Originální součást je komponenta svařence. Navržená součást je poupravena tak, aby měla co největší vypovídající hodnotu při měření a vyhodnocování. Úprava a konstrukce součásti je provedena v programu AutoCad. Cad soubor ve formátu DWG je po zkonstruování převeden na soubor ve formátu DXF. Převedení souboru se provádí z důvodu kompatibility se softwarem WrykRys, ve kterém se připravují pálicí plány. Výrobní výkres součásti je uveden v příloze 1. Nákres součásti je možno pozorovat na obrázku 26. Tloušťka pálené součásti je zvolena 15 mm.



Obr. 26 Navržená součást

3.3 Volba materiálu

Při volbě materiálu součásti se vychází taktéž ze součásti vyráběné firmou. Jelikož se jedná o komponentu svařence, musí být materiál svařitelný. Materiál je zvolen S235JRG2 označen podle normy ČSN EN 10027-1, (podle normy ČSN 42 0002 je ocel označena 11 375). Jedná se nelegovanou ocel, která se používá pro ocelové konstrukce. Maximální mez pevnosti oceli $R_{mmax} = 340 - 510$ MPa. Minimální mez kluzu $R_{emin} = 235$ MPa. Hodnota nárazové práce $KV = 27$ J je zaručena pro teplotu $+20^{\circ}\text{C}$. Ocel je uklidňována pro svařování, uváděná minimální tažnost je 26%. Ocel má následující hmotnostní chemické složení: C 0,19%, Mn_{max} 1,5%, Si 0%, P_{max} 0,045%, S_{max} 0,045%, N_{max} 0,014% [9], [13].

3.4 Specifika plazmového dělicího centra

Plazmové centrum je zakoupeno a kompletně dodáno firmou Vanad 2000 a.s. Centrum se skládá z těchto součástí:

CNC pálicí stroj Vanad Proxima Kompakt 15/60 s přítlačným talířem – stroj se nejčastěji osazuje plazmovými hořáky s Hy-Definition technologií. Přítlačný talíř je určen pro kontaktní nastavení výšky hořáku. Talíř se používá pouze pro tenké plechy 0,5 - 2 mm. Pro ustavení hořáku při dělení tlustších materiálu se užívá odměřovací systém. Materiálový stůl je osazen portálem s jedním suportem pro plazmový hořák. Suport je vybaven odměřovací jednotkou THC, která řídí a odměřuje pohyby hořáku. Stroj dále obsahuje řídicí systém od firmy Vanad. Výstup informací ze systému je pomocí LCD displeje. Propojení s programovacím centrem je zabezpečeno LAN síťovou kartou. Technické specifikace pálicího stroje jsou uvedeny v tabulce 2 [4], [6].

Tab. 2 Technické údaje pálicího stroje [6]

Pracovní šířka	1600 mm
Pracovní délka	6500 mm
Výška stolu	850 mm
Výkon pohonu	200 W
Pracovní rychlost	$10 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$
Přesuvová rychlost	$17 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$
Přesnost polohování	$\pm 0,2$ mm bez korekce nelinearity $\pm 0,1$ mm s korekce nelinearity
Opakovaná přesnost	$\pm 0,1$ mm
Max. pracovní zrychlení	$800 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-2}$
Rychlost zvedání hořáku	$3,5 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$
Kapacitní regulace výšky hořáku	± 2 mm, pro plechy co 50 mm

Plazmový zdroj Hypertherm HPR 260 – se skládá ze zdroje napájení, zapalovací konzoly, plynové konzoly, řídicí (měřicí) konzoly a hořáku. Jmenované součásti jsou propojeny pomocí příslušné kabeláže. Plazmový systém Hy-Performance se používá pro dělení uhlíkové (nelegované) oceli, nerezové oceli a hliníku.

Technické parametry napájecího zdroje jsou uvedeny v tabulce 3. Zdroj se skládá z obvodů pro zapalování hořáku a chladicí jednotky. Obvody jsou zapojeny v sériovém rozhraní [5].

Tab. 3 Technické údaje napájecího zdroje [5]

Vstupní proud	$I_1 = 75 \text{ A}$
Max. výstupní proud	$I_2 = 260 \text{ A}$
Max. napětí na prázdnou	$U_0 = 311 \text{ Vss}$
Vstupní napájení	$U_1 = 400 \text{ Vst}$
Výstupní napětí	$U_2 = 50 - 175 \text{ Vss}$
Provozní teplota	$-10 - 40^\circ\text{C}$
Výkon	$P = 51,6 \text{ kW}$
Chlazení	Nucený vzduch
Plynulá regulace	$30 - 260 \text{ A}$
Hmotnost	$554,7 \text{ kg}$

Zapalovací konzola slouží k zapálení pilotního oblouku a k jeho přenosu na dělený materiál za vzniku řezacího oblouku. K tomuto procesu slouží sestava jiskřiště. Jiskřiště převádí vstupní napětí na vysokofrekvenční a vysokonapěťové pulzy. Pulzy zapříčiňují přenesení oblouku. Zapalovací konzola je namontována u zdroje napětí. Další možnost namontování konzoly je na portále pálícího stroje. Základní technické údaje konzoly jsou uvedeny v tabulce 4 [5].

Tab. 4 Technické údaje zapalovací konzoly [5]







Ovládací napětí	120 Vst
Hodnota vysokofrekvenčních a vysokonapěťových pulzů	$9 - 10 \text{ kV}$
Hmotnost	$9,1 \text{ kg}$

Plynová konzola slouží k výběru plynů a řízení jejich průtoků. Na stroji je instalovaná ruční plynová konzola. U ruční plynové konzoly se průtoky plynů nastavují ručně podle návodu výrobce. Dalším druhem plynové konzoly je automatická, která nastavuje průtoky plynů plně automaticky. Konzola má samostatné vstupy pro každý používaný plyn. Její namontování je provedeno na napájecím zdroji. Požadovaná čistota plynů je vyobrazena v tabulce 5. Používané plyny pro jednotlivé pálící sestavy jsou uvedeny v tabulce 6 [5].

Tab. 5 Systémové požadavky na plyn [5]

Typ plynu	Jakost plynu	Požadavky
Kyslík O ₂	Čistota 99,5 %	Čistý, suchý, bez oleje
Dusík N ₂	Čistota 99,99 %	Čistý, suchý, bez oleje
Vzduch	podle normy ISO 8573-1	Čistý, suchý, bez oleje
H35 argon-vodík	Čistota 99,995 %	H35 = 65 % Ar, 35 % H ₂
F5 dusík-vodík	Čistota 99,98 %	F5 = 95 % N ₂ , 35 % H ₂
Argon Ar	Čistota 99,99 %	Čistý, suchý, bez oleje

Tab. 6 Používané plyny [5]

	Nelegovaná ocel		Nerezová ocel		Hliník	
						
Typ plynu	Plazmový	Stínící	Plazmový	Stínící	Plazmový	Stínící
Řezání 30 – 50 A	O ₂	O ₂	N ₂ & F5	N ₂	Vzduch	Vzduch
Řezání 80 A	O ₂	Vzduch	F5	N ₂	-	-
Řezání 130 A	O ₂	Vzduch	N ₂ & H35	N ₂	H35 & Vzduch	N ₂ & Vzduch
Řezání 200 A	O ₂	Vzduch	N ₂ & H35	N ₂	N ₂ & H35	N ₂
Řezání 260 A	O ₂	Vzduch	N ₂ & H35	N ₂ & Vzduch	N ₂ & H35	N ₂ & Vzduch

Řezací hořák je vybaven technologií Hy-Definition pro přesné řezání. Hořák je přimontovaný na suport stolu, který zajišťuje jeho pohyb ve třech osách. Chlazení hořáku je prováděno pomocí kapaliny. Chladicí kapalina je směs vody 69,9 %, propylenglykolu 30 % a benzotriazolu 0,1 %. Technické specifikace hořáku HPR 260 (obr. 4) jsou uvedeny v tabulce 7 [5].

Tab. 7 Technické údaje hořáku [5]

Max. řezná kapacita bez okují	32 mm (Hy-Definition)
Max. průrazná kapacita	Uhlíková ocel 32 mm
	Nerezová ocel 25 mm
	Hliník 25 mm
Max. řezaná tloušťka	Uhlíková ocel 64 mm
	Nerezová ocel 50 mm
	Hliník 50 mm
Chlazení	Kapalina Hypertherm
Provozní teplota okolí	-12 - 40 °C
Hmotnost	1,9 kg

Filtrační jednotka Vanad TIG FS4800/80 – je vybavena odsáváním, které odsává dýmy vznikající při dělení. Dýmy jsou vedeny do filtrační jednotky, kde jsou přefiltrovány přes teflonový patron. Čistý vzduch je vypouštěn zpět do výrobní haly, nebo do okolní atmosféry podle potřeby. Technické údaje jednotky jsou uvedeny v tabulce 8 [4].

Tab. 8 Technické údaje filtrační jednotky

Filtrační plocha	80 m ²
Výkon ventilátoru	4680 m ³ ·hod ⁻¹
Výkon elektromotoru	5,5 kW

Program WrykRys – slouží pro přípravu pálicích plánů. Jak už bylo zmíněno program je schopen pracovat se soubory formátu DXF.

3.5 Průběh experimentu

Nejdříve je zkušební součást zkonstruována v programu AutoCad. Následně je převedena do příslušného formátu DXF, se kterým pracuje program pro přípravu pálicího plánu. V programu WrykRys je vypracován pálicí plán součásti a následně odeslán do řídicího centra, které ovládá plazmové zařízení. Po odeslání programu jsou nastaveny parametry dělení, a to průtoky plynů, dělicí proud a rezná rychlost. Důležitou součástí přípravy před řezáním je volba a výměna správné pálicí sestavy. Po namontování správné sestavy do hořáku, je provedeno ustavení plechu na dělicí stůl. Následně je ustavený plech zaměřen pomocí plazmového hořáku. Jakmile je spuštěn pálicí program dojde k najetí hořáku a součást je vypálena. Po vychládnutí je odebrána z pálicího stolu. Následně se na součásti hodnotí otřepy a jejich odstranitelnost. Po provedení prvního zhodnocení je součást zbavena otřepů, očištěna a okartáčována. Po očištění součásti začíná měření rozměrové přesnosti a hodnocení jakosti dělené plochy výpalku podle příslušné normy. Naměřené hodnoty jsou zaneseny do grafů, tabulek a vyhodnoceny. Po vyhodnocení jsou spočítány náklady na výrobu součásti.

Při experimentu byly vypáleny čtyři stejné součásti různými parametry řezu. Jednotlivé zvolené parametry pro každou součást jsou uvedeny v následující kapitole 3.5.1. Tyto součásti jsou porovnány z hlediska jakosti dělené plochy, přesnosti a ekonomiky výpalku.

3.5.1 Parametry řezání pro jednotlivé součásti

Součást jedna je pálena optimálními podmínkami (obr. 27), které udává výrobce plazmového zařízení. Použitá pálicí sestava je 130 A. Řezné rychlosti jsou taktéž zvoleny a doregulovány na optimální kvalitu řezu. V tabulce 9.1 jsou uvedeny technické specifikace dělení první součásti.

Tab. 9.1 Parametry první součásti

Součást číslo 1		
Nastavované parametry dělení		Hodnota parametru
Druh plazmového plynu		Kyslík
Druh ochranného plynu		Vzduch
Předtok	Plazmový plyn	35 l·min ⁻¹
	Ochranný plyn	40 l·min ⁻¹
Řezný tok	Plazmový plyn	80 l·min ⁻¹
	Ochranný plyn	28 l·min ⁻¹
Nastavený proud		130 A
Napětí oblouku		135 V
Vzdálenost hořáku od obrobku		3,8 mm
Výchozí výška proražení		7,6 mm
Doba prodlevy proražení		0,7 sec
Kompenzace řezné spáry		2,3 mm
Řezná rychlost	Vnější kontury	1665 mm·min ⁻¹
	Vnitřní kontury	1100 mm·min ⁻¹
Získané parametry při dělení		
Délka pálení hořáku		963 mm
Počet zápalů		4
Čas dělení		40 sec
Celkový čas dělení		71 sec



Obr. 27 Součást 1

Pro pálení druhé součásti je zvolena taktéž 130 A pálící sestava (obr. 28). Řezné rychlosti jsou nastaveny na maximální výkon stroje tak, aby byl schopen požadovanou součást vypálit. Při použití maximálních rychlostí dojde k minimalizaci nákladů, a také strojního času potřebného k vypálení součásti. Negativním jevem při použití vysoké rychlosti je ovšem zhoršení jakosti děleného povrchu a přesnosti součásti. V tabulce 9. 2 jsou uvedeny technické specifikace dělení druhé součásti.

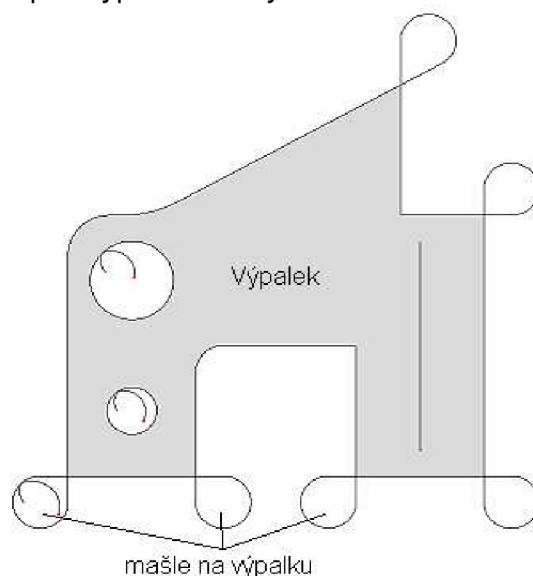
Tab. 9.2 Parametry druhé součásti

Součást číslo 2		
Nastavované parametry dělení		Hodnota parametru
Druh plazmového plynu		Kyslík
Druh ochranného plynu		Vzduch
Předtok	Plazmový plyn	35 l·min ⁻¹
	Ochranný plyn	40 l·min ⁻¹
Řezný tok	Plazmový plyn	80 l·min ⁻¹
	Ochranný plyn	28 l·min ⁻¹
Nastavený proud		130 A
Napětí oblouku		135 V
Vzdálenost hořáku od obrobku		3,8 mm
Výchozí výška proražení		7,6 mm
Doba prodlevy proražení		0,7 sec
Kompenzace řezné spáry		2,3 mm
Řezná rychlost	Vnější kontury	2045 mm·min ⁻¹
	Vnitřní kontury	1340 mm·min ⁻¹
Získané parametry při dělení		
Délka pálení hořáku		963 mm
Počet zápalů		4
Čas dělení		33 sec
Celkový čas dělení		64 sec



Obr. 28 Součást 2

Součást číslo tři, je jak předchozí dvě součásti vypálena 130 A pálící sestavou (obr. 30). Zvoleny jsou optimální podmínky řezání udávané výrobcem. Pro minimalizaci utavení ostrých vnějších rohů je provedena technologická úprava při řezání tzv. "mašle". Při tomto způsobu řezání paprsek nekopíruje vnější konturu rohu. Paprsek v ostrém rohu pokračuje ve směru dělení a řeže do odpadového materiálu. Následně v odpadovém materiálu vytvoří "mašlí" (rádius) a tečně najíždí na druhou hranu dělené součásti. Řez není přerušen a vzniká ostrý a neutavený vnější roh. Negativním jevem je zvýšení nákladů na výrobu součásti z důvodu prodloužení řezné délky a vzniku většího odpadového materiálu. V tabulce 9.3 jsou uvedeny technické specifikace dělení třetí součásti. Na obrázku 29 je vyobrazena technologická úprava pro vypálení ostrých rohů.



Obr. 29 Technologická úprava pomocí mašlí

Tab. 9.3 Parametry třetí součásti

Součást číslo 3		
Nastavované parametry dělení		Hodnota parametru
Druh plazmového plynu		Kyslík
Druh ochranného plynu		Vzduch
Předtok	Plazmový plyn	35 l·min ⁻¹
	Ochranný plyn	40 l·min ⁻¹
Řezný tok	Plazmový plyn	80 l·min ⁻¹
	Ochranný plyn	28 l·min ⁻¹
Nastavený proud		130 A
Napětí oblouku		135 V
Vzdálenost hořáku od obrobku		3,8 mm
Výchozí výška proražení		7,6 mm
Doba prodlevy proražení		0,7 sec
Kompenzace řezné spáry		2,3 mm
Řezná rychlost	Vnější kontury	1665 mm·min ⁻¹
	Vnitřní kontury	1100 mm·min ⁻¹
Získané parametry při dělení		
Délka pálení hořáku		1326 mm
Počet zápalů		4
Čas dělení		53 sec
Celkový čas dělení		81 sec



Obr. 30 Součást 3

Pro řezání čtvrté součásti je zvolena odlišná pálicí sestava, která používá plazmový plyn vzduch (obr. 31). Sestava je 130 A. Řezné rychlosti jsou zvoleny stejné, jak při optimálním pálení prvně zmiňované sestavy, která používá plazmový plyn kyslík. Při použití vzduchu jako plazmového plynu dojde ke snížení nákladů na výrobu součásti. Nevýhodou použití tohoto druhu

plazmy je ovšem nekvalitní řez, který lze použít pouze pro hrubé dělení a následné obrábění součásti. Zvolená rychlost dělení pro tento druh plazmy je příliš vysoká. K dosažení lepší kvality povrchu je nutné snížení řezné rychlosti. Tato rychlost ovšem byla zvolena záměrně, z důvodu ekonomického porovnání kyslíkové a vzduchové plazmy, aplikované při dělení konstrukčních ocelí. V tabulce 9. 4 jsou uvedeny technické specifikace dělení čtvrté součásti.

Tab. 9.4 Parametry čtvrté součásti

Součást číslo 4		
Nastavované parametry dělení		Hodnota parametru
Druh plazmového plynu		Vzduch
Druh ochranného plynu		Vzduch
Předtok	Plazmový plyn	20 l·min ⁻¹
	Ochranný plyn	40 l·min ⁻¹
Řezný tok	Plazmový plyn	70 l·min ⁻¹
	Ochranný plyn	30 l·min ⁻¹
Nastavený proud		130 A
Napětí oblouku		158 V
Vzdálenost hořáku od obrobku		3,3 mm
Výchozí výška proražení		6,6 mm
Doba prodlevy proražení		0,8 sec
Kompenzace řezné spáry		2,8 mm
Řezná rychlost	Vnější kontury	1665 mm·min ⁻¹
	Vnitřní kontury	1100 mm·min ⁻¹
Získané parametry při dělení		
Délka pálení hořáku		963 mm
Počet zápalů		4
Čas dělení		40 sec
Celkový čas dělení		72 sec



Obr. 31 Součást 4

3.6 Vyhodnocení součástí

Po zhotovení součástí a následném zchladnutí je provedeno první vyhodnocení vad a otřepů. Vyhodnocovány jsou otřepy, které vznikají na horní a dolní dělené hraně. Dále je vyhodnoceno přilnutí otřepů při jejich odstraňování. Získané údaje jsou uvedeny v tabulce 10. Vyhodnocované součástí jsou vyfoceny z horní i dolní strany na obrázcích 27 – 31.

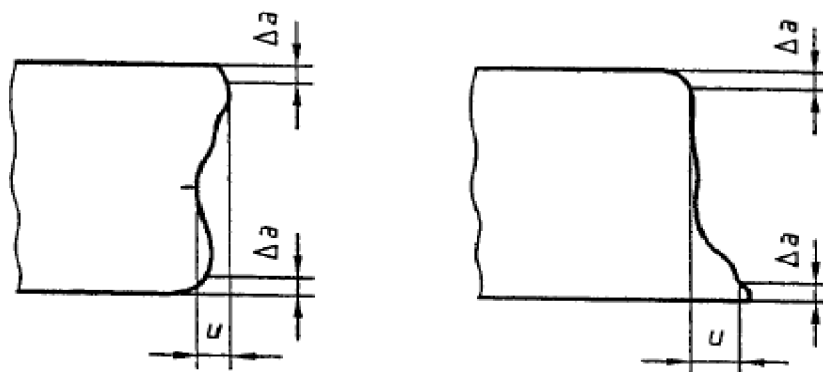
Tab. 10 Hodnocení vad

		Hodnocení otřepů			Jiné hrubé vady
		Otřepy	Vnější kontury	Vnitřní kontury	
Součást 1	Horní hrana	Výskyt	-	Minimální	Podpálené rohy
		Druh	-	Kapky	Odchylka na začátku dělení
		Odstranitelnost	-	Snadná - pilník	
	Dolní hrana	Výskyt	Minimální	Po celé délce	
		Druh	souvislé, hladké		
		Rozsah výšky	-	0,8 - 1,2 mm	
		Rozsah šířky	-	2 - 5,3 mm	
		Odstranitelnost	Snadná - pilník	Snadná - sekáč	
Součást 2	Horní hrana	Výskyt	Minimální		Podpálené rohy
		Druh	Kapky		Odchylka na začátku dělení
		Odstranitelnost	Snadná - pilník		
	Dolní hrana	Výskyt	Občasný	Po celé délce	Vyhlobení dělené plochy
		Druh	Souvislé, hladké	Souvislé, ostré	
		Rozsah výšky	0,5 - 1 mm	1 - 2,3 mm	
		Rozsah šířky	1 - 2,2 mm	2,5 - 6,5 mm	
		Odstranitelnost	Snadná - pilník	Střední - sekáč	
Součást 3	Horní hrana	Výskyt	-	Minimální	Místní odchylky dělení
		Druh	-	Souvislé, ostré	
		Odstranitelnost	-	Snadná - pilník	
	Dolní hrana	Výskyt	Občasný	Po celé délce	
		Druh	Kapky	Souvislé, hladké	
		Rozsah výšky	-	1 - 1,8 mm	
		Rozsah šířky	-	3 - 7,5 mm	
		Odstranitelnost	Snadná - pilník	Snadná - sekáč	
Součást 4	Horní hrana	Výskyt	Občasný	Po celé délce	Nepravidelné tvary
		Druh	Souvislé, ostré		
		Odstranitelnost	Snadná - sekáč		
	Dolní hrana	Výskyt	Po celé délce	Občasný	Místní odchylky dělení
		Druh	Souvislé, ostré		
		Rozsah výšky	1,5 - 3 mm	0,8 - 1,6 mm	Podpálené rohy
		Rozsah šířky	0,8 - 4 mm	1,2 - 4,4 mm	Odchylky úhlů
		Odstranitelnost	Těžká - sekáč, bruska		Nepředělení součástí

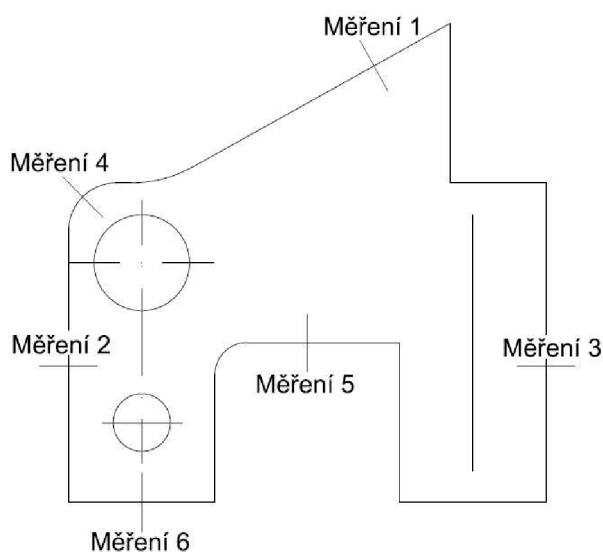
3.6.1 Vyhodnocení součástí podle normy ČSN EN ISO 9013

Úchylka kolmosti u – se vyhodnocuje na omezené oblasti plochy řezu. Oblast je zmenšena o hodnotu Δa , jak je uvedeno na obrázku 32. Norma ISO 9013 uvádí hodnotu $\Delta a = 1$ mm pro tloušťky řezu od 10 do 20 mm. Vzdálenost úchylky u , je měřena mezi dvěma rovnoběžnými přímkami. Přímky jsou umístěny od sebe tak, aby pojaly celý měřený povrch. Úhel přímek a povrchu materiálu je 90° .

Měřicí místa jsou rozmístěna po celé dělené ploše součásti, tak jak je znázorněno na obrázku 33. Měření úchylky je provedeno pomocí číselníkového úchylkoměru, který je uchycen do magnetického stojánku. Stojánek je připevněn k rámu frézky. Součást je upevněna do svěráku, který je přimontovaný ke stolu frézky. Stůl frézky zabezpečuje přesné vedení ve směru tloušťky materiálu. Při přejetí ve směru tloušťky materiálu je odečtena největší úchylka, která je zapsána do tabulky 12. Po změření všech bodů je maximální úchylka u_{\max} porovnána s hodnotou úchylky u (podle normy ČSN EN ISO 9013) a zařazena do tolerančního pole (tab. 11). Při měření je použit číselníkový úchylkoměr Somet, který má rozsah měření 0 – 3 mm a dělení 0,01 mm [11].



Obr. 32 Měření úchylky kolmosti [11]



Obr. 33 Měřicí místa

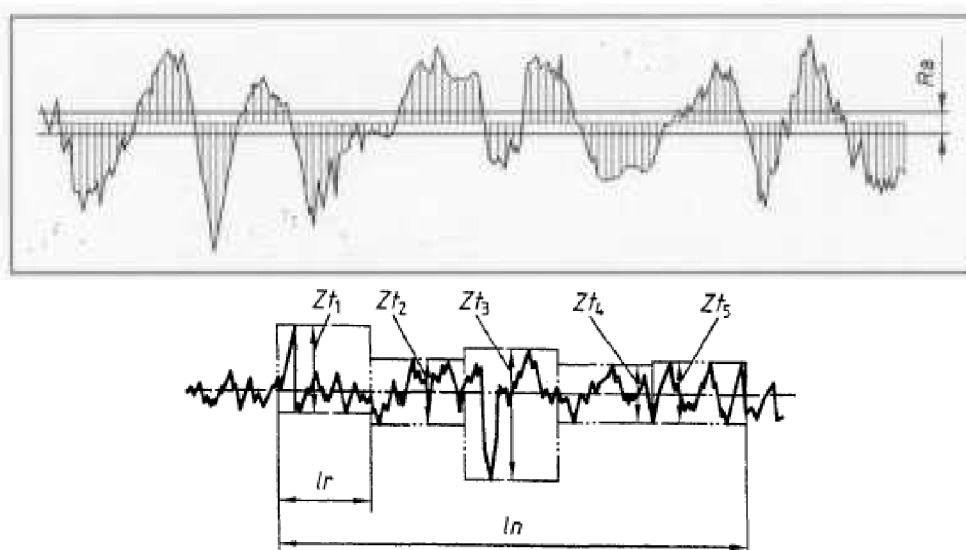
Tab. 11 Toleranční pole a úchytky podle ISO 9013 [11]

Toleranční pole	Úchylka kolmosti u [mm]	Hodnota úchytky u , ($a = 15$ mm)
1	$0,05 + 0,003 \cdot a$	0,095
2	$0,15 + 0,007 \cdot a$	0,255
3	$0,4 + 0,01 \cdot a$	0,55
4	$0,8 + 0,02 \cdot a$	1,1
5	$1,2 + 0,035 \cdot a$	1,725

Tab. 12 Úchytky kolmosti u

Měření úchylek kolmosti u [mm], ($\Delta a = 1$ mm)									
Součást č.	u_1	u_2	u_3	u_4	u_5	u_6	u_{max}	u	Tol. pole
1	0,39	0,29	0,42	0,14	0,15	0,32	0,42	0,55	3
2	0,41	0,37	0,49	0,48	0,19	0,45	0,49	0,55	3
3	0,48	0,20	0,47	0,16	0,52	0,28	0,52	0,55	3
4	0,45	0,67	1,54	0,04	0,28	0,96	1,54	1,73	5

Průměrná výška prvků profilu R_z – je měřena pomocí elektrického dotykového přístroje Mahr Perthometer M2. Přístrojem je dále změřena průměrná aritmetická úchylka prvků profilu R_a . Schéma měření R_z a R_a ukazuje obrázek 34. K měření je použita pouze součást 3, která vzhledově vykazuje nejlepší integritu povrchu. Ostatní součásti a jejich profily jsou porovnány s tímto měřeným etalonem. Od měření součásti 1, 2 a 4 je upuštěno z důvodu horší integrity povrchu. Při měření těchto součástí by mohlo dojít k poškození hrotu přístroje. Měřicí místa jsou uvedena na obrázku 35. Norma ISO 9013 uvádí měřicí místa umisťovat ve $2/3$ tloušťky materiálu od horní hrany. V tomto místě vykazují výpalky zpravidla nejhorší reliéf povrchu. Naměřené a odhadnuté hodnoty jsou uvedeny v tabulce 13.

Obr. 34 Schéma měření R_a , R_z [12], [11]

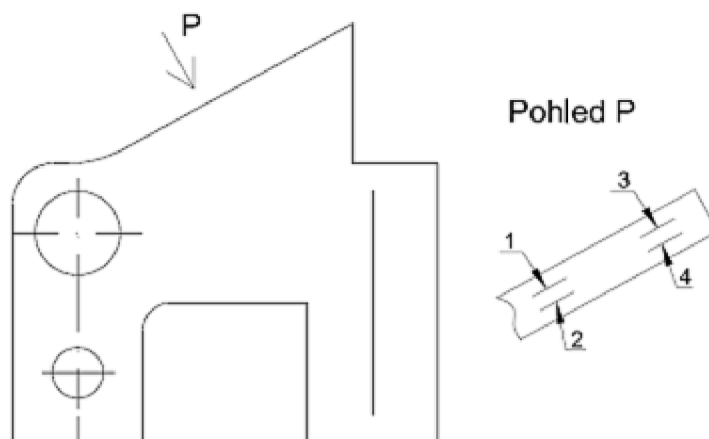
Kde:

R_a – průměrná aritmetická úchylka prvků profilu [μm],

$Z_{t_1} - Z_{t_5}$ charakterizuje jednotlivé prvky profilu [μm],

l_n – celková vyhodnocovaná délka ($l_n = 5,6 \text{ mm}$),

l_r – základní délka ($l_r = 0,8 \text{ mm}$).



Obr. 35 Měřicí místa

Tab. 13 Hodnoty R_a , R_z

Měření profilu třetí součásti R_z , R_a		
Měření	R_z [μm]	R_a [μm]
1	6,10	1,566
2	4,04	0,838
3	8,47	1,880
4	3,83	0,735

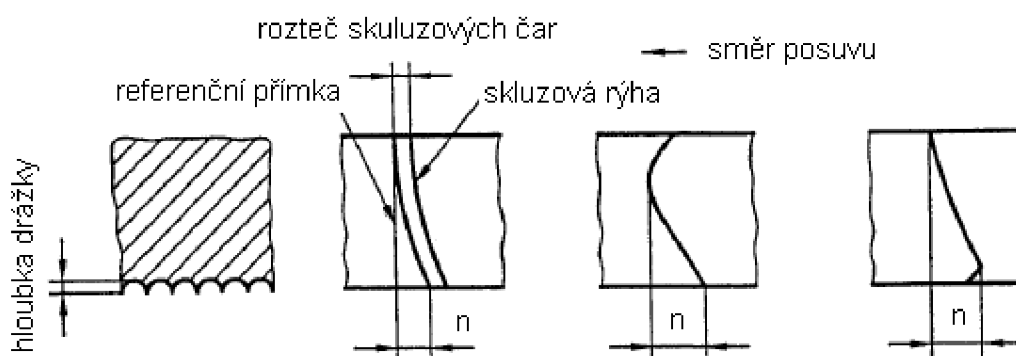
Porovnání součástí 1, 2, 4		
Součást	R_z [μm]	R_a [μm]
1	10 ÷ 15	2 ÷ 3,2
2	13 ÷ 18	2 ÷ 3,2
4	40 ÷ 60	5 ÷ 7

Porovnávané hodnoty jsou brány ve 2/3 tloušťky materiálu od horní hrany tam, kde jsou hodnoty největší. Dále jsou největší hodnoty $R_{z_{\max}}$ porovnány s hodnotami normy ISO 9013 a zařazeny do tolerančních polí (tab. 14).

Tab. 14 Porovnání hodnoty s normou [11]

Toleranční pole	Průměrná výška prvků profilu R_z [μm]	Hodnota R_z [μm], pro $a = 15 \text{ mm}$	Součást číslo	$R_{z_{\max}}$ [μm]	Toleranční pole
1	10 + (0,6a mm)	19	1	15	1
2	40 + (0,8a mm)	52	2	18	1
3	70 + (1,2a mm)	88	3	8,47	1
4	110 + (1,8a mm)	137	4	60	3

Skruz n – jak uvádí norma ISO 9013 je průmět vzdálenosti mezi dvěma body skluzové rýhy ve směru řezání [11]. Na obrázku 36 je znázorněné schéma měření skluzu. Součást je orýsována pomocí příložného úhelníku a vzdálenost n je změřena digitálním posuvným měřítkem. Měřící místa jsou zvolena tři na každé součásti. Tyto místa jsou znázorněna na obrázku 33 a to měření 1, 2, 3. Jak uvádí norma, u tohoto hrubého měření vzniká mezní hodnota chyby měření 0,2 mm. Proto je měření bráno spíše jako orientační. Naměřené hodnoty jsou zaneseny do tabulky 15 a převedeny na úhel skluzu [11].



Obr. 36 Schéma měření skluzu [11]

Tab. 15 Naměřené hodnoty n

Měření skluzu n [mm]					
Součást č.	n_1	n_2	n_3	n_{max}	Úhel skluzu [°]
1	1,1	1	1,3	1,3	4° 60'
2	5,6	2,1	3,3	5,6	20° 30'
3	1	1,1	1,1	1,1	4° 10'
4	4,5	3,4	5,7	5,7	20° 50'

Na vzorcích 1 a 3 vzniká správný úhel skluzu a taktéž správný reliéf dělené plochy, jak je popisováno v kapitole 2.3.1. (obr. 16a). Linie řezu je zpravidla souvislá rovná, ovšem na některých plochách se vyskytuje i nesouvislá linie řezu (obr. 16c).

Na vzorcích 2 a 4 je úhel skluzu příliš velký a linie řezu odpovídá obrázkům 16b, c.

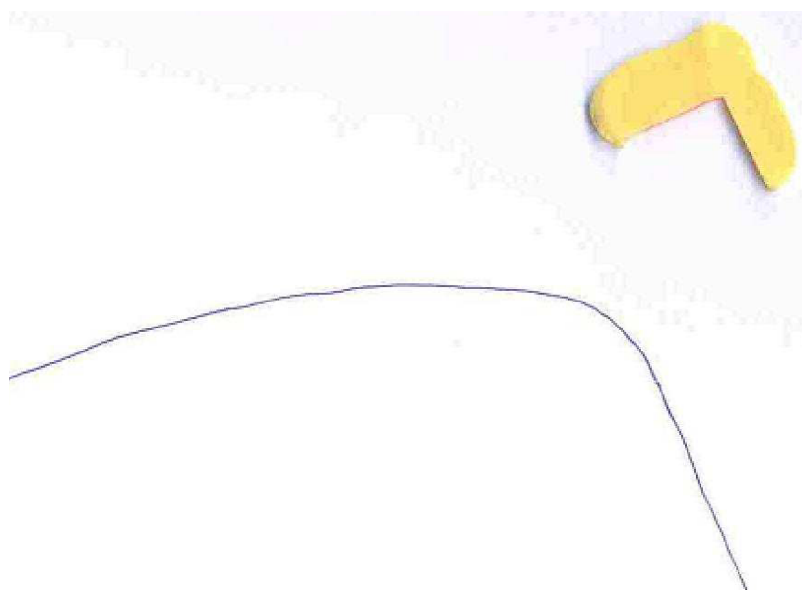
Natavení horní hrany r – specifikuje ostrost horní hrany dělené plochy. O této vadě pojednává kapitola 2.4.2. Měření poloměru zaoblení se zpravidla provádí pomocí měrek poloměrů zaoblení. K dispozici byly měrky R1 – R8, bohužel poloměr měrek přesahoval skutečný poloměr natavení hrany. Poloměr natavení lze dále měřit pomocí speciálního přístroje pro snímání profilu horní hrany.

Měření profilu horní hrany je měřeno pouze na vzorku 2, z důvodu složitosti a pracnosti měření. Příprava měření začíná vybráním vhodné hrany k měření. Na vybranou hranu je nanášena zubařská otiskovací hmota, která vytvoří negativní profil hrany (obr. 37). Po ztuhnutí je otiskovací hmota

oddělena od součásti a následně jsou vytvořeny kolmé řezy, které slouží ke změření poloměru horní hrany. Vybraný řez je umístěn na profilprojektor, kde je profil natavené hrany 50x zvětšen a poté obkreslen (obr. 38). Obkreslený profil je porovnáván s kružnicemi. Kontura profilu nejvíce odpovídá kružnici o poloměru R22,5 při 50 násobném zvětšení. Ve skutečné velikosti je tedy natavení horní hrany r rovno hodnotě 0,45 mm.

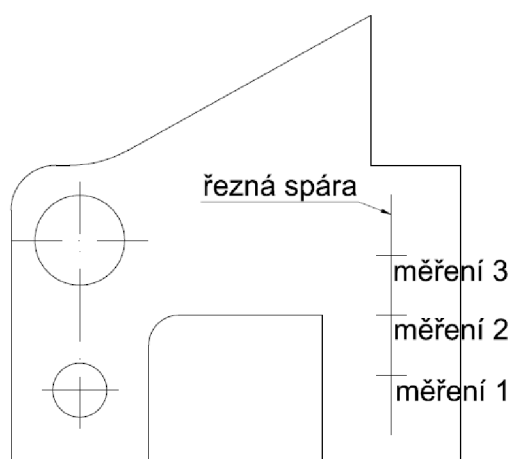


Obr. 37 Nanesená otiskovací hmota



Obr. 38 Vytvořený řez a profil natavené hrany

Šířka řezné spáry s – je podle normy ISO 9013, vzdálenost mezi povrchy řezu na horní hraně řezu, nebo pokud došlo k natavení horní hrany, bezprostředně pod tímto natavením hrany [11]. Ke změření šířky řezné spáry je na součásti proveden její prořez (obr. 39). Na každé součásti jsou provedeny tři měření (obr. 39). Z těchto měření je pomocí aritmetického průměru vypočítána výsledná šířka řezné spáry (tab. 16). Měření je provedeno digitálním posuvným měřítkem Extol. Rozsah měření je 0 – 150 mm, rozlišitelnost 0,01 mm, přesnost 0,03 mm.

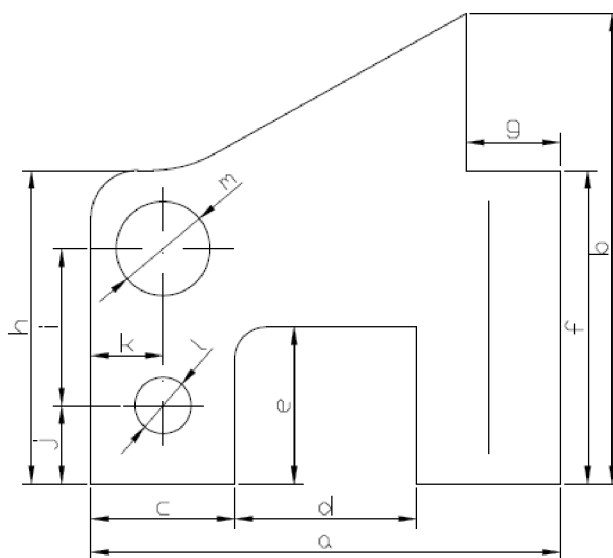


Obr. 39 Schéma měření řezné spáry

Tab. 16 Měření šířky řezné spáry

Číslo součásti	Měření 1 [mm]	Měření 2 [mm]	Měření 3 [mm]	Šířka řezné spáry s (arit. průměr) [mm]
1	3,60	3,63	3,55	3,59
2	3,38	3,31	3,32	3,34
3	3,37	3,35	3,37	3,36
4	3,03	2,92	2,98	2,98

Úchyly jmenovitých rozměrů součástí – jsou jednotlivě měřeny pro každou součást. Měřené rozměry jsou vyobrazeny na obrázku 40. Do tabulek 17 jsou zaneseny a porovnány se jmenovitými rozměry. Následně je odečtena úchylka a porovnána s tolerančními poli pro mezní úchyly jmenovitých rozměrů (ISO 9013). Podle normy jsou vzorky zařazeny do třídy přesnosti, které odpovídají. Měření je provedeno digitálním posuvným měřítkem Extol. Rozsah měření je 0 – 150 mm, rozlišitelnost 0,01 mm, přesnost 0,03 mm.



Obr. 40 Schéma měření vybraných jmenovitých rozměrů

Tab. 17a Měření úchylek vybraných rozměrů

Součást číslo 1					
Rozměř	Jmenovitá hodnota [mm]	Naměřená hodnota [mm]	Skutečná úchylka [mm]	Mezní úchylka [mm]	Toleranční třída [mm]
a	150,00	149,83	-0,17	± 0,8	1
b	150,00	149,09	-0,91	± 1,9	2
c	46,00	45,87	-0,13	± 0,7	1
d	58,00	57,94	-0,06	± 0,7	1
e	50,00	49,80	-0,20	± 0,7	1
f	100,00	100,07	0,07	± 0,7	1
g	30,00	30,01	0,01	± 0,7	1
h	100,00	99,91	-0,09	± 0,7	1
i	50,00	49,49	-0,51	± 0,7	1
j	25,00	24,59	-0,41	± 0,7	1
k	23,00	22,70	-0,30	± 0,7	1
l	18,00	17,28	-0,72	± 1,8	2
m	30,00	29,25	-0,75	± 1,8	2

Tab. 17b Měření úchylek vybraných rozměrů

Součást číslo 2					
Rozměř	Jmenovitá hodnota [mm]	Naměřená hodnota [mm]	Skutečná úchylka [mm]	Mezní úchylka [mm]	Toleranční třída [mm]
a	150,00	150,78	0,78	± 0,8	1
b	150,00	149,13	-0,87	± 1,9	2
c	46,00	46,62	0,62	± 0,7	1
d	58,00	57,28	-0,72	± 1,8	2
e	50,00	49,75	-0,25	± 0,7	1
f	100,00	100,23	0,23	± 0,7	1
g	30,00	29,47	-0,53	± 0,7	1
h	100,00	100,05	0,05	± 0,7	1
i	50,00	49,56	-0,44	± 0,7	1
j	25,00	24,75	-0,25	± 0,7	1
k	23,00	22,64	-0,36	± 0,7	1
l	18,00	16,61	-1,39	± 1,8	2
m	30,00	29,46	-0,54	± 0,7	1

Tab. 17c Měření úchylek vybraných rozměrů

Součást číslo 3					
Rozměř	Jmenovitá hodnota [mm]	Naměřená hodnota [mm]	Skutečná úchylka [mm]	Mezní úchylka [mm]	Toleranční třída [mm]
a	150,00	150,16	0,16	± 0,8	1
b	150,00	150,32	0,32	± 0,8	1
c	46,00	46,31	0,31	± 0,7	1
d	58,00	57,65	-0,35	± 0,7	1
e	50,00	50,04	0,04	± 0,7	1
f	100,00	100,46	0,46	± 0,7	1
g	30,00	30,37	0,37	± 0,7	1
h	100,00	100,16	0,16	± 0,7	1
i	50,00	49,82	-0,18	± 0,7	1
j	25,00	24,83	-0,17	± 0,7	1
k	23,00	23,14	0,14	± 0,7	1
l	18,00	17,01	-0,99	± 1,8	2
m	30,00	29,19	-0,81	± 1,8	2

Tab. 17d Měření úchylek vybraných rozměrů

Součást číslo 4					
Rozměř	Jmenovitá hodnota [mm]	Naměřená hodnota [mm]	Skutečná úchylka [mm]	Mezní úchylka [mm]	Toleranční třída [mm]
a	150,00	150,28	0,28	± 0,8	1
b	150,00	150,39	0,39	± 0,8	1
c	46,00	46,89	0,89	± 1,8	2
d	58,00	57,12	-0,88	± 1,8	2
e	50,00	51,18	1,18	± 1,8	2
f	100,00	101,34	1,34	± 1,8	2
g	30,00	29,82	-0,18	± 0,7	1
h	100,00	99,89	-0,11	± 0,7	1
i	50,00	50,48	0,48	± 0,7	1
j	25,00	24,42	-0,58	± 0,7	1
k	23,00	22,53	-0,47	± 0,7	1
l	18,00	15,85	-2,15	-	3
m	30,00	29,08	-0,92	± 1,8	2

3.7 Shrnutí

Jakost povrchu řezu nejvíce popisují veličiny: úchylka kolmosti n a průměrná výška profilu Rz . Mezi další doplňující veličiny, které popisují dělenou plochu, se řadí skluz n , natavení horní hrany r a výskyt okují. Nedílnou součástí vyhodnocování výpalků je i rozměrová přesnost. Technologie výroby každé součásti je odlišná, proto jsou výsledky vyhodnocování u jednotlivých součástí různé. Součást 1 je vyrobena při optimální řezné rychlosti. Součást 2 je vyrobena maximální řeznou rychlostí. Součást 3 má optimální řeznou rychlost a je dbáno na ostrost vnějších rohů (mašle). Součást 4 je vypálena pomocí plazmového plynu vzduchu (pro dělení konstrukčních ocelí se plazmový plyn vzduch takřka nepožívá, z důvodu menší přesnosti a jakosti vyrobených součástí).

Po vypálení součástí jsou nejdříve odstraněny otřepy a okuje. Všechny otřepy jsou odstraněny pomocí sekáče. Drobné vady na dělených hranách jsou obroušeny pomocí úhlové brusky. Nejčastější výskyt otřepů je na hranách pálených děr.

Při vyhodnocování jsou nejdříve měřeny úchyly kolmosti. Úchylka kolmosti vyšla u prvních tří součástí do třetího tolerančního pole, pouze u součásti 4 do pátého tolerančního pole.

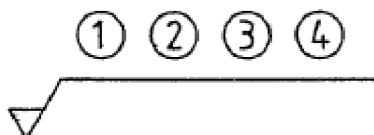
Při měření průměrné výšky profilu je měřena pouze součást 3 a zbývající součásti jsou podle ní porovnány. Naměřené hodnoty jsou překvapivě přesné. Součást 1 až 3 odpovídají tolerančnímu poli 1, pouze součást 4 odpovídá tolerančnímu poli 3.

Další měřenou veličinou je skluz. Pro součásti 1 a 3 odpovídá naměřený skluz (úhel) správně nastaveným parametrům dělení. Pro součásti 2 a 4 nabývá úhel skluzu vysokých hodnot, což je důsledek vysoké rychlosti dělení.

Jako doplňující veličiny jsou měřeny hodnoty poloměru natavení horní hrany a šířka řezné spáry. Poloměr natavení je měřen na součásti 2 a jeho hodnota nemá podstatný vliv na geometrii řezné hrany. Šířka dělicí mezery přibližně odpovídá teoretické hodnotě, kterou udává výrobce stroje.

Poslední vyhodnocení součástí je měření úchylek rozměrů. Všechny součásti odpovídají druhé toleranční třídě. Ovšem většina měřených rozměrů na součástech odpovídá první třídě. Druhé toleranční třídě odpovídají především průměry děr a rozměry měřené na hrany, které jsou utaveny. U součásti 4, měřený rozměr l , odpovídá stupni 3 z důvodu vady na dělené hraně. Vada je způsobena vysokou dělicí rychlostí a vznikla pouze na této ploše. Proto je součást taktéž zařazena do zmiňovaného druhého stupně přesnosti.

Značení rozměrové přesnosti a jakosti povrchu řezu na výkresech udává norma ISO 9013. Toto značení je prováděno pomocí značky (obr. 41), která se vyobrazuje na výkresu součásti [11].

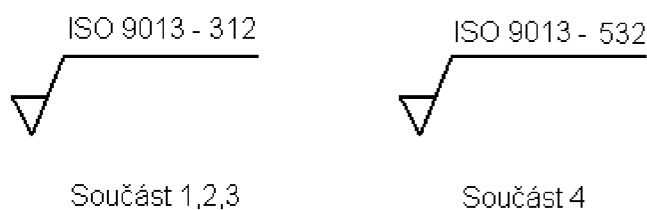


Obr. 41 Značka na výkresu [11]

Kde [11]:

- 1 – označení čísla této mezinárodní normy,
- 2 – označení úchylky kolmosti u (toleranční pole),
- 3 – označení průměrné výšky prvků profilu Rz (toleranční pole),
- 4 – označení toleranční třídy (rozměrová přesnost).

Výsledná jakost řezu a rozměrová přesnost pro všechny součásti je uvedena na obrázku 42.



Obr. 42 Značka pro součásti 1 - 4

4 TECHNICKO-EKONOMICKÉ VYHODNOCENÍ

Technicko-ekonomické vyhodnocení zahrnuje výpočet investičních nákladů, z kterých se stanovují hodinové náklady pracoviště. Následně je proveden výpočet nákladů vyráběných součástí.

4.1 Investiční a provozní náklady

Do investičních a provozních nákladů jsou zahrnuty náklady na pořízení plazmového centra, filtrační jednotky a softwaru pro jeho ovládání. Nedílnou součástí těchto nákladů je montáž stroje, jeho uvedení do provozu, garanční servisy a školení obsluhy. Investiční náklady jsou uvedeny v tabulce 18a. Dále je z těchto nákladů vypočítána hodinová fixní sazba (tab. 18b) a hodinové náklady pracoviště (tab. 18c). Údaje potřebné k výpočtu jsou dodané firmou Alweco s.r.o. a další výpočty jsou prováděny pro konkrétní případ této firmy.

Tab. 18a Investiční náklady

Náklady	Cena [Kč]
Plazmový zdroj	1 262 500
Pálící CNC stroj	1 141 500
Filtrační jednotka	385 500
Software WrykRys	35 000
Montáž, školení, doprava	38 000
Ostatní náklady	50 000
Investiční náklady celkem	2 912 500

Hodinové fixní náklady jsou vypočítány z celkových investičních nákladů a dalších položek jako jsou pronájmy prostor a servisy. Investiční náklady jsou rozpočítány na pět roků odpisového období, a tak vznikají roční fixní náklady pracoviště. Z ročních fixních nákladů jsou vypočítány hodinové fixní náklady (tab. 18b). Pracoviště vyrábí v jednosměnném provozu. Při zahrnutí přesčasových hodin je směnnost 1,2. Využití stroje je 80% z pracovních hodin.

Tab. 18b Hodinové fixní náklady

Celkové investiční náklady	2 912 500	Kč
Odpisové období	5	roků
Roční odpis	582 500	Kč·rok ⁻¹
Roční úrok (5%)	29 125	Kč·rok ⁻¹
Servis, údržba (5%)	29 125	Kč·rok ⁻¹
Pronájem haly	150 000	Kč·rok ⁻¹
Roční fixní náklady	790 750	Kč·rok ⁻¹
Směnnost	1,2	
Pracovní hodiny	2 200	hod·rok ⁻¹
Využití stroje	80	%
Výrobní hodiny	1 760	hod·rok ⁻¹
Hodinové fixní náklady	449	Kč·hod ⁻¹

Hodinové náklady pracoviště se skládají ze tří základních složek, a to ze strojních nákladů, mzdových nákladů a režii (tab. 18c). Mezi strojní náklady jsou zahrnuty fixní náklady a náklady, které přímo souvisí s výrobou. Do mzdových nákladů je započítán plat obsluhy a programátora, který vytváří pálicí plány polovinu pracovní doby. Do režii jsou zahrnuty veškeré nevýrobní náklady, vyjma pronájmů a servisů stroje. Ve firmě Alweco s.r.o. tvoří režie 13% z celkového ročního obrátu. Režie tedy tvoří tyto položky: náklady na skladování a manipulaci s materiálem, náklady na vytápění, osvětlení a provoz haly a náklady na technicko-hospodářské pracovníky.

Tab. 18c Hodinové náklady pracoviště

Strojní náklady	Hodinové fixní náklady	449	Kč·hod ⁻¹
	Energie, plyny	180	
	Náklady na opotřebení	150	
	Manipulace, očištění	40	
Strojní náklady celkem		819	
Mzdové náklady	Obsluha	120	
	Programátor (0,5 hod.)	60	
	Pojištění a daně	63	
Mzdové náklady celkem		243	
Strojní + mzdové náklady		1062	
Režie (13%)*		139	
Hodinové náklady pracoviště		1201	

* Režie jsou počítány z celkového ročního obrátu firmy a tvoří část 13% z celku.

Hodinové náklady pracoviště jsou vypočítány poměrně vysoké. K radikálnímu snížení nákladů může dojít, pokud by firmy získala takový objem zakázek, aby mohla zavést vícesměnný provoz. Tím mohou klesnout hodinové fixní náklady a zároveň hodinové náklady pracoviště až o 270,- Kč. Hodinové náklady pracoviště při zavedení třisměnného provozu činí 931,- Kč.

4.2 Stanovení ceny

Při stanovování ceny součásti se nejdříve vypočítají náklady na metr řezu. Do těchto nákladů se započítávají veškeré položky, které jsou uvedeny v tabulkách 20. V tabulce 19 lze pozorovat závislost nákladů na propal podle tloušťky materiálu.

Dále je důležité stanovit náklady na materiál, které se vypočítají pomocí spotřeby materiálu na vyráběný kus či sérii kusů. Cena materiálu se zpravidla uvádí vztažená na hmotnost.

Nedílnou součástí ceny výrobku je také stanovení zisku, který se pohybuje 5 – 30% z výše uvedených nákladů.

Tab. 19 Náklady na propal

Tloušťka mat. [mm]	0 ÷ 8	8 ÷ 12	12 ÷ 20	20 ÷ 35	35 ÷ 50
Náklady na propal [Kč]	1	2	3	4	5

4.2.1 Cena výroby součásti

Tab. 20a Cena součásti 1

Tloušťka materiálu		15,00	mm
Řezná rychlost		1665,00	mm·min ⁻¹
		99,90	m·hod ⁻¹
Fixní náklady	Hodinové	449,00	Kč·hod ⁻¹
	Jednotkové	4,49	Kč·m ⁻¹
Mzdové náklady	Hodinové	243,00	Kč·hod ⁻¹
	Jednotkové	2,43	Kč·m ⁻¹
Režijní náklady	Hodinové	139,00	Kč·hod ⁻¹
	Jednotkové	1,39	Kč·m ⁻¹
Plazmový plyn (Kyslík - láhev)	Náklady	60,93	Kč·m ⁻³
	Spotřeba	80,00	l·min ⁻¹
	Spotřeba na jednotku	48,05	l·m ⁻¹
	Náklady na jednotku	2,93	Kč·m ⁻¹
Ochranný plyn (Vzduch - kompresor, spotřeba pouze el. energie)	Náklady	0,00	Kč·m ⁻³
	Spotřeba	28,00	l·min ⁻¹
	Spotřeba na jednotku	16,82	l·m ⁻¹
	Náklady na jednotku	0,00	Kč·m ⁻¹
Energie	Celková el. energie	45,00	kW
	Jednotková energie	0,45	kWh·m ⁻¹
	Cena energie	5,00	Kč·kWh ⁻¹
	Jednotkové náklady	2,25	Kč·m ⁻¹
Spotřební díly	Cena pálicí sestavy	1200,00	Kč
	Životnost	4,00	hod
	Jednotkové náklady	3,00	Kč·m ⁻¹
Propaly	Prům. jednotkový počet	2,50	m ⁻¹
	Náklad na propal	3,00	Kč
	Celkové náklady	7,50	Kč·m ⁻¹
Korekce rychlosti (vnitřní kontury)		3,00	Kč·m ⁻¹
Předfuk a dofuk plynů		0,80	Kč·m ⁻¹
Náklady vztahované na metr řezu		27,80	Kč·m ⁻¹
Skutečná délka řezu součásti		0,963	m
Náklady na vypálení součásti		26,77	Kč
Cena materiálu		16,90	Kč·kg ⁻¹
Hmotnost polotovaru (160 x 160)		2,99	kg
Cena materiálu na součást		50,531	Kč
Zisky (15% náklady + materiál)		11,60	Kč
Konečná cena součásti		88,90	Kč

Tab. 20b Cena součásti 2

Tloušťka materiálu		15,00	mm
Řezná rychlost		2045,00	mm·min ⁻¹
		122,70	m·hod ⁻¹
Fixní náklady	Hodinové	449,00	Kč·hod ⁻¹
	Jednotkové	3,66	Kč·m ⁻¹
Mzdové náklady	Hodinové	243,00	Kč·hod ⁻¹
	Jednotkové	1,98	Kč·m ⁻¹
Režijní náklady	Hodinové	139,00	Kč·hod ⁻¹
	Jednotkové	1,13	Kč·m ⁻¹
Plazmový plyn (Kyslík - láhev)	Náklady	60,93	Kč·m ⁻³
	Spotřeba	80,00	l·min ⁻¹
	Spotřeba na jednotku	39,12	l·m ⁻¹
	Náklady na jednotku	2,38	Kč·m ⁻¹
Ochranný plyn (Vzduch - kompresor, spotřeba pouze el. energie)	Náklady	0,00	Kč·m ⁻³
	Spotřeba	28,00	l·min ⁻¹
	Spotřeba na jednotku	13,69	l·m ⁻¹
	Náklady na jednotku	0,00	Kč·m ⁻¹
Energie	Celková el. energie	45,00	kW
	Jednotková energie	0,37	kWh·m ⁻¹
	Cena energie	5,00	Kč·kWh ⁻¹
	Jednotkové náklady	1,83	Kč·m ⁻¹
Spotřební díly	Cena pálicí sestavy	1200,00	Kč
	Životnost	4,00	hod
	Jednotkové náklady	2,44	Kč·m ⁻¹
Propaly	Prům. jednotkový počet	2,50	m ⁻¹
	Náklad na propal	3,00	Kč
	Celkové náklady	7,50	Kč·m ⁻¹
Korekce rychlosti (vnitřní kontury)		3,00	Kč·m ⁻¹
Předfuk a dofuk plynů		0,80	Kč·m ⁻¹
Náklady vztažené na metr řezu		24,73	Kč·m ⁻¹
Skutečná délka řezu součásti		0,963	m
Náklady na vypálení součásti		23,82	Kč
Cena materiálu		16,90	Kč·kg ⁻¹
Hmotnost polotovaru (160 x 160)		2,99	kg
Cena materiálu na součást		50,531	Kč
Zisky (15% náklady + materiál)		11,15	Kč
Konečná cena součásti		85,50	Kč

Tab. 20c Cena součásti 3

Tloušťka materiálu		15,00	mm
Řezná rychlost		1665,00	mm·min ⁻¹
		99,90	m·hod ⁻¹
Fixní náklady	Hodinové	449,00	Kč·hod ⁻¹
	Jednotkové	4,49	Kč·m ⁻¹
Mzdové náklady	Hodinové	243,00	Kč·hod ⁻¹
	Jednotkové	2,43	Kč·m ⁻¹
Režijní náklady	Hodinové	139,00	Kč·hod ⁻¹
	Jednotkové	1,39	Kč·m ⁻¹
Plazmový plyn (Kyslík - láhev)	Náklady	60,93	Kč·m ⁻³
	Spotřeba	80,00	l·min ⁻¹
	Spotřeba na jednotku	48,05	l·m ⁻¹
	Náklady na jednotku	2,93	Kč·m ⁻¹
Ochranný plyn (Vzduch - kompresor, spotřeba pouze el. energie)	Náklady	0,00	Kč·m ⁻³
	Spotřeba	28,00	l·min ⁻¹
	Spotřeba na jednotku	16,82	l·m ⁻¹
	Náklady na jednotku	0,00	Kč·m ⁻¹
Energie	Celková el. energie	45,00	kW
	Jednotková energie	0,45	kWh·m ⁻¹
	Cena energie	5,00	Kč·kWh ⁻¹
	Jednotkové náklady	2,25	Kč·m ⁻¹
Spotřební díly	Cena pálicí sestavy	1200,00	Kč
	Životnost	4,00	hod
	Jednotkové náklady	3,00	Kč·m ⁻¹
Propaly	Prům. jednotkový počet	2,50	m ⁻¹
	Náklad na propal	3,00	Kč
	Celkové náklady	7,50	Kč·m ⁻¹
Korekce rychlosti (vnitřní kontury)		3,00	Kč·m ⁻¹
Předfuk a dofuk plynů		0,80	Kč·m ⁻¹
Náklady vztažené na metr řezu		27,80	Kč·m ⁻¹
Skutečná délka řezu součásti		1,326	m
Náklady na vypálení součásti		36,86	Kč
Cena materiálu		16,90	Kč·kg ⁻¹
Hmotnost polotovaru (190 x 190)		4,22	kg
Cena materiálu na součást		71,318	Kč
Zisky (15% náklady + materiál)		16,23	Kč
Konečná cena součásti		124,41	Kč

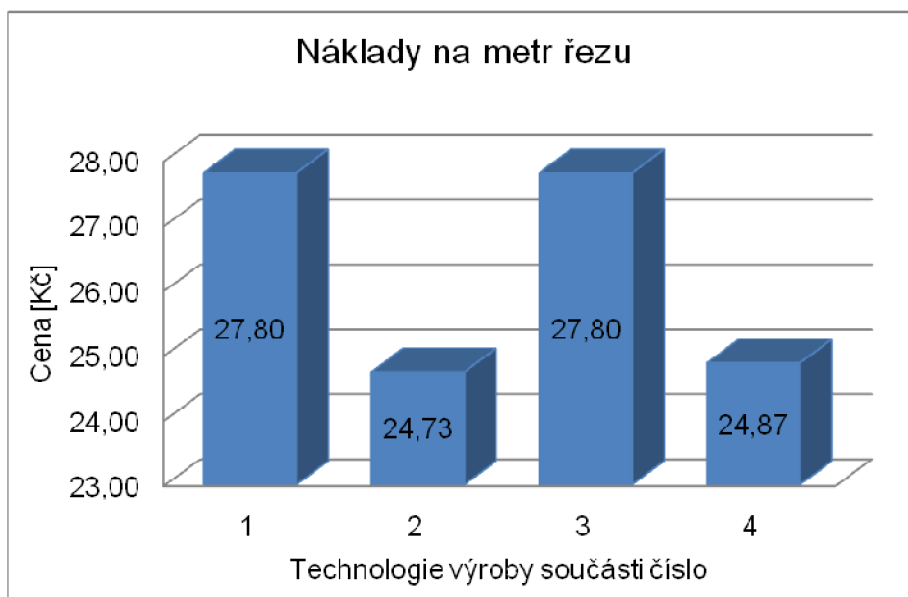
Tab. 20d Cena součásti 4

Tloušťka materiálu		15,00	mm
Řezná rychlost		1665,00	mm·min ⁻¹
		99,90	m·hod ⁻¹
Fixní náklady	Hodinové	449,00	Kč·hod ⁻¹
	Jednotkové	4,49	Kč·m ⁻¹
Mzdové náklady	Hodinové	243,00	Kč·hod ⁻¹
	Jednotkové	2,43	Kč·m ⁻¹
Režijní náklady	Hodinové	139,00	Kč·hod ⁻¹
	Jednotkové	1,39	Kč·m ⁻¹
Plazmový plyn (Vzduch - kompresor)	Náklady	0,00	Kč·m ⁻³
	Spotřeba	70,00	l·min ⁻¹
	Spotřeba na jednotku	42,04	l·m ⁻¹
	Náklady na jednotku	0,00	Kč·m ⁻¹
Ochranný plyn (Vzduch - kompresor, spotřeba pouze el. energie)	Náklady	0,00	Kč·m ⁻³
	Spotřeba	30,00	l·min ⁻¹
	Spotřeba na jednotku	18,02	l·m ⁻¹
	Náklady na jednotku	0,00	Kč·m ⁻¹
Energie	Celková el. energie	45,00	kW
	Jednotková energie	0,45	kWh·m ⁻¹
	Cena energie	5,00	Kč·kWh ⁻¹
	Jednotkové náklady	2,25	Kč·m ⁻¹
Spotřební díly	Cena pálicí sestavy	1200,00	Kč
	Životnost	4,00	hod
	Jednotkové náklady	3,00	Kč·m ⁻¹
Propaly	Prům. jednotkový počet	2,50	m ⁻¹
	Náklad na propal	3,00	Kč
	Celkové náklady	7,50	Kč·m ⁻¹
Korekce rychlosti (vnitřní kontury)		3,00	Kč·m ⁻¹
Předfuk a dofuk plynů		0,80	Kč·m ⁻¹
Náklady vztažené na metr řezu		24,87	Kč·m ⁻¹
Skutečná délka řezu součásti		0,963	m
Náklady na vypálení součásti		23,95	Kč
Cena materiálu		16,90	Kč·kg ⁻¹
Hmotnost polotovaru (160 x 160)		2,99	kg
Cena materiálu na součást		50,531	Kč
Zisky (15% náklady + materiál)		11,17	Kč
Konečná cena součásti		85,66	Kč

4.3 Shrnutí

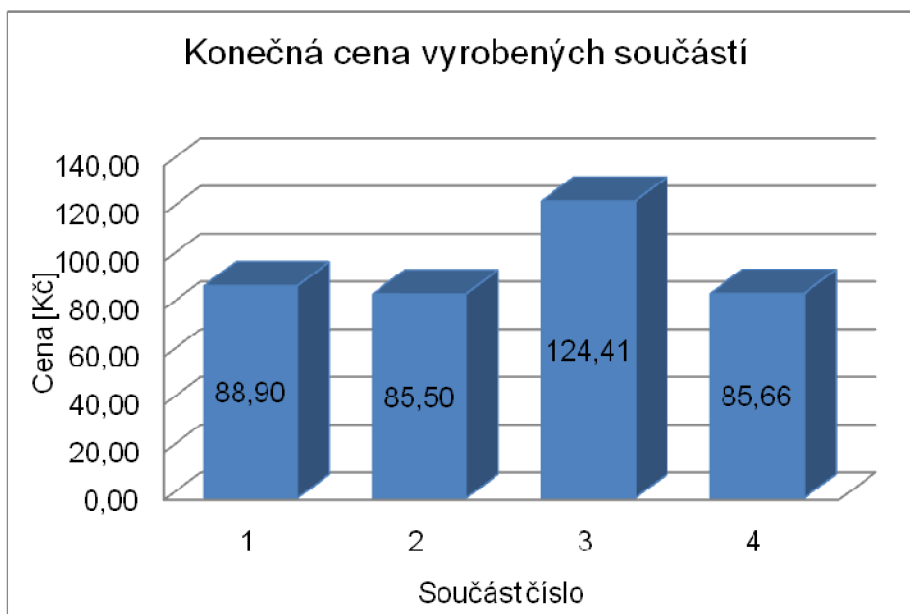
Jak už bylo zmíněno, cena součásti zahrnuje tři hlavní položky, a to náklady na výrobu součásti, materiálové náklady polotovaru a zisky. Zisky tvoří 15% z výrobních a materiálových nákladů.

Na obrázku 43 jsou uvedeny náklady na výrobu jednoho metru řezu, pro každou stanovenou technologii výroby součásti. Technologie výroby součásti 1 a 3 jsou stejné, liší se pouze v provedení výroby.



Obr. 43 Náklady na metr řezu

Konečná cena součástí je uvedena na obrázku 44. Nejmenší cenové náklady jsou na výrobu druhé součásti. Oproti tomu nejvíce cenově náročná je třetí součást.



Obr. 44 Cena součástí

ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo provedení literární studie zabývající se technologií dělení kovů plazmovým paprskem. Druhá část práce je praktická a zahrnuje experiment. Experiment se zabývá technologiemi a různými parametry výroby součástí. Tyto součásti jsou vyhodnocovány pomocí normy ČSN EN ISO 9013. Norma zahrnuje klasifikaci tepelných řezů, geometrické požadavky na výrobky a úchyly jakosti řezů. Závěrečná část práce se věnuje pořizovacím a provozním nákladům plazmového pálicího centra. V neposlední řadě je zpracováno také technicko-ekonomické vyhodnocení vyráběných součástí.

V praktické části jsou vyrobeny čtyři součásti. Vzorky jsou vypáleny pomocí odlišných technologií a parametrů řezu. Součásti č. 1 a 3 jsou vyrobeny standardními parametry, které udává výrobce plazmového zařízení. Ovšem u součástí č. 3 je zavedena technologie výroby ostrých rohů pomocí "kontury mašle". Součást č. 2 je vyrobena největší možnou řeznou rychlostí tak, aby výrobní čas i náklady byly minimalizovány. U součásti č. 4 je také snaha dosáhnout co nejmenších výrobních nákladů, proto je zvolen levnější plazmový plyn k řezání (vzduch). Tento plyn se takřka nepoužívá, proto není zcela jistý úspěch této části experimentu.

Při vyhodnocování vzorků pomocí již zmíněné normy bylo zjištěno, že součásti č. 1 až 3 odpovídají obdobné přesnosti i jakosti povrchu. Pouze u součásti č. 4 jsou naměřeny horší rozměrové přesnosti a jakosti dělené plochy. Podle normy byly vyhodnocovány tyto vady řezných hran a ploch: úchylka kolmosti, průměrná výška prvků profilu, skluz a rozměrové úchyly. Jako doplňující charakteristiky jsou vyhodnocovány hodnoty poloměru natažení horní hrany a šířka řezné spáry.

Posledním cílem diplomové práce je provedení technicko-ekonomického zhodnocení. Nejdříve jsou vypočítány investiční a provozní náklady stroje. Z těchto nákladů jsou dále stanoveny hodinové fixní náklady pracoviště a celkové hodinové náklady pracoviště. V neposlední řadě jsou také stanoveny ceny jednotlivě vyráběných součástí.

Jak už bylo zmíněno, jsou vyráběny čtyři součásti, každá odlišnou technologií výroby. Proto je důležité zhodnotit ekonomiku a technologickou vhodnost výroby těchto vzorků. Pokud je snaha dosáhnout co nejmenších výrobních nákladů a příliš nezáleží na jakosti plochy a rozměrové přesnosti, je vhodné použít vyšší rychlosti dělení, jak je provedeno u součásti 2. Tomu tak může být, pokud se jedná o polotovár, který se bude obrábět nebo součást je komponenta svařence. Pokud je potřeba dosáhnout kvalitní součásti, jak z hlediska řezné plochy tak i hrany, je vhodné použít optimální nastavení stroje udávané výrobcem. Tímto způsobem je vyráběná součást 1. Náklady jsou ovšem vyšší jak u součásti 2. Technologii výroby součásti 3, kdy je zařazena "kontura mašle", je vhodné volit pouze na rohy, které jsou technologicky důležité, z důvodu velkých nákladů na výrobu ostrého rohu. Při použití plazmového plynu vzduch, jak je provedeno u součásti 4, došlo ke snížení nákladů jen v malé míře. Nedostatkem této technologie je horší kvalita řezu, proto je vhodnější použít technologii výroby součásti 2, kdy dojde k výraznému snížení nákladů, ovšem nedojde k zásadnímu zhoršení jakosti plochy a rozměrové přesnosti.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] MAŇKOVÁ, Ildikó. *Progresívne technologie*. 1 vyd. Košice: Viena, 2000. 275 s. ISBN 80-7099-430-4.
- [2] HÍREŠ, Ondrej, Michal HATALA a Segrej HLOCH. *Delenie kovových materiálov okružnou pílou, vodným prúdom a plazmovým oblúkom*. 1. vyd. Jiří Pustina: Ostrava - Poruba 2007. ISBN 978-80-8073-769-6.
- [3] *Hypertherm* [online]. 2011 [cit. 2011-03-20]. Dostupné z WWW: <<http://hypertherm.com/>>.
- [4] *Vanad* [online]. 2011 [cit. 2011-04-10]. Dostupné z WWW: <<http://vanad.cz/>>.
- [5] *HyPerformance Plasma HPR260XD Auto Gas: Návod k používání* [online]. [s.l.]: [s.n.], 2009, Revize 1 – Říjen 2009 [cit. 2011-03-17]. Dostupné z WWW: <<https://www.hypertherm.com/Xnet/library/library.jsp?locale=en>>.
- [6] *Návod na obsluhu strojů Vanad*. 03/2006. [s.l.]: [s.n.], 2006. 77 s.
- [7] ŘASA, Jaroslav a Zuzana KEREČANINOVÁ. Nekonvenční metody obrábění – 8. díl. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 8. října 2008, MM 2008 / 10, [cit. 2011-04-17]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-8-dil>>.
- [8] *SPR: 7. Moderní technologie pro zpracování materiálů* [online]. c2005, 10.8.2005 [cit. 2011-04-17]. STŘEDNÍ UMĚLECKOPRŮMYSLOVÁ ŠKOLA TURNOV. Dostupné z WWW: <<http://konstrukce.webz.cz/sups/7too1.html>>.
- [9] LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA. *STROJNICKÉ TABULKY: pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. 1. vydání. Úvaly: ALBRA - pedagogické nakladatelství, 2003. 865 s. ISBN 80-86490-74-2 .
- [10] AMBROŽ, Oldřich . *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů* . 1. vyd. Ostrava: Zeross, 2001. 395 s. ISBN 80-85771-81-0 , (brož.).
- [11] ČSN EN ISO 9013. *Tepelné dělení – Klasifikace tepelných řezů – Geometrické požadavky na výrobky a úchytky jakosti řezu*. Praha: Český normalizační institut, Říjen 2003. 28 s.

- [12] *Mitutoyo* [online]. c2009 [cit. 2011-03-20]. Měření drsnosti povrchu. Dostupné z WWW: <http://www.mitutoyo-czech.cz/cz/pdf/poster_drsnosti_ra_cze_a3.pdf>.
- [13] PŘIBIL, Erich. *Bohdan Bolzano: Technická příručka* [online]. 1998 [cit. 2011-03-28]. Dostupné z WWW: <<http://prirucka.bolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/>>.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
a	[mm]	tloušťka materiálu
CAD	-	(Computer Aided Design) počítačem podporované konstruování
CAPP	-	(Computer Aided Process Planning) počítačem podporované plánování výroby
CNC	-	(Computer Numeric Control) číslicové řízení počítačem
DWG	-	(DraWinG) formát výkresů
DXF	-	(Drawing Exchange Format) CAD formát
F5	-	směs plynů (dusík a vodík)
H35	-	směs plynů (argon a dusík)
H5	-	směs plynů (argon a dusík)
I_1	[A]	vstupní proud
I_2	[A]	maximální výstupní proud
KV	[J]	nárazová práce
LAN	-	(Local Area Network) lokální síť
LCD	-	(Liquid Crystal Display) displej z tekutých krystalů
L_n	[mm]	celková vyhodnocovaná délka
L_r	[mm]	základní délka
MIG	-	(Metal Inert Gas) svařování v inertní ochranné atmosféře
n	[mm]	skluz
n_{max}	[mm]	maximální hodnota skluzu
$n_1 \div n_3$	[mm]	naměřené hodnoty skluzu
NC	-	(Numerical Control) číslicové ovládání
P	[kW]	výkon
PAM	-	(Plasma Arc Machining) transferovaný plazmový oblouk
PBM	-	(Plasma Beam Machining) netransferovaný plazmový oblouk
r	[mm]	poloměr natavení horní hrany
Ra	[μ m]	průměrná aritmetická úchylka profilu
Rz	[μ m]	průměrná výška profilu
Rz_{max}	[μ m]	maximální hodnota průměrné výšky profilu
s	[mm]	šířka rezné spáry
THC	-	odměřovací systém
TOO	-	tepelně ovlivněná oblast
u	[mm]	úchylka kolmosti
u_{max}	[mm]	maximální úchylka kolmosti
$u_1 \div u_6$	[mm]	naměřené úchylky kolmosti
U_0	[V]	maximální napětí na prázdno

U_1	[V]	vstupní napětí
U_2	[V]	výstupní napětí
$Zt1$	[mm]	délka prvku profilu
Δa	[mm]	zmenšení tloušťky materiálu

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 Výkres součásti

