

Univerzita Hradec Králové

Přírodovědecká fakulta

Katedra fyziky

Tepelné dělení kovů

Bakalářská práce

Autor: Zdeněk Táborský
Studijní program: B1701 – Fyzika
Studijní obor: Fyzikálně – technická měření a výpočetní technika
Vedoucí práce: Ing. Karol Radocha, Ph.D.

Univerzita Hradec Králové

Přírodovědecká fakulta

Zadání bakalářské práce

Autor:	Zdeněk Táborský
Studijní program:	B1701 Fyzika
Studijní obor:	Fyzikálně – technická měření a výpočetní technika
Název práce:	Tepelné dělení kovů
Název práce v AJ:	Thermal cutting of metals
Cíl a metody práce:	Práce má ukázat porovnání dvou odlišných technologických metod tepelného dělení navzájem mezi sebou a zároveň vyhodnocení jakosti děleného povrchu a geometrické přesnosti.
Garantující pracoviště:	katedra fyziky Přírodovědecké fakulty UHK
Vedoucí práce:	Ing. Karol Radocha, Ph.D.
Oponent:	prof. Ing. Bohumil Vybíral, CSc.
Datum zadání práce:	17.11.2014
Datum odevzdání práce:	28.5.2015

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně a že jsem v seznamu použité literatury uvedl všechny prameny, z kterých jsem vycházel.

V Hradci Králové dne

.....

Zdeněk Táborský

Anotace

Bakalářská práce je zaměřena na oblast technologie tepelného dělení kovů. V teoretické části jsou shrnuty možnosti a principy dělení kovů. Cílem praktické části je porovnání pálení kyslíkovým plamenem a plazmovým paprskem, konkrétně definovat jejich výhody a nevýhody při užití v praxi.

Klíčová slova: kyslíkový plamen, plazmový paprsek, laserový paprsek, tepelné dělení

Annotation

The bachelor thesis is focused on the technology of thermal cutting of metals. The theoretical section summarizes the possibilities and principles of metal cutting. The practical section is a comparison of burning oxygen flame and plasma beam, specifically define their advantages and disadvantages when used in practice.

Keywords: oxygen flame, plasma beam, laser beam, thermal cutting

Obsah

Zadání bakalářské práce

Prohlášení

Anotace

Obsah

Úvod

1 Tepelné dělení kovů kyslíkovým plamenem	7
1.1 Historie kyslíkového dělení	7
1.2 Princip dělení kyslíkovým plamenem	8
1.3 Konstrukce kyslíkového hořáku	9
1.4 Plyny a plameny používané pro řezání	11
1.5. Tepelně ovlivněná oblast	13
1.6 Zpětné šlehnutí plamene	14
1.7 Kyslíkové kopí.....	14
2 Tepelné dělení kovu plazmovým paprskem.....	14
2.1 Historie plazmového dělení.....	14
2.2 Teorie plazmy	15
2.3 Princip a konstrukce plazmového hořáku	15
2.4 Druhy plazmových hořáků	17
2.5 Plyny využívané pro dělení plazmou.....	18
2.6 Stabilizace a metody dělení materiálu plazmovým paprskem	19
2.7 Řezací fáze plazmového dělení.....	21
3 Tepelné dělení kovů laserovým paprskem.....	22
3.1 Historie laserového dělení.....	22
3.2 Základní princip laseru	22
3.3 Přeměna energie na laserový paprsek	23
3.4 Dělení kovu laserovým paprskem.....	24
3.5 Základní dělení laserů	26
3.6 Lasery používané ve strojním průmyslu	26

4 porovnávání součástí dělené kyslíkovým plamenem a plazmovým paprskem	29
4.1 Cíl experimentu	29
4.2 Průběh experimentu	29
4.3 Volba materiálu	29
4.4 Návrh součásti	30
4.5 Parametry dělení kyslíkovým plamenem.....	31
4.6 Parametry dělení plazmovým paprskem	33
4.7 Úchylka kolmosti u	35
4.8 Výška profilu Ra a Rz.....	36
4.9 Skluz n	38
4.10 Šířka řezné spáry s	39
4.11 Úchylky vybraných jmenovitých rozměrů součásti	40
4.12 Výsledná jakost přesnosti povrchu řezu	43

Závěr

Seznam použité literatury

Teoretická část

Úvod

Zvládnutí správného zpracování problematiky při mechanickém a tepelném dělení kovů je základem pro využití nejrůznějších materiálů. Jen stěží si dnes dokážeme přestavit průmyslové odvětví, které by alespoň z části nevyužívalo tepelného dělení kovů, jenž si pro svoji jednoduchost stále nachází svoje pevné místo.

Tepelné dělení kovů lze v rámci strojírenské výroby zařadit jako příprava materiálu pro další úpravy. Využívá principů tavení, spalování či odpařování kovu z místa řezu nebo jejich kombinaci, kdy potřebná energie je dodávána různými tepelnými zdroji. V dnešní době se v průmyslové praxi používá především dělení kyslíkovým plamenem a plazmovým nebo laserovým paprskem, které můžeme aplikovat na velkou oblast konstrukčních materiálů, například na nelegované a nízkolegované oceli, vysokolegované oceli, vysoce reaktivní oceli, různé slitiny kovů, neželezné kovy nebo na nekovové materiály (dřevo, papír, sklo, plasty, ...). Tyto hlavní tři metody tepelného dělení kovů jsou, díky výborným výsledkům, považovány za mnohem lepší, než metody mechanické.

Různé tepelné metody mají v průmyslové výrobě svoje zastoupení, jelikož každá metoda má své výhody a nevýhody. Nejstarší a zároveň velmi populární metodou je dělení kovu pomocí kyslíkového plamene. Mezi její výhody patří především schopnost dělit velmi tlustý materiál za malé provozní náklady, ale zároveň má nižší řeznou rychlost, velké tepelné ovlivnění plechu a není schopná dělit vysokolegované oceli nebo hliník. Další hodně využívanou metodou je dělení plazmovým paprskem, které má vysokou řeznou rychlost všech elektricky vodivých materiálů. Nevýhoda spočívá ve schopnosti řezání jen středně tlustého materiálu a jejich vnitřních úhlů. Poslední metodou, která je součástí teoretické části bakalářské práce, je dělení laserovým paprskem. Mezi jeho výhody patří především přesnost všech různých tvarů při vysoké řezací rychlosti a dělení i nekovových materiálů. Hlavní nevýhodou jsou velmi vysoké investiční a provozní náklady a schopnost dělit jen tenký materiál.

1 Tepelné dělení kovů kyslíkovým plamenem

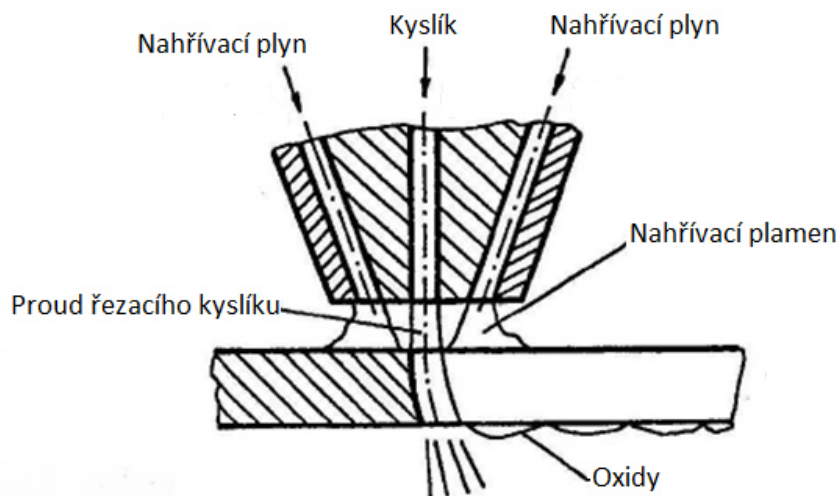
1.1 Historie kyslíkového dělení

Roku 1836 Angličan Edmund Davy jako první popsal vlastnosti acetylenu, avšak do technické praxe byl zaveden až roku 1860 francouzským chemikem Marcellinem Berthelotem. Významný krok udělal roku 1888 Thomas Fletcher, který zjistil,

že po zahřátí ocelové trubky na vysokou teplotu, kterou proudí čistý kyslík, začne exotermicky hořet a tím přišel na princip kyslíkového kopí. První acetylénový hořák pro svařování a dělení byl vynalezen roku 1901 Charlesem Picardsem a komerčně představen byl o dva roky později. V Americe roku 1908 si nechal patentovat John Harris svůj první hořák a dodnes je jeho firma na trhu světovou jedničkou. Po dvanácti letech měly hořáky tak vypracovaný design, že jsou velice podobné těm dnešním. Roku 1941 byl patentován držák se třemi hořáky, na úpravu svarových ploch. Poté, co byla objevena metoda dělení kovů pomocí plazmového paprsku, se na pár let vývoj pozastavil. Po zjištění, že plazmový paprsek není schopen dělit kovy větších tlouštěk, se vývoj znovu nastartoval. Princip známý jako kyslíková košilka byl patentován roku 1971 japonským vědcem Nakanishim, který zvýšil výkon řezacích hubic. Firma Broco Inc. roku 1980 vyvinula a patentovala několik nových zařízení pro kyslíkové kopí. Do roku 2000 se zvýšila řezná rychlost o 20% pomocí intenzivního vývoje na řezacích a nahřívacích hubicích. Momentálně je metoda dělení kovů pomocí kyslíkového plamene na takové úrovni, že její další vývoj se prakticky zastavil. [1, 6, 7]

1.2 Princip dělení kyslíkovým plamenem

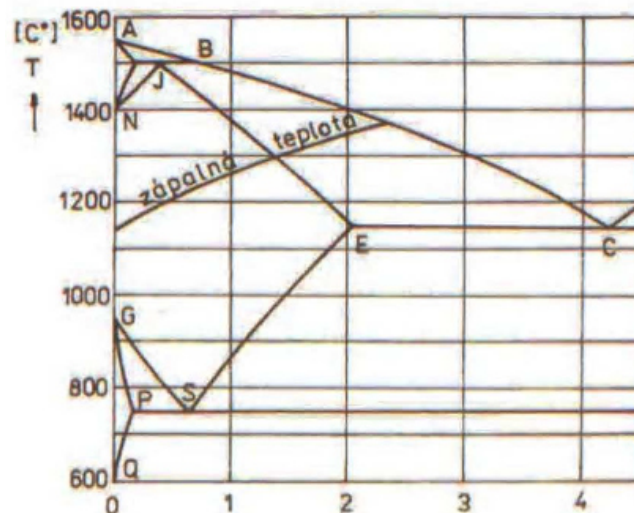
Jednoduchý princip je založen na dostatečném přehřátí děleného materiálu na jeho zápalnou teplotu nahřívacím plamenem. Následně je pod tlakem přiveden řezací kyslík, který spaluje dělený materiál a zároveň vyfukuje vznikající oxidy z řezné spáry pryč. Tepelná energie potřebná pro dělení, je složena z nahřívacího plamene, exotermickou reakcí mezi prvky obsažených v oceli a řezacím kyslíkem. Samotný nahřívací plamen nestačí tepelně pokrýt celý průřez řezu. U tlouštěk nad 30 mm je důležitý proces, kdy teplo vzniká z probíhající exotermické reakce mezi kyslíkem a děleným materiálem. Zároveň musí tato reakce nahřát okolní materiál na zápalnou teplotu. [2, 3, 7]



Obr. 1 – Princip dělení kyslíkovým plamenem [3]

Podmínky pro dělený materiál

- Zápalná teplota děleného materiálu musí být nižší než jeho teplota tavení. Pokud není tato podmínka splněna, dochází pouze k tavení materiálu a řez je velmi nekvalitní.
- Musí být zajištěna exotermická reakce, aby pokryla vzniklé tepelné ztráty odvodem tepla a reakce mohla pokračovat.
- Dělený materiál musí být schopen se plynule předehtřívát v celé své tloušťce na zápalnou teplotu.
- Teplota tavení strusky musí být nižší, než teplota tavení děleného materiálu. Zároveň musí být natolik tekutá, aby byla snadno odstranitelná tlakem proudícího kyslíku z řezné spáry.



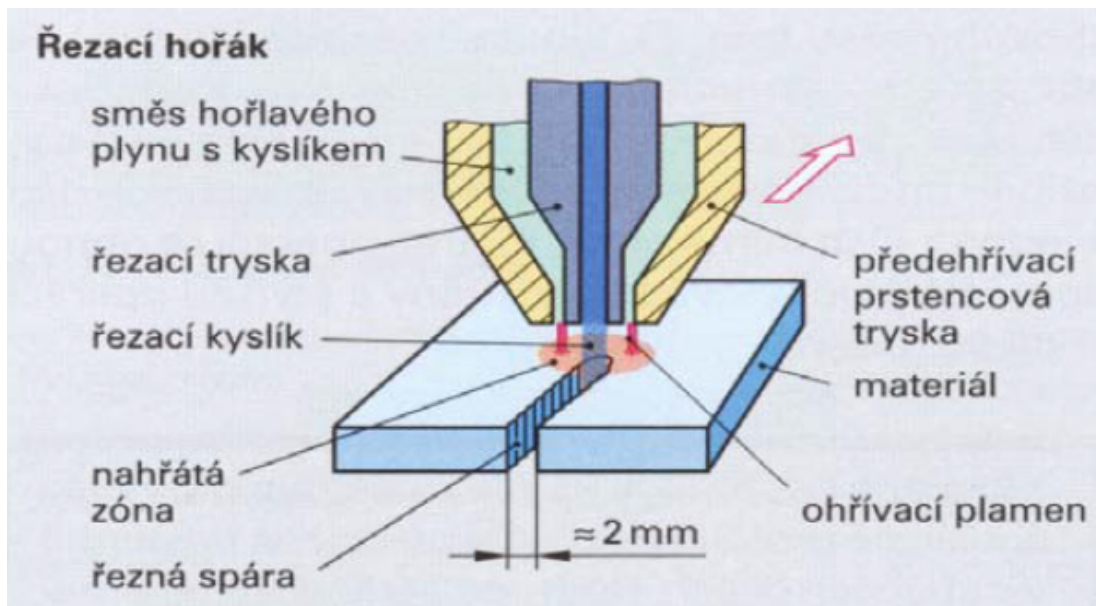
Obr. 2 – Závislost hodnoty zápalné teploty na obsahu uhlíku v oceli [3]

Mezi materiály, které splňují podmínky pro dělení kyslíkem, patří konstrukční, uhlíkové a nízkolegované oceli do tloušťky 1000 mm. Ovšem dobré kvality řezu dosáhneme do tloušťky 300 mm. Jejich zápalná teplota je v rozsahu 1150 až 1300 °C podle obsahu uhlíku do 0,7 % a zároveň mají teplotu tavení nad 1500 °C. Vzniklé oxidy o teplotě 1350 až 1400 °C jsou bez problémů vyfukovány, neboť mají nižší teplotu než tavení děleného materiálu. Ve vysokolegované oceli vzniká oxid chrómu s vysokou viskozitou, proto nejde odstranit z řezné spáry a je pro metodu dělení kyslíkem nepoužitelná. [2, 3, 7]

1.3 Konstrukce kyslíkového hořáku

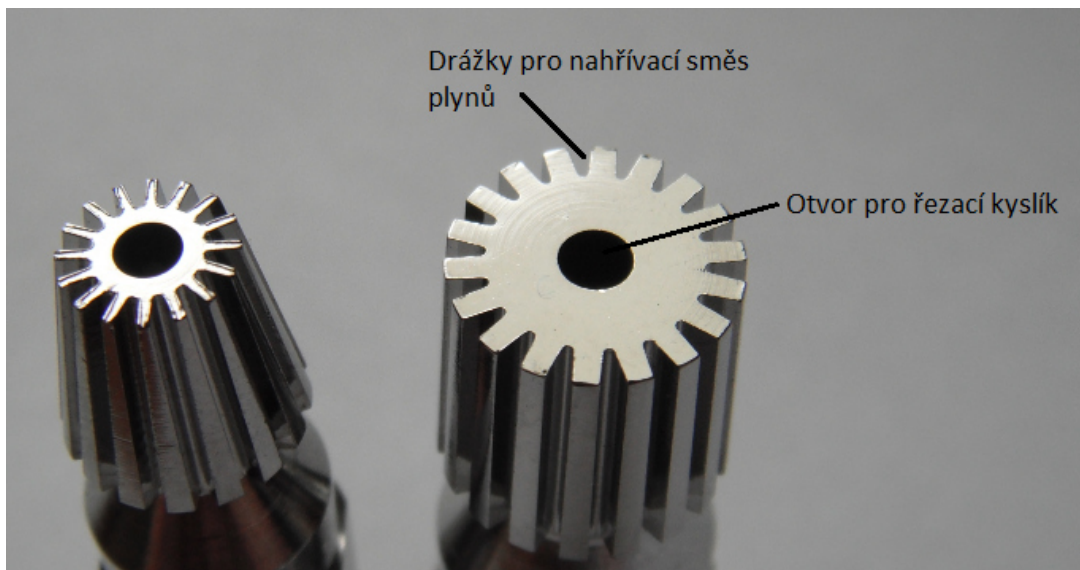
Hořák je složen pouze ze dvou hlavních součástí, do kterých je hadicemi přiváděn kyslík a hořlavý plyn. První součástí tvoří ochranná předehtřívací tryska sloužící jako kryt mezi okolní atmosférou a řezacím kyslíkem. Druhou součástí hořáku je řezací tryska, která zajišťuje přívod řezacího kyslíku do řezné spáry a dále

usměrňuje nahřívací plamen symetricky okolo požadovaného místa. Obě součástky jsou tepelně velmi namáhané a snadno vyměnitelné.



Obr. 3 – Schéma konstrukce řezacího hořáku [4]

Je důležité, aby obsluha stroje kontrolovala, jak plamen hoří. Seběmenší poškození trysky nebo zanesení jediné drážky způsobí, že se řezací plamen vychýlí z optimálního směru a začne dělit materiál s nežádoucí kolmostí řezu. Na trysku má dále negativní vliv rozstřík strusky při propalu materiálu, přehřívání nebo nedostatečné či nekvalitní čištění trysky.



Obr. 4 - Výstupní část trysek pro tloušťky 60-100 mm a 100-200mm



Obr. 5 – Ukázka nahřívacích drážek při dělení

1.4 Plyny a plameny používané pro řezání

Tepelné dělení plamenem se skládá z řezacího kyslíku (O_2) a nahřívacího hořlavého plynu. Kyslík je samozřejmostí pro řezací operace a dále je nutné použít některý z nahřívacích hořlavých plynů, mezi které řadíme Acetylen (C_2H_2), Propan (C_2H_3), MAPP (C_3H_4), Etan (C_2H_6), Propylen (C_3H_6), Vodík (H_2) a Zemní plyn (CH_4). Každý má trochu odlišné parametry v podobě rychlosti ohřevu na zápalnou teplotu, řezné rychlosti, propálení kovu či na kvalitu řezné plochy. Jeho volba je přímo závislá na technologii a požadavcích pro na výrobu. Zcela nejpoužívanější plyn je acetylen, za kterým následuje propan. Ostatní se používají především ke specifickému dělení kovů.

Kyslík O_2

Bezbarvý plyn, bez chuti a zápachu. Atomy kyslíku jsou nestálé a slučují se s dalšími atomy na molekuly O_2 nebo s atomy jiných prvků za vzniku oxidů. Patří k nejsilnějším oxidačním činidlům. Ve vyšších teplotách se jeho rychlost oxidace podstatně zvyšuje a reakce se stávají prudce exotermické. Prudká reakce látek s kyslíkem, provázená světelným a tepelným zářením, nazýváme hoření. Pro dosažení kvalitního řezání je potřeba mít čistotu kyslíku aspoň 99,5%, optimálně však 99,95%. Tuto čistotu je však potřeba dosáhnout na výstupu řezací trysky.

Acetylen C_2H_2

Bezbarvý plyn vonící po éteru, vysoce hořlavý a extrémně explozivní. Je to univerzální uhlovodík používaný pro všechny plamenové technologie a vzniká působením vody na karbid vápníku. Pokud je stlačen tlakem více než 1,5 bar a vystaven tepelnému šoku, dochází k jeho rozkladu na uhlík a vodík za uvolnění značné energie. Dosahuje maximální teploty plamene $3162^{\circ}C$ a jeho zápalná teplota je $296^{\circ}C$. V kyslíku hoří rychlostí 6,9 m/s.

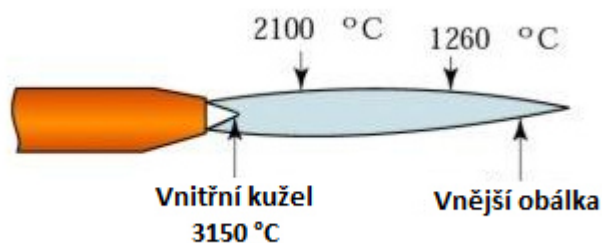
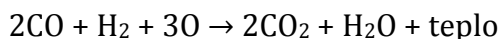
Neutrální kyslíko-acetylenový plamen

Pro dělení kovu kyslíkem se používá tzv. neutrální plamen, který obvykle hoří ve dvou fázích. Jeho poměr kyslíku a acetylenu bývá 1:1.

První fáze probíhá ve vnitřním kuželu, kdy dochází k nedokonalému spalování. Acetylen se zde rozkládá na uhlík, vodík a plamen dále spaluje jen oxid uhelnatý. Vnitřní plamen má redukční účinky, je ostře ohraničen a září oslnivě bíle.



Druhá fáze se odehrává ve vnější obálce, kde si plamen bere z okolní atmosféry kyslík a vnější plamen má oxidační účinky.



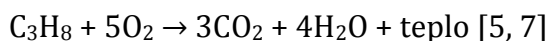
Obr. 6 – Schéma neutrálního kyslíko-acetylenového plamene [5]

Propan C_2H_3

Bezbarvý plyn bez zápachu. Jedná se o nasycený uhlovodík, výrazně těžší než vzduch (1,55krát), který lze snadno udržet v kapalném stavu. Dosahuje maximální teploty plamene $2826^{\circ}C$ a jeho zápalná teplota je $450^{\circ}C$. V kyslíku hoří rychlostí 3,7 m/s.

Neutrální kyslíko-propanový plamen

Další verzí řezacího plamene, která má velké uplatnění, je směs propanu jako hořlavého plynu s kyslíkem. Má dostačující teplotu plamene a především se vyplatí z ekonomického hlediska, než směs kyslíku a acetylenu. Hoření kyslíko-propanového plamene lze chemicky vyjádřit:



1.5. Tepelně ovlivněná oblast

Kvůli vystavení materiálu vysoké teplotě při dělení je úzká oblast okolo řezu tepelně ovlivněna. V této oblasti dochází k nežádoucím změnám vlastností materiálu - například: vznik trhlin, zakalení, změně chemického obsahu prvků a podobně. Šířka ovlivněné oblasti se zmenšuje s tloušťkou materiálu a s vyšší řeznou rychlostí.



Obr. 7 – Zobrazení tepelně ovlivněné oblasti na součásti

1.6 Zpětné šlehnutí plamene

Jedná se o velmi nebezpečnou záležitost, kdy se plamen dostane zpět do hořáku. Při nesprávném zacházení může plamen proniknout i do přívodních hadic či dokonce až do zásobníku plynu. Zpětné šlehnutí se projevuje hvízdáním v trysce hořáku nebo třaskavým zvukem.

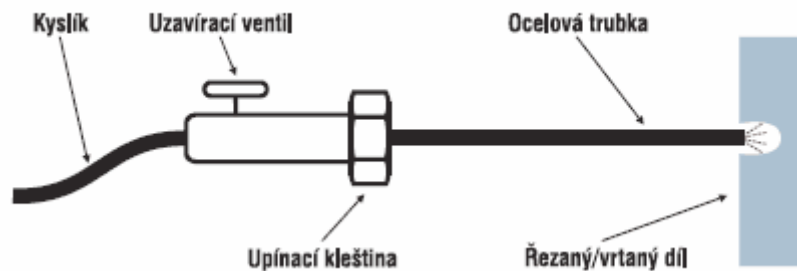
Mezi hlavní příčiny vzniku zpětného šlehu patří nízká výstupní rychlost plamene pod 70 m/s, znečištěných hadicích, tryskách či ventilech. Další možností vzniku je přehřátý hořák nad teplotu 350 °C, kdy se kyslíko-acetylenová směs vznítí.

Jako bezpečnostní opatření se používají pojistky proti zpětnému šlehnutí ve vodní či suché verzi. Preventivně by se měla dodržovat čistota hořáku, trysky či redukčních ventilů. [6]

1.7 Kyslíkové kopí

Jedná se o velmi jednoduché zařízení, které stálo na úplných počátcích tepelného dělení materiálu. Tato metoda je nedoceněná a málo používaná i přesto, že je velmi účinná.

Skládá se z trubky z nízkouhlíkové oceli, plněna tyčemi o průměru 1,6 - 2 mm, kterou prochází kyslík o minimální čistotě 99,5% a pod tlakem až 20 barů. Dělený materiál je nutné nejprve lokálně nahřát na zápalnou teplotu okolo 1200°C. Přiložením konce trubky k zahřátému místu a otevřením proudu kyslíku dochází k prudké exotermické reakci a trubka začne hořet teplotou 4000°C až 5500°C. Dynamický účinek proudu kyslíku na dělený materiál je řezná spára, ze které jsou vyfukovány vznikající oxidy. Exotermická reakce musí být dostatečně velká na to, aby zároveň ohřívala okolní materiál na zápalnou teplotu, jinak by se proces přerušil.



Obr. 8 – Schéma kyslíkového kopí [7]

Kyslíkové kopí se využívá k řezání různých kovových materiálů, betonu i železobetonu. Kromě řezání dokáže také odstraňovat svary, drážkovat, prorážet beton a podobně. [7]

2 Tepelné dělení kovu plazmovým paprskem

2.1 Historie plazmového dělení

Pojem plazma definoval roku 1923 I.Langmuir jako speciální stav plynů, někdy označován jako čtvrtý stav hmoty o vysoké tepelné energii. Po usilovném snažení byla roku 1951 aplikována svařovací metoda TIG, kde jde o svařování wolframovou elektrodou v ochranné atmosféře interního plynu. První plazmový hořák na principu metody TIG byl vyvinut roku 1957 doktorem R.Gaggem. V 60. letech byla vynalezena rozšíření jako dvou Proudový plazmový oblouk, vzduchová plazma či vodou stíněná plazma. V 70. letech bylo objeveno podvodní řezání, které dokázalo potlačit hluk a nečistoty při řezání. V 80. letech vývoj zapracoval na rychlosti a kvalitě řezu, na nízkoproudé vzduchové plasmě či plasmě s vysokou hustotou oblouku. Zdokonalilo se i řezání ve velkých hloubkách.

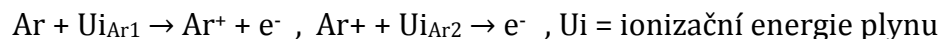
2.2 Teorie plazmy

Plazma je nazývána jako ionizovaný plyn, který je elektricky vodivý. Tento zvláštní stav plynu obsahuje záporně nabitě částice elektronů a kladné částice iontů. Nechová se dle fyzikálně termodynamických zákonů a je často označována jako čtvrtý stav hmoty.

Se zvyšováním teploty roste pohyb molekul až do bodu, kdy bude nárazová energie vyšší než vazební energie molekuly, která se rozštěpí na jednotlivé atomy. Tento jev je nazýván jako disociace plynu.



Při dalším zvyšování teploty bude intenzita srážek na takové úrovni, až se oddělí elektron z obalu atomu. Vznikne tak samostatný volný záporný elektron a kladný iont. Počet volných elektronů určuje stupeň ionizace, který je závislý na teplotě a druhu plynu.



Důležitou vlastností plazmy je její kvazi-neutralita. To znamená, že počet záporně nabitých částic je v jednotce objemu stejný jako kladně nabitě částice a dohromady je celek elektromagneticky neutrální ionizovaný plyn.

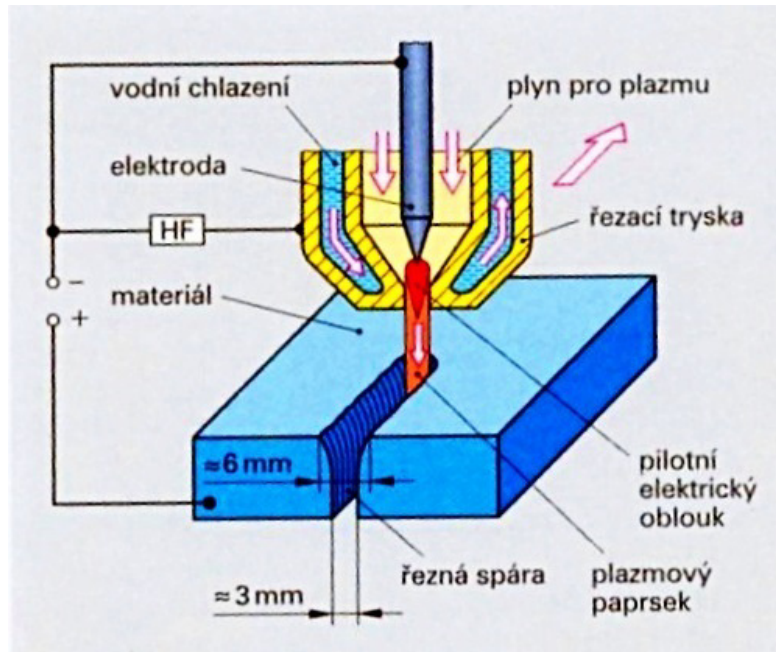
Plazma může vzniknout několika způsoby, však pro tepelné dělení kovů se využívá jen technické plazma. Ta vzniká pomocí elektrického výboje mezi katodou a anodou, která mění elektrickou energii na teplo. [2, 8]

2.3 Princip a konstrukce plazmového hořáku

Základem dělení kovů plazmou je elektrický oblouk neboli elektrický výboj v plynu, který je schopný samostatné existence. Je tvořen ze tří částí: katodová oblast, anodová oblast a pozitivní sloupec oblouku (plazmový paprsek). Plazmový paprsek vzniká pomocí elektrické energie a plazmového plynu. Obsahuje elektrony uvolněné termickou emisí ze zahřáté katody s hustotou energie (až $2 \cdot 10^6 \text{ W/cm}^2$) a vysokou teplotou (9000 až 30 000 K), které jsou urychlovány směrem k řezanému materiálu nadzvukovou rychlostí (1500 až 2300 m/s), jenž tvoří anodu. Na intenzitu elektrického pole v paprsku má vliv velikost proudu protékajícího obloukem, tlak a druh plynu, materiál katody, chlazení oblouku či vnější magnetické síly.

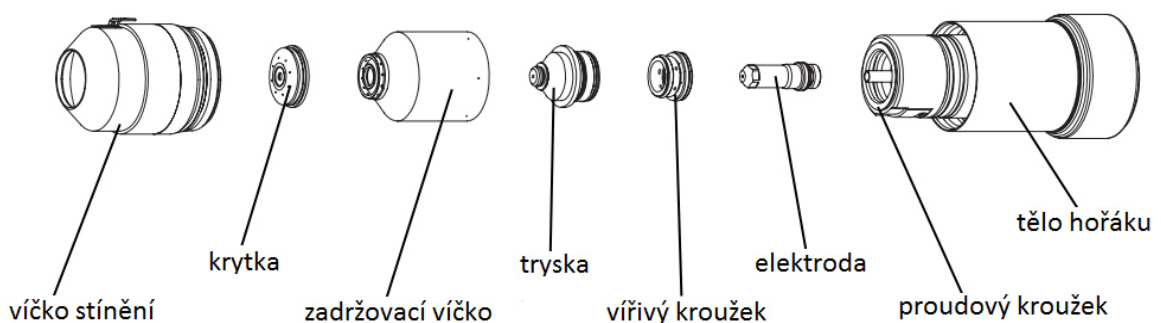
Výsledkem působením elektrického oblouku se dělený materiál taví, sublimuje a odpařuje. Vyvinutým tlakem plazmového plynu je roztavený materiál z místa řezu odfukován ve formě tekutého kovu, čímž vznikne řezná mezera.

Elektrické oblouky rozdělujeme podle druhu napájení na stejnosměrné, střídavé a dále na oblouky volně hořící či stabilizované. Pro dělení materiálu se využívá oblouk stabilizovaný, protože hořící oblouk je usměrněn do řezné mezery a tím dosahujeme potřebné přesnosti. Pomocí ochlazování vnějších vrstev elektrického oblouku dosáhneme zúžení a vyšší teploty.



Obr. 9 – Princip konstrukce plazmového hořáku [4]

Hořák se skládá z mnoha součástí, které jsou výměnné. Při zapalování oblouku je nejvíce namáhána výstupní tryska a elektroda, což jsou nejdůležitější součásti s nejmenší životností. [2, 3, 4, 8]



Obr. 10 – Součásti ze kterých se skládá plazmový hořák [10]

Elektroda

Patří mezi nejvíce tepelně namáhané součásti hořáku. Je připojena na záporný pól jako katoda a jejím úkolem je přivést proud do sloupce oblouku. Zároveň tvoří tepelně izolační přechod mezi plazmatem a dalšími součásti hořáku, proto musí být chlazena. Elektrody do 100 A jsou většinou chlazeny vzduchem či plazmovým plynem, nad 100 A je nutné k chlazení využít kapaliny. Elektroda se nejčastěji vyrábí z mědi nebo měděné slitiny, ve které je nalisována vložka s velmi vysokou teplotou tavení. Aktivní plyny (O_2 , vzduch) mají agresivní oxidační atmosféru, proto se zde používají vložky z hafnia. U neaktivních plynů ($Ar+H_2$, N_2) se využívají vložky z wolframu.

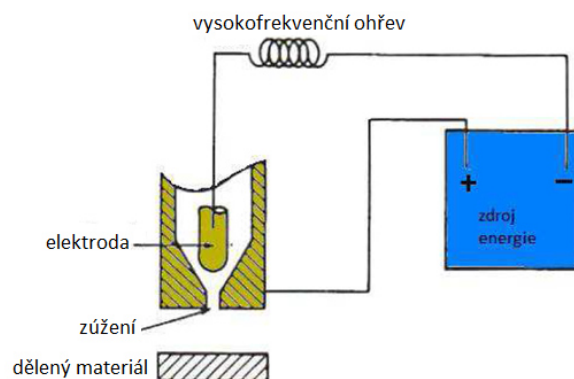
Tryska

Její vlastností je zúžení elektricky ionizovaného plynu do malého svazku koncentrovaného plazmového paprsku. Důležitým parametrem trysky je její výstupní průměr, který zajišťuje zaostření elektrického oblouku. Nejčastěji je vyrobena z mědi. Pro zvýšení její životnosti se její povrch poniklován. Při menších řezacích proudech do 30 A se může tryska dotýkat děleného materiálu. Při řezacích proudech nad 30 A musí mít tryska od materiálu mezeru, kvůli možnosti jejího poškození pomocí tepelného záření nebo kaskádového oblouku. Tryska musí být intenzivně chlazená, neboť je také velmi tepelně namáhána. [2, 3, 4, 8]

2.4 Druhy plazmových hořáků

Hořák s nepřeneseným (nezávislým) obloukem

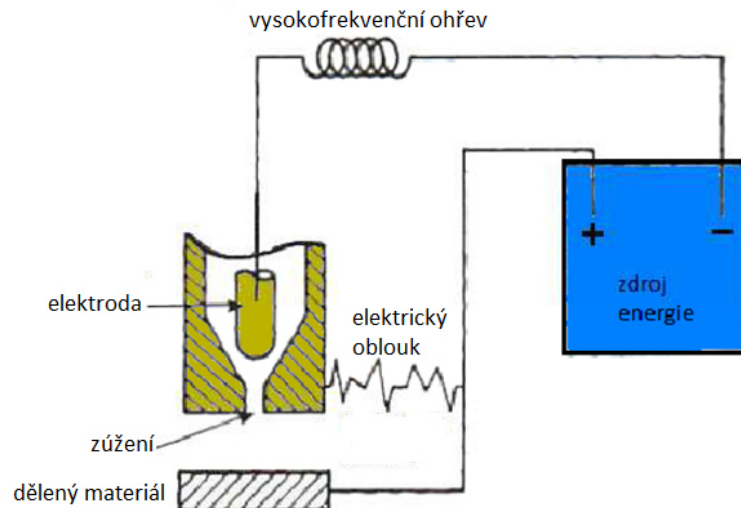
Zde je elektrický obvod proudu v plazmovém hořáku, kdy elektroda tvoří katodu a tryska anodu. Oblouk je tím pádem nezávislý na děleném materiálu. Zúžením oblouku pomocí trysky dochází ke zvýšení hustoty elektrického pole a dochází k velikému ohřátí plazmového plynu. Výsledkem je, že z hořáku vystupuje jen horký plazmový paprsek. Využívá se především pro dělení elektricky nevodivých materiálů a k nanášení ochranných povlaků.



Obr. 11 – Schéma zapojení s nezávislým obloukem [9]

Hořák s přeneseným (závislým) obloukem

U těchto hořáků vzniká elektrický oblouk mezi elektrodou (katoda) a děleným materiálem (anoda). Přítomnost plazmového paprsku a anodové oblasti v řezné spáře má za následek vyšší teploty než u hořáku s nepřeneseným obloukem. Důležité vlivy na kvalitu řezu jsou: rychlost posuvu, ochranné médium oblouku a charakteristika zdroje. Hořák se využívá především pro svařování, navařování a řezání neboť má lepší účinnost.



Obr. 12 - Schéma zapojení s závislým obloukem [9]

Hořák s kombinovaným zapojením

Využívá kombinaci dvou oblouků. Pomocný nezávislý oblouk se zapálí díky vysokonapěťové jiskře, která přeskočí mezi elektrodou a tryskou. V kanálu trysky dochází k ionizaci plazmového plynu díky pomocnému oblouku, jenž je vyfukován z hubice. Při přiblížení hořáku k dělenému materiálu, se zapálí hlavní závislý plazmový oblouk, který už má připravené prostředí pro snadnější řezání. [9, 12]

2.5 Plyny využívané pro dělení plazmou

Používané plyny pro tepelné dělení plazmou se dělí do tří různých skupin podle typu jejich využití:

Plazmový plyn – je přiváděn do hořáku, kde je pomocí vysoké teploty ionizován a následně změněn na plazmový paprsek. Využívají se různé druhy plazmových plynů, které se od sebe liší potenciálem energie a teplotou. Mezi nejpoužívanější plyny se řadí filtrovaný vzduch, argon Ar, helium He, kyslík O₂, dusík N₂, oxid uhličitý CO₂ a směsi argonu H5, H35 či směsi dusíku F5.

Ochranný plyn – chrání plazmový paprsek a dělené místo na materiálu před okolní atmosférou. Zde se využívá filtrovaný vzduch, argon Ar, dusík N₂, směsi O₂ + N₂, H₅, H₃₅ a F₅.

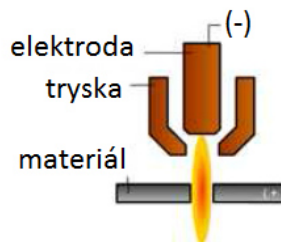
Fokusační plyn – zaostřuje a zužuje plazmový paprsek po jeho výstupu z trysky. Nejvíce používané plyny jsou argon Ar a směsi Ar + H₂ nebo Ar + N₂. [1, 10]

2.6 Stabilizace a metody dělení materiálu plazmovým paprskem

Stabilizace plazmového paprsku se postupně vyvíjela pro potřebu přesnějších a kvalitnějších řezů. Nejpoužívanější ochranná média jsou plyny nebo voda, které jsou přiváděny přes hořák k plazmovému paprsku. Výsledkem je lepší zaostření paprsku, tím i kvalita řezu a vyšší účinnost. Další podstatnou výhodou použití ochranného média je ochlazování hořáku a zmenšení tepelně ovlivněné oblasti děleného materiálu.

Konveční dělení

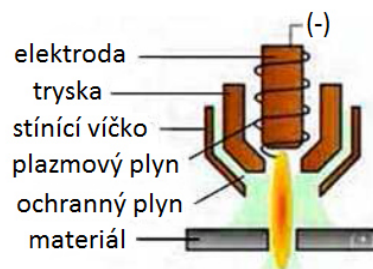
Tato metoda dělení je nejstarší a využívá pouze plazmový plyn bez ochranného média. Aktivní plyn tvoří pouze stlačený vzduch nebo dusík. Kvalita řezu a účinnost je ze všech metod nejhorší.



Obr. 13 – Schéma hořáku pro konvenční dělení [11]

Dvojplynové dělení

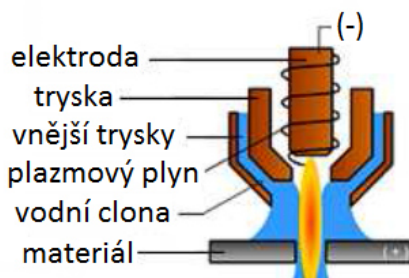
Zde se k dosažení kvalitního a čistšího okraje řezu používá kombinace dvou plynů. První plyn je plazmový a druhý plyn je ochranný, který chrání elektrický oblouk před atmosférou. Výsledky řezu jsou velmi dobré, proto jde o jednu z nejpoužívanějších metod dělení.



Obr. 14 - Schéma hořáku pro dvojplynové dělení [11]

Dělení s využitím ochranného proudu vody

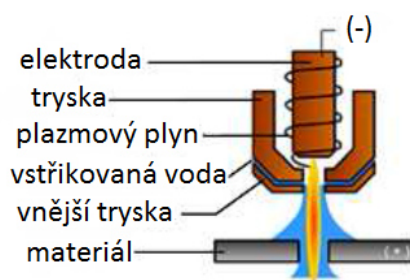
Tento způsob dělení využívá vodní clonu místo ochranného plynu. Plazmový paprsek je velmi dobře chráněn před okolní atmosférou a zároveň vodní clona zajišťuje lepší chlazení. Nejčastěji se používá pro řezání korozivzdorných ocelí a hliníku.



Obr. 15 - Schéma hořáku pro dělení s využitím proudu vody [11]

Dělení s vstřikováním vody

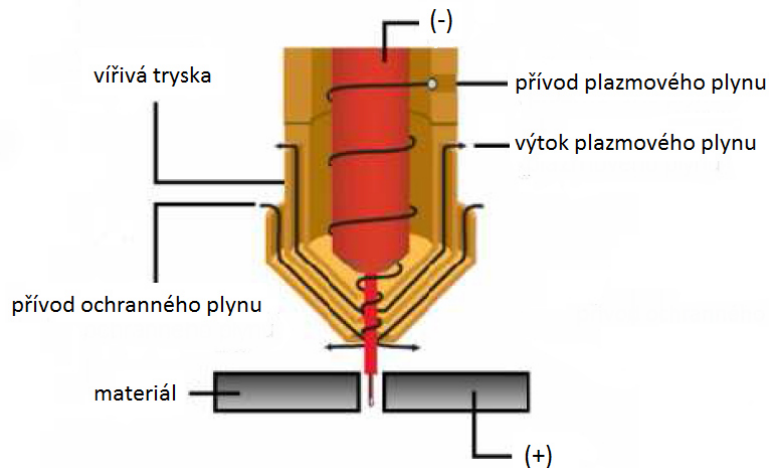
U této varianty dělení se používá plazmový plyn a ochranné médium tvoří voda, která se po částech vstřikuje přímo na oblouk. Malá část vody se odpaří, zbytek zapříčiní zúžení plazmového paprsku a docílíme vysoké kvality řezu.



Obr. 16 - Schéma hořáku pro dělení se vstřikem vody [11]

Dělení Hy-Definition

Tato metoda je od ostatních odlišná ve složitější konstrukci hořáku. Ten je vybaven vířivou vysokorychlostní tryskou, která vytváří vír plynu okolo elektrody a tím pozitivně přispívá k zapálení plazmového oblouku přímo v potřebném místě. Konec elektrody je tvořen kouskem hafnia, které se taví při zapálení oblouku. Počítač zde řídí celý proces a nastavuje průtok plynu do oblouku, velikost proudu, zmenšuje teplotní rozdíly a stabilizuje špičku trysky. [11, 12]



Obr. 17 - Schéma hořáku pro dělení Hy-Definition [11]

2.7 Řezací fáze plazmového dělení

Předfuk

Jedná se o začátek dělicího procesu. Plazmový plyn bývá přiváděn do dvou míst hořáku. Jedna část vede přes vnitřní trysku a okolo elektrody ven. Na toto proudění působí elektrický proud, plyn se ionizuje a vytváří se plazmový paprsek. Druhá část, kam je plazmový plyn vpouštěn, je vnější oblast hořáku. Zde pomáhá k odvádění tepla, zároveň slouží jako ochranné médium a tím i zvyšuje životnost součástí. Předfuk plynu trvá okolo sekund.

Pilotní oblouk

Následuje zapálení tzv. pilotního oblouku mezi elektrodou a tryskou. Ten vzniká po připojení vysokofrekvenčního napětí 5–10 kV. Kvůli velkému teplotnímu namáhání součástí je žádané, aby pilotní oblouk přešel co nejrychleji v řezací. Podle technologie dělení trvá hoření 1–4 sekundy.

Řezací oblouk

Při přiblížení hořáku k dělenému materiálu na potřebnou vzdálenost se zvýší elektrický proud a tím se pilotní oblouk přeneseme na uzemněný dělený materiál. Následně je zapálen hlavní řezací oblouk s napětím 100 až 250 V a elektrickým proudem, který se postupně zvyšuje na zadanou hodnotu. Důležitou částí tohoto procesu je udržování správného odstupu hořáku od děleného materiálu. V případě malé mezery může roztavený kov poškodit trysku. Naopak při příliš velké mezeře může vzniknout nežádoucí dvojitý (kaskádový) oblouk, který zničí trysku a tím i celý proces.

Dofuk

Po dokončení dělicího procesu následuje poslední fáze, kdy řezací oblouk zhasne a dalších 10-20 sekund pokračuje proudění plazmového a ochranného plynu. Výsledkem je intenzivnější ochlazování celého hořáku a tím i prodloužení životnosti všech součástí. [10, 12]

3 Tepelné dělení kovů laserovým paprskem

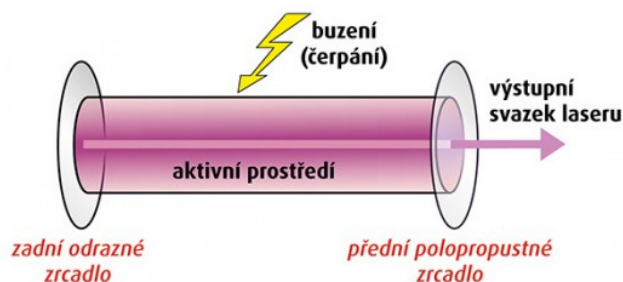
3.1 Historie laserového dělení

Albert Einstein v roce 1917 předpovídá, že kromě emise a absorpce záření existuje i stimulovaná emise, kde dochází k zesílení světla procházejícího látkou. Roku 1940 byla tato teorie použita sovětským fyzikem W. A. Fabrikantem. V roce 1958 byl A. L. Schawlowem a C. H. Townesem vytvořen první maser, který uplatňoval principy světla s využitím stimulované emise záření. První pevnolátkový rubínový laser sestrojil T. H. Maiman roku 1960. O rok později byl do provozu uveden plynový laser (CO_2) a následující rok polovodičový laser. Do dnešní doby prošel laser obrovským vývojem. Aktuálně dosahované výkony laserů se pohybují od 10^{-3}W do 10^{15}W a obdobný vývoj je i u jejich velikostí, zdrojů energie či typů aktivního prostředí.

3.2 Základní princip laseru

Slovo LASER je zkratka z anglického výrazu *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, což v češtině znamená “Zesilování světla stimulovanou emisí záření”. Laser je označován jako optický zesilovač, který generuje elektromagnetické záření pomocí procesu indukované emise fotonů vycházejících ze zákonů kvantové fyziky a termodynamiky.

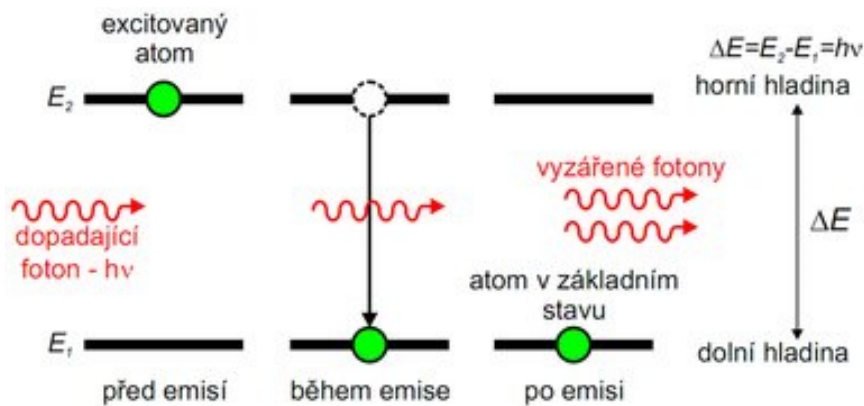
Základem každého laseru je aktivní prostředí, které je různými způsoby buzeno. Tím dodáváme laseru potřebnou energii a ta je pomocí procesu indukované emise vyzářena v podobě laserového paprsku. Velmi důležitou součástí je tzv. rezonátor, který se skládá z optické soustavy nejméně dvou zrcadel. Tato soustava nám umožní zesílit a zformovat výstupní záření. [13, 15, 16]



Obr. 18 – Základní princip laseru [13]

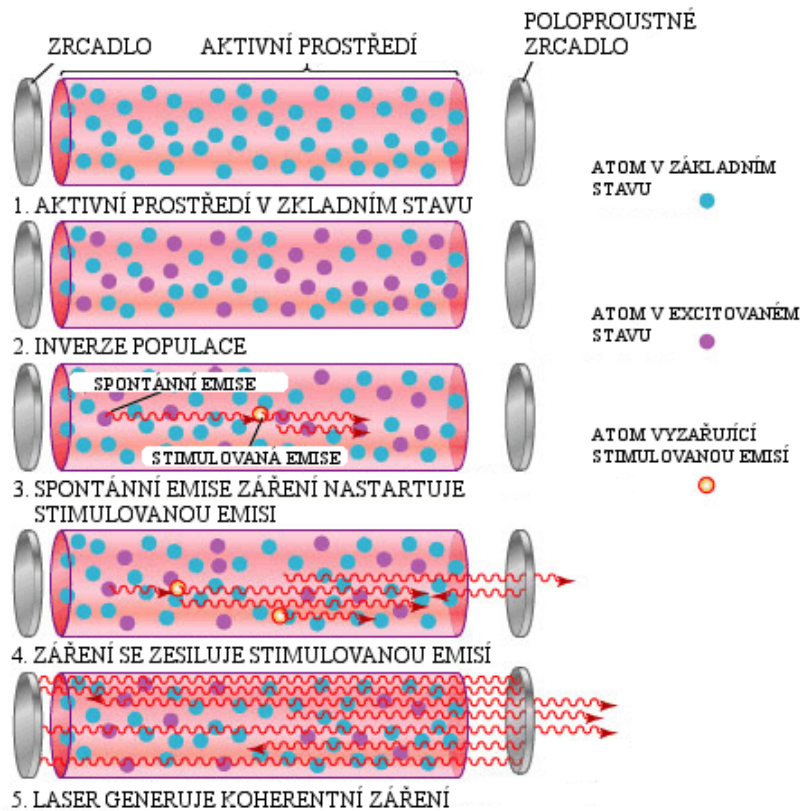
3.3 Přeměna energie na laserový paprsek

Aktivní prostředí obsahuje element, který se nachází buďto v základním stavu s nižší energií nebo ve vybuzeném (excitovaném) stavu s vyšší energií. Tímto elementem bývá nejčastěji atom, v jiných případech nahrazuje atom například chemická vazba či vibrační stav molekuly. Při přechodu z vyššího do nižšího energetického stavu tento element vyzáří foton. Tento jev se tvoří sám od sebe díky snaze elementu být ve stavu s co nejmenší energií neboli ve stavu termodynamické rovnováhy. Pomocí buzení se tento jev poruší a převede se aktivní prostředí do excitovaného stavu, kde má naprostá většina elementů vyšší energetický stav. Po přidání energie do aktivního prostředí začne proces stimulované emise a vytváří se proud fotonů (laserový paprsek). Vytváří se zde tzv. lavinový efekt, kdy foton dopadající na excitovaný element stimuluje jeho přechod z vyšší na nižší energetickou hladinu a přitom dojde k emisi dalších fotonů.



Obr. 19 – Zobrazení atomů a jejich hladin [15]

Jak fotony prochází rezonátorem od jednoho zrcadla k druhému, tak jejich počet rychle narůstá a dochází k uvolnění velké energie v podobě laserového paprsku fotonů. [14, 15, 16]



Obr. 20 – Zobrazení postupného vzniku laserového paprsku [15]

Vlastnosti laserového paprsku

Dopadající a emitovaný foton má stejnou energii (frekvenci), stejný směr, fázi a polarizaci. Z tohoto vyplývají tři základní vlastnosti laserového paprsku, který je:

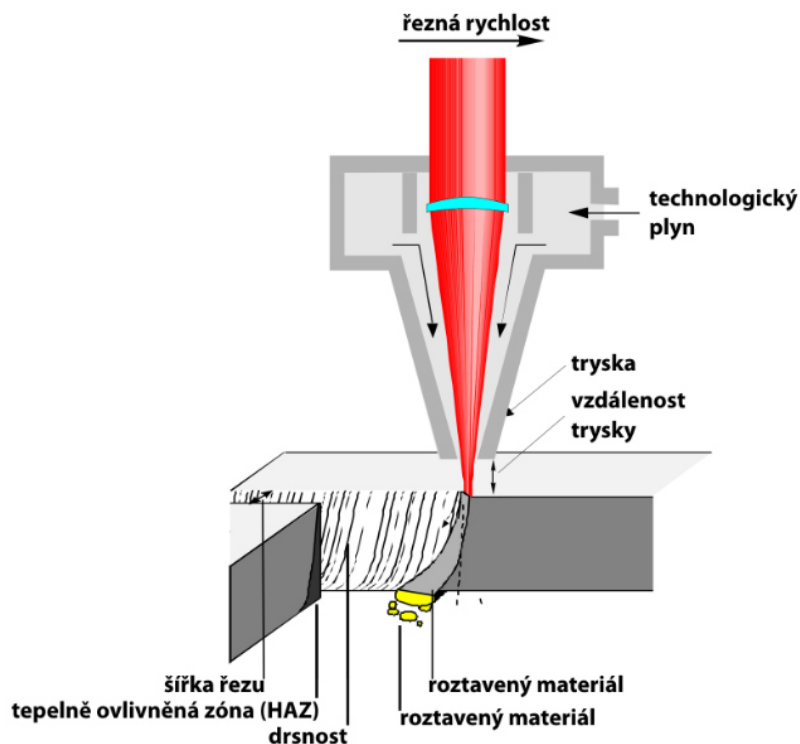
- Monochromatický – generované fotony mají stejnou frekvenci neboli vlnovou délku.
- Kolimovaný – fotony se od sebe nerozbíhají.
- Koherentní – fotony mají stejnoměrný průřez a jejich fázový rozdíl je konstatní.

3.4 Dělení kovu laserovým paprskem

Řezný proces se dělí podle způsobu odstraňování materiálu z místa řezu, kterému napomáhají asistenční plyny. Dělení kovu laserem může být tavné, oxidační a sublimační.

Tavná metoda

Dělený materiál se lokálně nataví a vzniklá tavenina se pomocí proudu vysoce čistého interního plynu oddělí od základního materiálu. Tento plyn se přímo nepodílí na vlastním procesu dělení. Maximální řezná rychlost se zvyšuje lineárně s výkonem laseru a zároveň se přibližně lineárně snižuje s tloušťkou řezaného materiálu a s jeho teplotou. Tato metoda se nejvíce uplatňuje k dělení neoxidovaných kovových materiálů neboť laserový paprsek je velmi málo absorbován. Při použití velmi čistého dusíku jako interního plynu jsou výsledné řezné plochy lesklé a nevyžadují žádné další finální úpravy.



Obr. 21- Princip dělení laserovým paprskem [14]

Oxidační metoda

Tato metoda se od tavné liší pouze použitím kyslíku jako interního plynu. Vzájemným působením roztaveného povrchu materiálu s kyslíkem dochází k exotermické reakci, která dopomáhá k většímu ohřívání materiálu. Výsledkem je dosažení vyšších maximálních rychlostí dělení, ovšem musíme počítat s horší kvalitou řezu, s větším tepelně ovlivněným pásmem a s vyšší drsností. Využitím pulzního provozu laseru, kdy se řezaný materiál v mezeře mezi jednotlivými pulzy ochladí, můžeme částečně vylepšit kvalitu řezu.

Sublimační metoda

Zde se materiál v místě řezu odpařuje a nevyužívá žádných přídavných plynů. Jeho výhodou je minimalizace řezné spáry, je však zapotřebí vysoká hustota energie laserového paprsku. Dále je důležité kontrolovat tloušťku řezaného materiálu, která nesmí překročit průměr paprsku. Jinak je možné, že vycházející páry materiálu se z kondenzují a svaří řez. Maximální řezná rychlost je nepřímo úměrná odpařovacímu teplu materiálu a přímo úměrná rychlosti proudění řezného plynu. [14, 18]

3.5 Základní dělení laserů

Lasery můžeme dělit podle různých kritérií.

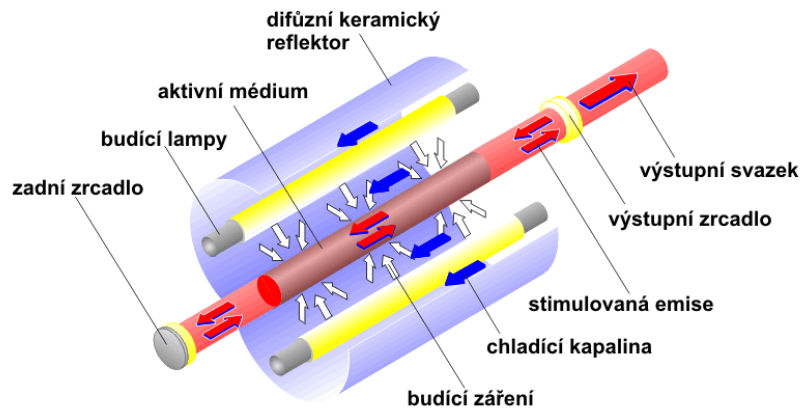
- Aktivního prostředí (je nejpoužívanější): pevnolátkové, polovodičové, plynové, kapalinové, plazmatické.
- Vlnových délek optického záření, které vysílají: infračervené záření, viditelné pásmo, ultrafialové či rentgenové záření.
- Typu kvantových přechodů (energetických hladin): molekulární (rotační, rotačně-vibrační, vibrační), elektronové, jaderné.
- Typu buzení: optické, buzení elektrickým výbojem, buzení elektronovým svazkem, buzení tepelnými změnami, buzení chemicky, rekombinací nebo injekcí nosičů náboje.
- Časového režimu provozu laseru: impulzní, kontinuální.
- Délce generovaného pulzu: s dlouhými pulzy, s krátkými pulzy, s velmi krátkými pulzy (pikosekundové, nanosekundové).

3.6 Lasery používané ve strojním průmyslu

Z důvodu mnoha různých typů laseru jsou v této podkapitole popsány jen lasery, které se nejvíce využívají pro tepelné dělení laserovým paprskem.

Nd: YAG laser

Patří do skupiny pevnolátkových laserů a jeho aktivní prostředí tvoří krystal yttriumaluminumgranát (YAG) dopovaný ionty neodymu (Nd). Tento krystal má tvar tyčinky dlouhé 15-20 cm. Buzení je zde optické, pomocí výbojek nebo laserových diod. Pracuje v pulzním či kontinuálním režimu a dosahuje výkonů 100 až 4000 W. Laserový svazek má vlnovou délku 1,06 μm .



Obr. 22 – Schéma Nd:YAG laseru [17]

Diskový laser

Princip je zde podobný jako u laseru Nd:YAG. Rozdíl je v aktivním prostředí, které tvoří malý disk. Ten je díky svému tvaru schopen udržet si rovnoměrné rozložení tepla a tím umožňuje dosáhnout vysokých výkonů až 16kW s dobrou kvalitou výstupního svazku. Nevýhodou je však nižší účinnost (15-20%) i životnost.

Vláknový laser

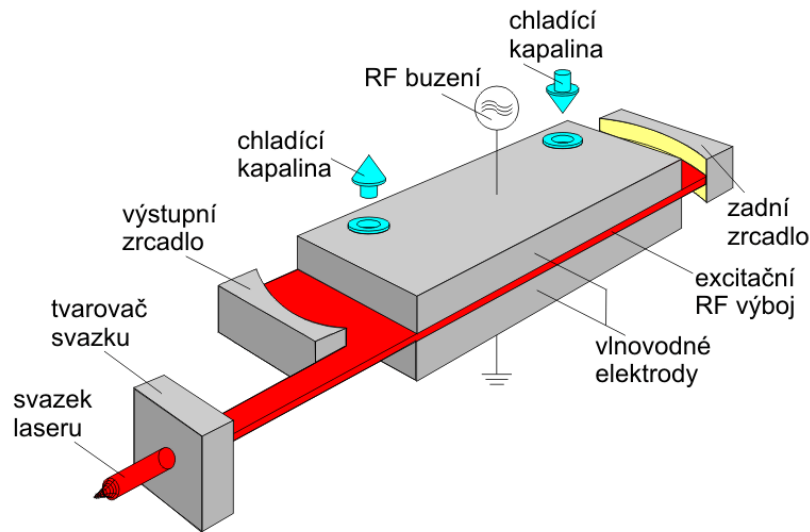
Aktivní prostředí zde tvoří dlouhé optické vlákno dopované yterbiem (Yb). Buzení je prováděno přes laserové diody na optickou spojku, která je přivedena do aktivního vlákna. Místo zrcadel jsou zde Braggovské mřížky, což jsou určité struktury vytvořené na optickém vlákně. Fotony prochází přes optický kolimátor na výstup. Jejich výhodou je jednoduchost, robustnost a modularita. Laser může být tvořen tzv. laserovými moduly, jejichž spojováním se navyšuje výkon až do 80kW. Mají vysokou účinnost (30-35%) i životnost.



Obr. 23 – Schéma vláknového laseru [17]

CO₂ laser

Patří do skupiny plyných laserů a jeho aktivní prostředí tvoří směs plynů obsahujících oxid uhličitý (CO₂). Jejich buzení se provádí radio-frekvenčně (RF) nebo pomocí elektrického výboje (DC). Díky možnosti různých výkonů se používají dva typy rezonátorů. Za prvé s hermeticky uzavřeným rezonátorem a za druhé tzv. průtočné lasery, kde plyn rezonátorem neustále proudí. To je nezbytné u vysokých výkonů nad 10kW. Je nutné používat zrcadla pro vedení laserového svazku kvůli jeho šířce 10,6 μ m a s tím souvisí i nároky na čistotu, údržbu a kalibraci.



Obr. 24 – Schéma CO₂ laseru [14]

Nejvíce využívané jsou CO₂ lasery do 5 kW. Ty budí aktivní plyn pomocí radio-frekvenčního vlnění probíhajícího mezi dvěma elektrodami, které současně zajišťují difúzní chlazení plynu v rezonátoru. Výsledkem je vysoce spolehlivý laser s dlouhou životností i nízkými provozními náklady. [15, 16, 17, 18]

Praktická část

4 Porovnávání součástí dělené kyslíkovým plamenem a plazmovým paprskem

Praktická část práce je zaměřena na výrobu součástí pomocí kyslíkového plamene a plazmového paprsku. Následně je vyhodnocována jakost děleného povrchu, rozměrová přesnost vyrobených součástí a provedeno jejich vzájemné porovnání.

4.1 Cíl experimentu

Hlavním cílem tohoto experimentu je porovnávání dvou odlišných technologických metod tepelného dělení navzájem mezi sebou a zároveň vyhodnocení jakosti děleného povrchu a geometrické přesnosti podle normy ČSN EN ISO 9013. Experiment byl proveden na čtyřech různých součástech, které jsou vyrobeny buďto rozdílnou technologií nebo mají jinou tloušťku materiálu. Výroba výpalků byla provedena ve firmě Mechel Service Stahlhandel Czech Republic s.r.o.

4.2 Průběh experimentu

Na úplném začátku byl zvolen druh materiálu a jeho vhodná tloušťka pro porovnávání. Poté byla navržena součást v programu SAPSproW a následně byly ve stejném programu vytvořeny pálicí plány zvlášť pro tloušťku 5 mm a 30 mm. Tyto plány byly poslány do strojů s technologií kyslíkového plamene a plazmového paprsku. Na skladě byly jeřábem vybrány určité zbytkové tabule a položeny na stoly strojů. Dále následovalo nastavení parametrů, které jsou u všech dělených součástí různé a jsou popsány v tabulkách 1 a 2. Po otevření plánu ve stroji bylo nutné změřit a uložit usazení zbytkové tabule na stole stroje. Poté už stačilo najet hořákem na startovní bod plánu a spustit samotné dělení. Po vychladnutí byla součást odebrána z pálicího stolu. Následovalo první vyhodnocení otřepů, jejich odstranitelnost a zdokumentování ve formě fotografií. Dále byla součást očištěna, změřena jakost řezu, rozměrová přesnost a vyhodnocena podle příslušné normy.

4.3 Volba materiálu

Pro součásti byly zvoleny tloušťky 5 mm a 30 mm, kde se už ukazují rozdíly mezi tepelným dělením kyslíkového plamene a plazmového paprsku. Materiál, z něhož jsou součásti vyrobeny, se podle normy ČSN EN 10027-1 označuje jako S235JR + N nebo podle normy ČSN 42 0002 je znám jako 11 375. Jedná se o nelegovanou ocel, svařitelnou a využívanou pro ocelové konstrukce.

S235JR + N

S – označení konstrukční oceli,

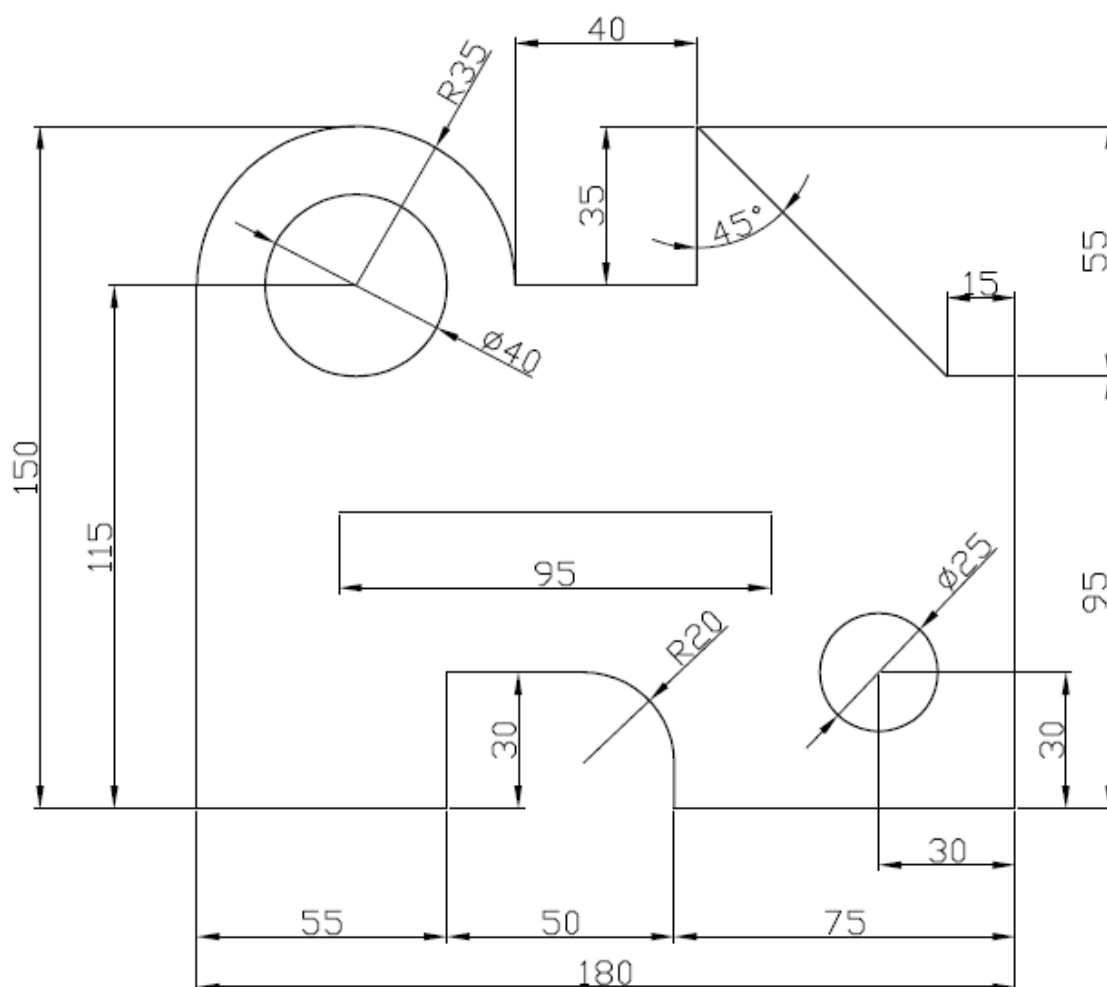
235 – minimální hodnota meze kluzu platná do tloušťky 16 mm,

JR – udává zaručenou hodnotu nárazové práce 27 J při teplotě +20 °C,

N – určuje normalizační způsob válcování.

4.4 Návrh součásti

Návrh součásti byl proveden v softwaru SAPSproW, který se používá pro vytváření pálicích plánů. Tvar součásti byl volen tak, aby v co největším rozsahu prověřil obě metody dělení. Z těchto důvodů zde nechybí pravoúhlé a ostré rohy, rádiusy, vnitřní otvory nebo čistý průřez materiálu. Součást by tak měla mít velkou vypovídající hodnotu při vyhodnocování a její návrh je zobrazen na obrázku 25.



Obr. 25 – Návrh součásti s jmenovitými rozměry

4.5 Parametry dělení kyslíkovým plamenem

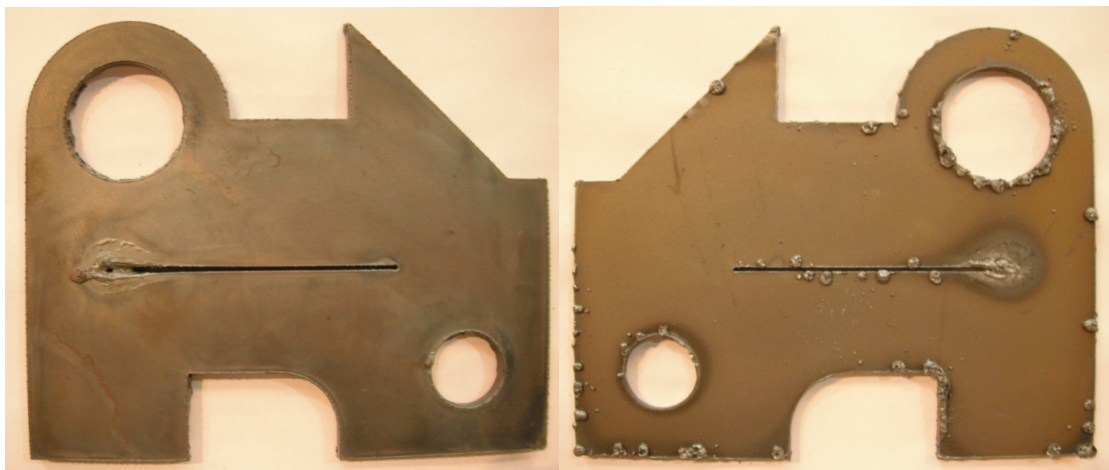
Součásti tepelně dělené kyslíkovým plamenem byly zhotoveny na pálcím automatu Cortina M3600, který byl uveden do výroby od roku 1998. Stroj je napájen zdrojem MS100, typu RM1 z roku 2004. Obsahuje čtyři hořáky GCE, kde každý má bezpečnostní systém Coolex zabraňující vzniku zpětného šlehnutí. Celý stroj je usazen na odsávaném stole velikosti 2,5x16 m.

Dělení kyslíkovým plamenem			
Nastavované parametry		tloušťka 5 mm	tloušťka 30 mm
Druh řezného plynu		Kyslík	Kyslík
Druh nahřívacího plynu		Propan + kyslík	Propan + kyslík
Tlak při propalu	Nahřívací kyslík	0 bar	4 bar
	Řezací kyslík	0 bar	1,5 bar
Tlak při dělení	Nahřívací kyslík	1,5 bar	2,5 bar
	Řezací kyslík	2 bar	7 bar
Tlak propanu		0,2 bar	0,2 bar
Řezací tryska		3-10 mm	25-40 mm
Vzdálenost hořáku od výpalku		2-4 mm	5-10 mm
Nahřívací čas při propalu		10 sec	25 sec
Řezný čas při propalu		0,1 sec	1 sec
Velikost řezné spáry		0,5 mm	1,25 mm
Řezná rychlost		550 mm/min	440 mm/min
Délka pálení		1018 mm	1018 mm
Počet propalů		4	4
Celkový čas dělení		148 sec	266 sec

Tab. 1 – Parametry pro dělení kyslíkovým plamenem

Součást 5K dělená kyslíkovým plamenem do tloušťky 5mm

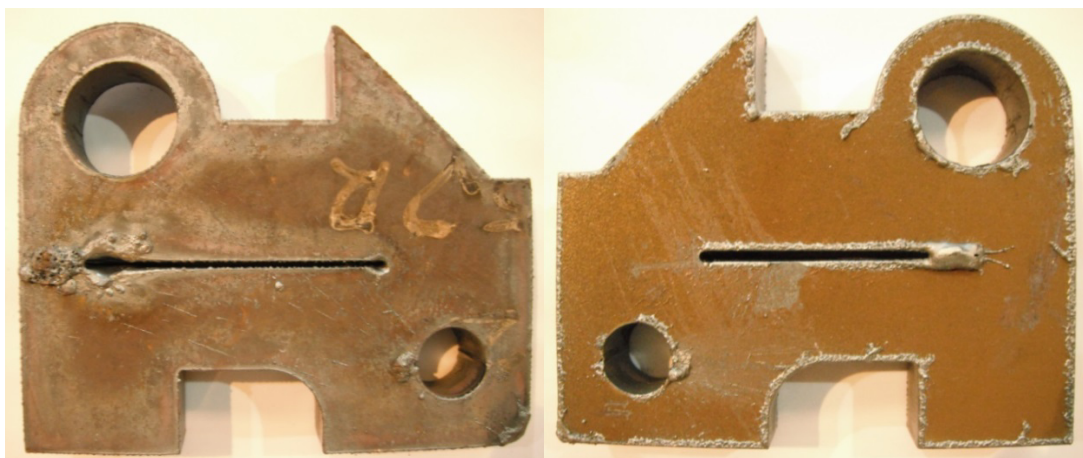
Součást je zvrchní strany bez otřepů, výjimkou je pouze struska, která se rozstříkla z vnitřního propalu. Na spodní straně zůstala napečená struska kapkovitých tvarů o průměru do 5 mm. Výskyt otřepů je minimální a jsou lehce odstranitelné pilníkem. Na součásti lze vidět velké tepelně ovlivněné oblasti, kdy relativně tenký plech je vystaven vysoké teplotě.



Obr. 26 – Přední a zadní strana součásti 5K

Součást 30K dělená kyslíkovým plamenem do tloušťky 30mm

Součást je zvrchní strany bez otřepů, výjimkou je pouze struska, která se rozstříkla z vnitřního propalu. Na spodní straně jsou souvislé otřepy po celém obvodu součásti. Připečená struska lze snadno odstranit pilníkem. Součást má menší odchylku okolo nájezdu, kde se nachází i podpálený roh. Menší zápal obsahuje i vnitřní otvor průměru 25 mm.



Obr. 27 - Přední a zadní strana součásti 30K

4.6 Parametry dělení plazmovým paprskem

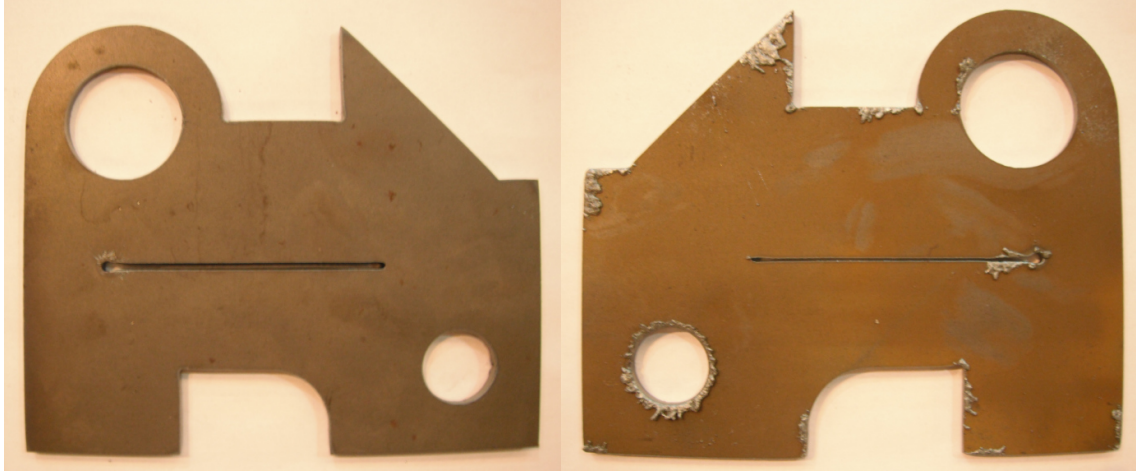
Součásti tepelně dělené plazmovým paprskem jsou zhotoveny na pálcím automatu Messer Multitherm 5000 z roku 2007. Tento stroj je vybaven plazmovým zdrojem HPR 260 od firmy Hypertherm, jenž se skládá ze zdroje napájení, zapalovací konzoly, plynové konzoly, řídicí konzoly a jedním hořákem. Je schopný dodávat výstupní proud až 260 A o výkonu 51,6 kW. Celý stroj je usazen na odsávaném stole velikosti 4x12 m.

Dělení plazmovým paprskem		
Nastavované parametry	tloušťka 5 mm	tloušťka 30 mm
Druh plazmového plynu	Kyslík	Kyslík
Druh ochranného plynu	Vzduch	Vzduch
Předtok	Plazmový plyn	50 l/min
	Ochranný plyn	24 l/min
Řezný tok	Plazmový plyn	30 l/min
	Ochranný plyn	65 l/min
Nastavený proud	Plazmový plyn	72 l/min
	Ochranný plyn	69 l/min
Nastavený proud	80 A	200 A
Napětí na oblouku	122 V	144 V
Vzdálenost horáku od výpalku	2 mm	5,1 mm
Výchozí výška propalu	4 mm	10,2 mm
Doba propalu	0,3 sec	1 sec
Velikost řezné spáry	1,6 mm	4 mm
Řezná rychlost	3700 mm/min	850 mm/min
Délka pálení	1018 mm	1018 mm
Počet propalů	4	4
Celkový čas dělení	49 sec	104 sec

Tab. 2 - Parametry pro dělení plazmovým paprskem

Součást 5P dělená plazmovým paprskem do tloušťky 5mm

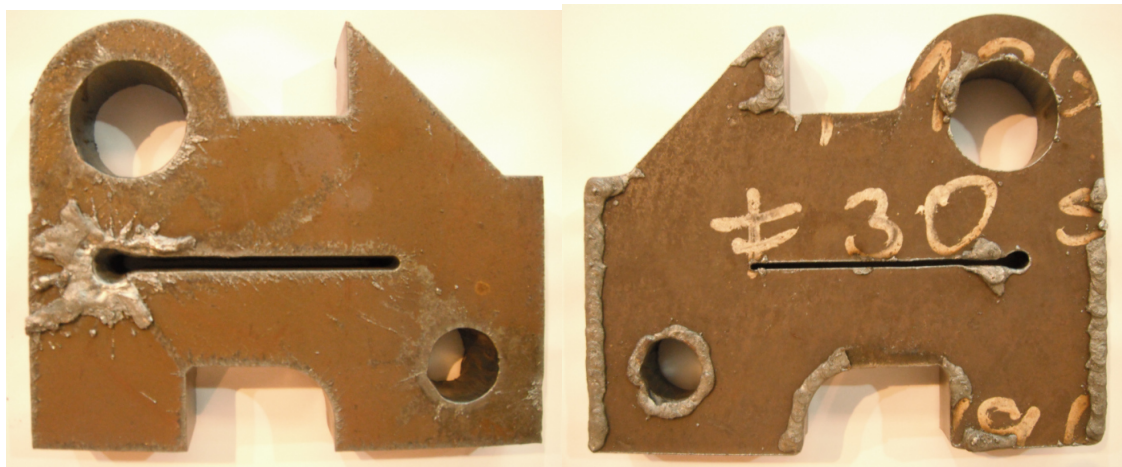
Součást je z vrchní strany bez otřepů. Ze spodní strany se připečená struska objevuje minimálně a je snadno odstranitelná pilníkem. Výpalek má lehce podpálené rohy a jsou zde patrné odchylky úhlů.



Obr. 28 - Přední a zadní strana součásti 5P

Součást 30P dělená plazmovým paprskem do tloušťky 30mm

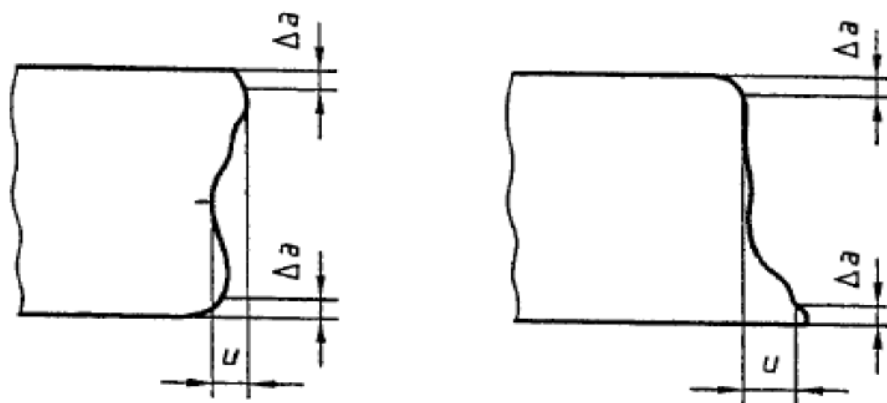
Součást má na vrchní straně minimální otřepy snadno odstranitelné pilníkem a obrovskou kaluž strusky po vnitřním propalu, která je těžce odstranitelná bruskou. Ze spodní strany má součást částečně souvislé otřepy, jejich odstranitelnost je střední, za pomoci sekáče. Výpalek má podpálené rohy a v některých místech i velké odchylky úhlů. Oba vnitřní otvory jsou hodně podpáleny. Proces dělení byl přerušen z důvodu strusky v cestě hořáku a následně opětovně spuštěn. Toto zastavení zanechalo na obvodu nepatrnou rýhu. Při dojezdu obvodu součásti jsou nepatrné nerovnosti řezu.



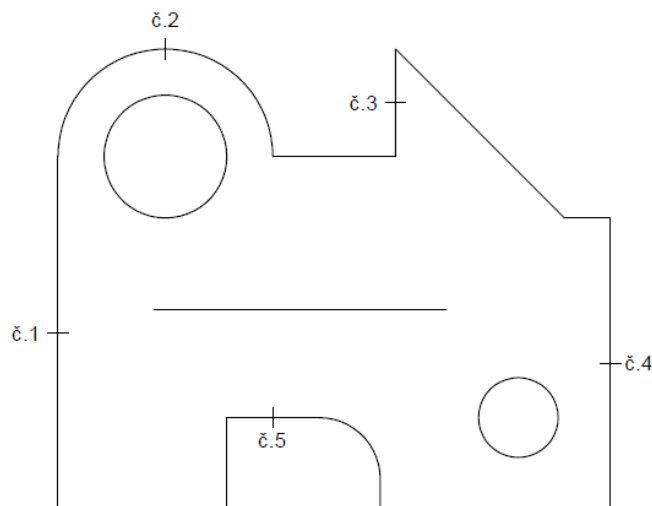
Obr. 29 - Přední a zadní strana součásti 30P

4.7 Úchylka kolmosti u

Tato úchylka kolmosti nám určuje, jaká je vzdálenost mezi dvěma rovnoběžnými přímkami, mezi které je vepsán profil řezu. Vyhodnocuje se pouze z omezené oblasti plochy řezu, která je zmenšena o hodnotu Δa . Pro zmenšení povrchu řezu je dovolené natavení horní hrany řezu. Norma ČSN EN ISO 9013 určuje Δa pro tloušťku 5 mm velikost 0,3 mm a pro tloušťku 30 mm velikost 1,5 mm. Měřená místa jsou rozprostřena po celém řezu součásti a jsou znázorněna na obrázku 30. Samotné měření bylo provedeno pomocí číselníkového úchylkoměru a jeho výsledky zapsány do tabulky 4. [19]



Obr. 30 – Měření úchylky kolmosti [19]



Obr. 30 – Měřící místa

Toleranční třída	Úchylka kolmosti u [mm]	Hodnota úchylky u pro tl.5 mm	Hodnota úchylky u pro tl.30 mm
1	$0,05 + 0,003 \cdot a$	0,065	0,14
2	$0,15 + 0,007 \cdot a$	0,185	0,36
3	$0,4 + 0,01 \cdot a$	0,45	0,7
4	$0,8 + 0,02 \cdot a$	0,9	1,4
5	$1,2 + 0,035 \cdot a$	1,375	2,25

Tab. 3 – Toleranční třídy pro úchylky kolmosti

Měření úchylek kolmosti u [mm]							
Součást	u_1	u_2	u_3	u_4	u_5	u_{max}	tol. třída
5K	0,48	0,27	0,24	0,30	0,51	0,51	4
5P	0,29	0,40	0,18	0,28	0,37	0,40	3
30K	0,69	0,61	0,58	0,40	0,68	0,69	3
30P	0,63	0,82	0,73	0,88	0,81	0,88	4

Tab. 4 – Naměřené hodnoty úchylek kolmosti

Součást 5K má o třídu horší úchylku kolmosti než součást 5P, důvodem je vystavení relativně tenkého plechu vysoké teplotě. Plazmový paprsek dělí součást 9-krát rychleji a proto není tolik tepelně ovlivněn. U tlustšího plechu má naopak součást 30K o třídu lepší úchylku kolmosti než součást 30P. Odchylna je u součásti 30P způsobena vířením plazmového plynu nebo nevhodně zvolenými parametry, které se na tlustším materiálu projeví více než u tenčích materiálů.

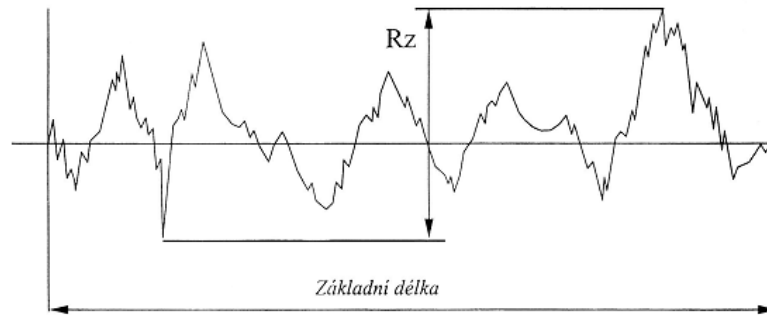
4.8 Výška profilu Ra a Rz

Průměrná aritmetická úchylka profilu Ra je definována jako aritmetický průměr absolutních hodnot pořadnic v rozsahu základní délky.



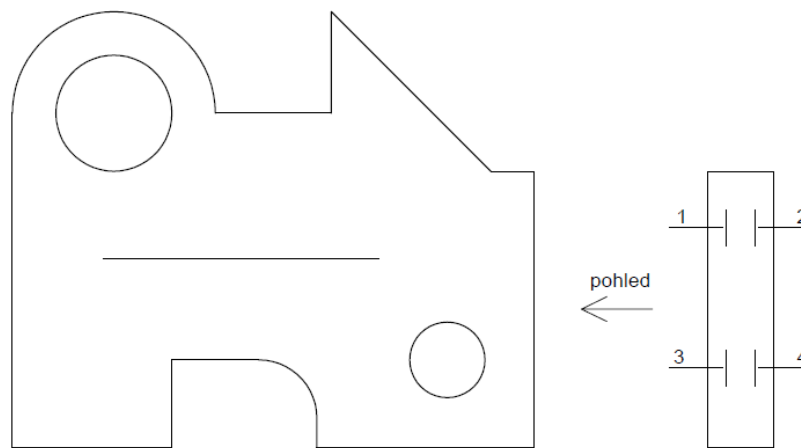
Obr. 31 – Zobrazení výpočtu aritmetické úchylky profilu Ra [19]

Největší výška profilu Rz je definována jako součet výšky největšího výstupku profilu a hloubky nejnižší prohlubně profilu v rozsahu základní délky.



Obr. 32 - Zobrazení výpočtu nejvyšší úchylky profilu Rz [19]

Na měření výšky profilu byl použit elektrický přístroj od firmy Moore & Wright, typ MTR110. Měřená místa jsou zobrazeny na obrázku 33 a podle normy ISO 9013 umístěny ve 2/3 tloušťky materiálu. [19]



Obr. 33 – Měřící místa pro úchylku výšky profilu

Toleranční pole	Průměrná výška profilu Rz [μm]	Hodnota Rz [μm] pro a = 5 mm	Hodnota Rz [μm] pro a = 30 mm
1	$10 + (0,6 \cdot a)$	13	28
2	$40 + (0,8 \cdot a)$	44	64
3	$70 + (1,2 \cdot a)$	76	106
4	$110 + (1,8 \cdot a)$	119	164

Tab. 5 - Toleranční třídy pro úchylky výšky profilu

Měření výšky profilu Ra [μm]					
Součást	měření č.1	měření č.2	měření č.3	měření č.4	průměr Ra
5K	4,20	5,70	7,37	5,22	5,62
5P	0,92	0,76	0,83	0,59	0,78
30K	4,60	3,17	3,18	2,58	3,38
30P	2,21	1,48	1,90	1,79	1,85

Tab. 6 – Naměřené hodnoty Ra

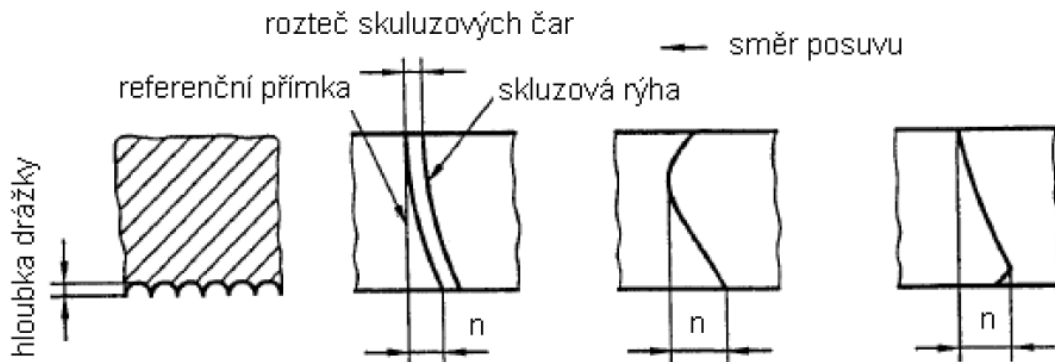
Měření výšky profilu Rz [μm]					
Součást	měření č.1	měření č.2	měření č.3	měření č.4	Tol. pole
5K	17,88	24,90	25,20	24,60	2
5P	4,12	3,16	3,77	3,08	1
30K	11,57	13,05	18,76	11,63	1
30P	9,82	8,28	9,54	10,01	1

Tab. 7 – Naměřené hodnoty pro Rz

Měření aritmetické a maximální úchytky profilu ukázalo, že součásti dělené kyslíkovým plamenem mají vyšší drsnost povrchu řezu. Důvodem je zde vystavení materiálu vyšší teplotě při nižší řezné rychlosti než u plazmového paprsku.

4.9 Skluz n

Dle normy ISO 9013 je skluz označován jako průmět vzdálenosti dvěma body skluzové rýhy ve směru řezání. Měření probíhalo v přerýsování profilu na průsvitný papír, kde byl následně skluz změřen pomocí úhelníku a posuvného měřítka. Norma uvádí, že u tohoto hrubého měření vzniká mezní chyba měření 0,2 mm a je bráno spíše jako orientační. Na obrázku 30 jsou zobrazeny měřená místa č.1, č.2, č.4 a hodnoty zapsány do tabulky 8. [19]



Obr. 34 - Měření skluzu n [19]

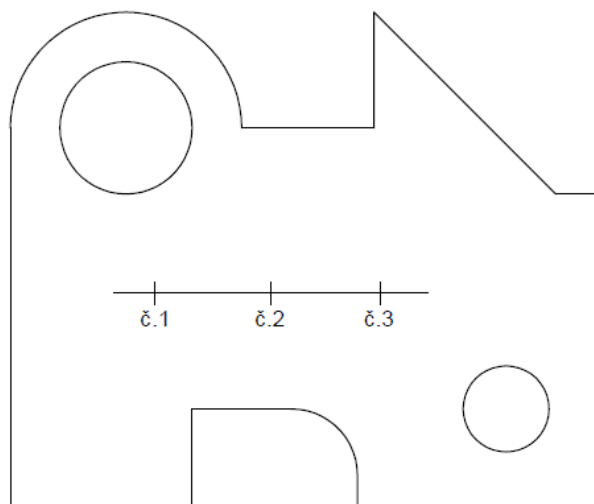
Měření skluzu n [mm]					
Součást	n_1	n_2	n_3	n_{\max}	úhel skluzu [°]
5K	0,6	0,4	0,5	0,8	7° 12'
5P	0,3	0,3	0,4	0,4	4° 48'
30K	1,1	1,3	1,1	1,3	2° 36'
30P	2,7	2,3	2,1	2,7	5° 24'

Tab. 8 – Naměřené hodnoty skluzu

Všechny součásti mají, až na nepatrné výjimky, správný úhel skluzu a linie řezu je souvislá.

4.10 Šířka řezné spáry s

Dle normy ISO 9013 je šířka řezné spáry vzdálenost mezi povrchy řezu na horní hraně řezu, nebo pokud došlo k natavení horní hrany, bezprostředně pod tímto natavením hrany. Pro zajímavost jsem změřil šířku řezné spáry u součástí tloušťky 30 mm i ze spodní hrany řezu, kde nám rozdíl potvrzuje předešlé měření kolmosti. U každé součásti jsou v jejím průřezu provedena tři měření dle obrázku 35 pomocí posuvného měřítka. [19]



Obr. 35 - Měřící místa pro šířku řezné spáry

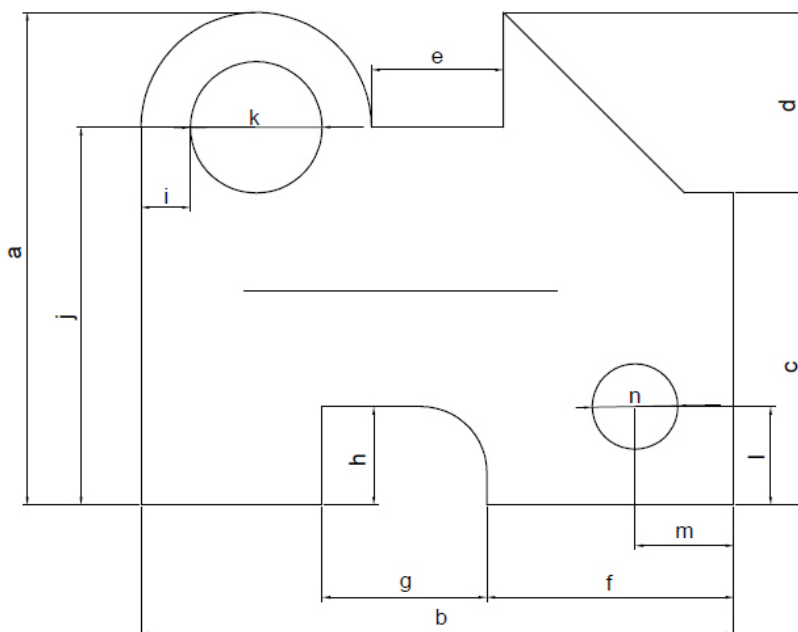
Měření šířky řezné spáry [mm]						
Součást	s ₁	s ₂	s ₃	průměr s	nastavená s	
5K	1,34	1,12	1,18	1,21	1,00	
5P	1,71	1,68	1,72	1,70	1,60	
30K	horní strana	1,91	1,98	1,95	1,95	2,50
	spodní strana	2,85	2,90	3,08	2,94	2,50
30P	horní strana	3,98	4,08	3,95	4,00	4,00
	spodní strana	2,07	2,08	2,10	2,08	4,00

Tab. 9 – Naměřené hodnoty šířky řezné spáry

Výsledek měření znovu potvrdil vysoké tepelné namáhání plechu na součásti 5K a tím i širší řeznou spáru o 0,21 mm. Součást 5P má oproti nastavené hodnotě rozdíl jen 0,1 mm. Součást 30K má správnou šířku řezné spáry přímo uprostřed tloušťky materiálu. Plamen byl správně nastaven a tento rozdíl nám potvrzuje naměřenou úchylku kolmosti. Součást 30P má na své horní hraně přesnou šířku řezné spáry, ale na spodní hraně odchylku 2,08 mm. Tento rozdíl je dán tloušťkou materiálu, kdy plazmový paprsek nemá dostatek energie k udržení stejné šířky řezné spáry a zároveň nám také potvrzuje naměřenou úchylku kolmosti.

4.11 Úchylky vybraných jmenovitých rozměrů součásti

Vybraná měřená místa jsou znázorněna na obrázku 36 a jsou jednotlivě měřena pro každou součást zvlášť. Následně jsou zapsány do tabulky, kde jsou porovnány jmenovité rozměry a zároveň určena jejich třída přesnosti dle normy ČSN EN ISO 9013. Měření bylo provedeno posuvným měřítkem. [19]



Obr. 36 – Zobrazení vybraných rozměrů

Měření úchylek vybraných rozměrů pro součást 5K [mm]					
Rozměr	Jmenovitá hodnota	Naměřená hodnota součásti 5K	Skutečná úchylka	Mezní úchylka	Toleranční třída
a	150,00	147,97	2,03	± 1,1	2
b	180,00	178,25	1,75	± 1,1	2
c	95,00	94,42	0,58	± 0,9	2
d	55,00	54,28	0,72	± 0,9	2
e	40,00	40,20	-0,20	± 0,4	1
f	75,00	73,96	1,04	± 0,9	2
g	50,00	49,91	0,09	± 0,4	1
h	30,00	29,62	0,38	± 0,4	1
i	15,00	14,38	0,62	± 0,8	2
j	115,00	114,25	0,75	± 0,9	2
k	40,00	39,88	0,12	± 0,4	1
l	30,00	29,66	0,34	± 0,4	1
m	30,00	30,04	-0,04	± 0,4	1
n	25,00	24,81	0,19	± 0,4	1

Tab. 10 – Naměřené hodnoty jmenovitých rozměrů pro součást 5K

Měření úchylek vybraných rozměrů pro součást 5P [mm]					
Rozměr	Jmenovitá hodnota	Naměřená hodnota součásti 5K	Skutečná úchylka	Mezní úchylka	Toleranční třída
a	150,00	149,65	0,35	± 0,5	1
b	180,00	180,00	0,00	± 0,5	1
c	95,00	94,72	0,28	± 0,4	1
d	55,00	54,10	0,90	± 0,9	2
e	40,00	40,61	-0,61	± 0,9	2
f	75,00	74,95	0,05	± 0,4	1
g	50,00	50,32	-0,32	± 0,4	1
h	30,00	29,63	0,37	± 0,4	1
i	15,00	15,00	0,00	± 0,4	1
j	115,00	115,07	-0,07	± 0,4	1
k	40,00	39,91	0,09	± 0,4	1
l	30,00	30,12	-0,12	± 0,4	1
m	30,00	30,06	-0,06	± 0,4	1
n	25,00	25,08	-0,08	± 0,4	1

Tab. 11 – Naměřené hodnoty jmenovitých rozměrů pro součást 5P

Měření úchylek vybraných rozměrů pro součást 30K [mm]					
Rozměr	Jmenovitá hodnota	Naměřená hodnota součásti 5K	Skutečná úchylka	Mezní úchylka	Toleranční třída
a	150,00	150,35	-0,35	± 0,8	1
b	180,00	179,75	0,25	± 0,8	1
c	95,00	95,57	-0,57	± 0,7	1
d	55,00	54,35	0,65	± 0,7	1
e	40,00	39,21	0,79	± 1,8	2
f	75,00	75,30	-0,30	± 0,7	1
g	50,00	49,12	0,88	± 1,8	2
h	30,00	29,96	0,04	± 0,7	1
i	15,00	16,00	-1,00	± 1,8	2
j	115,00	115,95	-0,95	± 1,8	2
k	40,00	39,10	0,90	± 1,8	2
l	30,00	30,87	-0,87	± 1,8	2
m	30,00	29,93	0,07	± 0,7	1
n	25,00	24,37	0,63	± 0,7	1

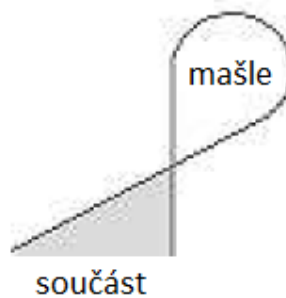
Tab. 12 – Naměřené hodnoty jmenovitých rozměrů pro součást 30K

Měření úchylek vybraných rozměrů pro součást 30P [mm]					
Rozměr	Jmenovitá hodnota	Naměřená hodnota součásti 5K	Skutečná úchylka	Mezní úchylka	Toleranční třída
a	150,00	149,97	0,03	± 0,8	1
b	180,00	180,20	-0,20	± 0,8	1
c	95,00	95,56	-0,56	± 0,7	1
d	55,00	53,44	1,56	± 1,8	2
e	40,00	39,02	0,98	± 1,8	2
f	75,00	75,20	-0,20	± 0,7	1
g	50,00	49,68	0,32	± 0,7	1
h	30,00	29,64	0,36	± 0,7	1
i	15,00	15,74	-0,74	± 1,8	2
j	115,00	113,95	1,05	± 1,8	2
k	40,00	38,50	1,50	± 1,8	2
l	30,00	28,71	1,29	± 1,8	2
m	30,00	29,76	0,24	± 0,7	1
n	25,00	23,41	1,59	± 1,8	2

Tab. 13 – Naměřené hodnoty jmenovitých rozměrů pro součást 30P

Součást 5K nesplňuje svými rozměry normu ISO EN 9013! Důvodem, jak už bylo zmíněno, je velké tepelné namáhání plechu. V jednu chvíli byla celá součást při dělení úplně červená, což naznačuje teplotu okolo 1000 °C. Dalším důvodem je vypalování součásti do nerovného a ohnutého zbytkového plechu, který byl už před touto výrobou vystaven velkému tepelnému ovlivnění.

Součást 5P splňuje toleranční třídu 2 kvůli ostrému rohu. Kdyby se na toto místo vytvořila při tvorbě plánu tzv. mašle, tak by upálený roh byl krásně ostrý a výpalek by splnil toleranční třídu 1. Vytvoření mašle znamená i zvětšení velikosti součásti a současně i delší dělicí řez.



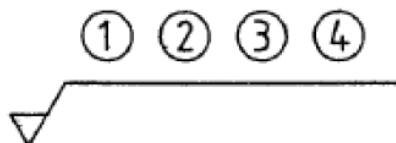
Obr. 37 – Zobrazení mašle

Součást 30K splňuje toleranční třídu 2. Vykazuje rozměrové odchylky, které nejsou závažné a ani se neblíží k hraniční toleranci.

Součást 30P splňuje toleranční třídu 2. Plazmový paprsek má velké problémy při dělení vnitřních otvorů, vnitřních a ostrých rohů, které nejsou u tenčích plechů tolik patrné jako zde. Tyto problémy jsou zřejmé jak v odchylkách příslušných rozměrů, tak i při vizuální kontrole.

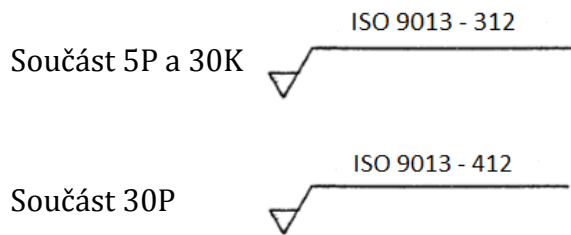
4.12 Výsledná jakost přesnosti povrchu řezu

Stupeň jakosti a toleranční třída, které jsou požadovány při tepelném dělení, musí být označeny podle ISO 1302, pomocí následující značky umístěné na výkresu součásti. [19]



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

Podle uvedených měření jsou výsledné jakosti řezu a rozměrová přesnost jednotlivých součástí zobrazena na obrázku.



Součást 5K svými jmenovitými rozměry neodpovídá normě ČSN EN ISO 9013.

Závěr

Cílem bakalářské práce byla teoretická studie zabývající se technologiemi tepelného dělení kovů. Podrobněji byly představeny metody kyslíkového plamene, plazmového a laserového paprsku. Druhá praktická část obsahuje experiment, který ukazuje výrobu součástí různými technologickými postupy s různou tloušťkou materiálu. Tyto součásti byly vyhodnocovány dle normy ČSN EN ISO 9013, která zahrnuje klasifikaci jakosti tepelných řezů a jejich povolené geometrické rozměry.

V praktické části jsou vyrobeny dvě součásti 5K, 30K metodou dělení kyslíkovým plamenem a dvě součásti 5P, 30P metodou dělení plazmovým paprskem. Každá ze součástí má jinou tloušťku materiálu 5 mm a 30 mm. Různé parametry pro dělení těchto součástí byly nastaveny tak, jak udávají výrobci.

Podle již zmíněné normy bylo provedeno měření úchylky kolmosti, průměrné výšky prvků profilu, skluz a jmenovité rozměrové úchylky. Jako doplňující informace byla posouzena natavená struska na součásti a šířka řezné spáry. Při vyhodnocování vzorků bylo zjištěno, že součásti 5P a 30K jsou podobné svojí přesností a jakostí povrchu, i když jsou vyrobeny každá jinou metodou. U součásti 30P byla naměřena větší úchylka kolmosti a součást 5K dokonce svými jmenovitými rozměry norma nepřipouští.

Pro metodu tepelného dělení kyslíkovým plamenem bych doporučoval využívat tloušťku materiálu od 15 mm, kde je už tepelně ovlivněná oblast menší než u tloušťky 5 mm a zároveň je schopna velice dobře dělit složité součásti s požadovanou přesností. U metody tepelného dělení plazmovým paprskem bych doporučil vyrábět složité součásti do tloušťky 15 mm. Zde má velikou výhodu rychlost řezu. Pro dosažení výborné kvality řezu je však zapotřebí udělat na ostré rohy tzv. mašle, které zabrání jeho upálení. Tvarově jednoduché součásti, které nemají vnitřní úhly a otvory, by se daly vyrábět plazmovým paprskem až do tloušťky 30 mm s 200 A sestavou.

Seznam použité literatury

- [1] Historie svařování [online 24.5.2015]. Dostupné na WWW:
http://wiki.eanswers.com/cs/Historie_sva%C5%99ov%C3%A1n%C3%AD
- [2] Kuncipál J., Pilous V., Dunovský J. : Nové technologie svařování, SNTL, Praha 1984.
- [3] Minařík V. : Tepelné dělení materiálů, ČVUT Praha 1993.
- [4] SPŠ a OA Uherský Brod : Progresivní způsoby dělení materiálu ve výrobním procesu, Uherský Brod 2012.
- [5] Svařování plamenem [online 24.5.2015]. Dostupné na WWW:
http://cs.wikipedia.org/wiki/Sva%C5%99ov%C3%A1n%C3%AD_plamenem
- [6] Svařování plamenem [online 24.5.2015]. Dostupné na WWW:
<http://coptel.coptkm.cz/reposit.php?action=0&id=33466&instance=2>
- [7] Fojtík P. : Dělení technických materiálů [online 24.5.2015].
Dostupné na WWW:
<http://www.ssamp-krnov.cz/upload/soubory/00030.pdf>
- [8] Gross B., Gryce B., Miklóssy K. : Technika plazmatu SNTL, Praha 1967.
- [9] Maňková I. : Progresivní technologie, Košice 2000.
- [10] HyPerformance Plasma HPR260 Manual gas: Instruction manual 804940 – revision 4
- [11] Hypertherm [online 24.5.2015]. Dostupné na WWW:
<http://www.hypertherm.com/>
- [12] Sedlák O. : Technologie řezání plazmovým paprskem [online 24.5.2015].
Dostupné na WWW:
https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=37970
- [13] Laser [online 24.5.2015]. Dostupné na WWW:
<http://cs.wikipedia.org/wiki/Laser>

- [14] Kořán P. : Laserové řezání [online 24.5.2015]. Dostupné na WWW:
<http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---laserove-rezani-laser-cutting-129>
- [15] Kořán P. : Základní princip laseru a jejich dělení [online 24.5.2015].
Dostupné na WWW:
<http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---zakladni-princip-laseru-a-jejich-deleni-127>
- [16] Novák M. : Průmyslové lasery – princip laseru [online 24.5.2015].
Dostupné na WWW:
<http://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-1-princip-laseru.html>
- [17] Novák M. : Základní přehled průmyslových laserů [online 24.5.2015].
Dostupné na WWW:
<http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu-128>
- [18] Janíčková P. : Nekonvenční technologie obrábění – Laser [online 24.5.2015]. Dostupné na WWW:
<http://www.uh.cz/szegsm/files/sblizovani/pdf/laser-projekt-sablona.pdf>
- [19] ČSN EN ISO 9013. Tepelné dělení – Klasifikace tepelných řezů – Geometrické požadavky na výrobky a úchytky jakosti řezu. Praha: Český normalizační institut, 2003