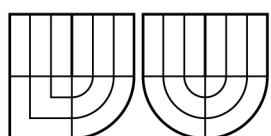




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE



FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

ŘEZÁNÍ PLAZMOU POMOCÍ ZAŘÍZENÍ TRANSCUT 300

PLASMA CUTTING BY TRANSCUT 300

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. RADEK BERGAUER

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR
BRNO 2009

Ing. JAROSLAV KUBÍČEK

**ZDE
VLOŽTE
ZADÁNÍ**

Licenční smlouva

ABSTRAKT

Tepelné dělení plazmou je progresivní technologie řezání materiálů. Kromě běžných zařízení s plynovou stabilizací je nová metoda založena na stabilizaci plazmy vodní parou. V této diplomové práci jsou ověřeny možnosti řezání parou stabilizovanou plazmou a výsledky jsou porovnány s klasickou vzduchovou plazmou.

Klíčová slova

Plazmové řezání, Plazma, TransCut 300, Ocel, Hliník

ABSTRACT

The thermal parting by plasma is progressive technology of material cutting. There is a new method based on the plasma stabilization by the steam, beyond common systems with gas stabilization. The potentialities of cutting by steam stabilized plasma are tested and the results are compared with regular gas plasma in this diploma thesis.

Key words

Plasma cutting, Plasma, TransCut 300, Steel, Aluminium

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BERGAUER, Radek. *Název: Řezání plazmou pomocí zařízení TransCut 300.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. s.66, Ing. Jaroslav Kubíček.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Řezání plazmou pomocí zařízení TransCut 300** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum: 29.05.2009

.....
Radek Bergauer

Poděkování

Děkuji tímto Ing. Jaroslavovi Kubíčkovi za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce.

OBSAH

Abstrakt	4
Prohlášení.....	5
Poděkování.....	6
Obsah	7
Úvod	8
1 Teorie plazmy	9
1.1 Elementární procesy v plazmatu	11
1.1.1 Srážky, ionizace a rekombinace	11
1.1.2 Ionizace a rekombinace	11
1.2 Plazmové plyny	15
1.3 Teplota plazmatu.....	18
1.4 Elektrická vodivost plazmy	19
1.5 Obloukový výboj	19
1.5.1 Části elektrického oblouku	20
1.5.2 Sloupec elektrického oblouku	21
1.5.3 Anoda	22
1.6 Plazmový hořák (plazmatron)	22
1.7 Konstrukční varianty	24
1.7.1 Stabilizace oblouku stěnou	25
1.7.2 Stabilizace oblouku vírová	25
1.7.3 Stabilizace oblouku kapalinou	26
1.7.4 Teplota a výkon plazmového plamene	26
2 Současný stav řezání plazmou	27
2.1 Vývoj a stručná historie plazmového řezání	27
2.2 Řezání plazmou	28
2.2.1 Druhy plazmových zařízení	31
2.2.2 Parametry řezatelnosti materiálů plazmou.....	33
2.2.3 Základní přednosti a nevýhody jednotlivých způsobů dělení.....	33
3 Plazmové řezání se zařízením transcut 300	35
3.1 Regenerativní chlazení	37
3.2 Princip výrazného snížení emisí.....	38
4 Experiment.....	40
4.1 Řezané materiály	40
4.2 Popis experimentu	43
4.3 Metalografická analýza	51
4.4 Měření tvrdosti vzorků	61
Závěr	63
Seznam použitých zdrojů	64
Seznam použitých zkratk a symbolů.....	66

ÚVOD

Technologie plazmového řezání má nezastupitelný a široký podíl v moderní průmyslové praxi. Patří mezi velice progresivní metodu dělení a řezání všech elektricky vodivých materiálů v kusové a malosériové výrobě. Tato metoda používá koncentrovaný svazek energie. Řezaný materiál je natavován teplem s vysokou hustotou energie kontrahovaného plazmového oblouku a z místa řezné spáry je vyfukován vysokým dynamickým účinkem, který překoná povrchové napětí kovu.

První plazmový řezací hořák byla úprava TIG hořáku a patentováno v USA. Plazmové zařízení se začala vyvíjet v 60. letech minulého století. Postupným vývojem od vzduchové plazmy až po nejnovější HD plazmy, které představují poslední vývojový stupeň. S neustálým vývojem se zvyšuje jejich produktivita a uživatelská přívětivost. A to díky zvýšení řezné rychlosti, delší životnosti dílů, přesnosti, mobility a snižování hladinu hluku a tvorby škodlivých látek.

Cílem této diplomové práce je porovnat klasickou vzduchovou plazmu, která je v současnosti masově rozšířena a nové plazmy TransCut 300 založené na stabilizaci vodní parou. Toto zařízení porovnáváme z důvodu netradiční a nové konstrukce, která není standardem u ostatních zařízení. V experimentu nařežeme několik řezů z připraveného souboru materiálů, který se skládá z vysokopevnostní oceli, čistého hliníku, korozivzdorné oceli a uhlíkové oceli. Z těchto řezů připravíme vzorky ke zkoumání struktury povrchu řezu pod mikroskopem. Následně tyto vzorky budou naleptány a provedou se metalografické výbrusy pro zkoumání tepelně ovlivněné oblasti a tvrdosti vzorků. Dosažené výsledky nám pomohou porovnat dva testované typy plazmových zařízení a analyzovat přínos stabilizace plazmy vodní parou.

1 TEORIE PLAZMY

Pojem plazma byl uveden do povědomí v roce 1923 Americkým fyzikem Langmuirem. Je to zvláštní stav plynů, vysoce žhavý, který obsahuje neutrální atomy a molekuly a negativně nabitě částice, elektrony a ionty. Obyčejné plyny, se po ohřátí, chovají podle fyzikálních a termodynamických zákonů. Plazma se těmito zákony neřídí. Ve fyzice se často mluví o čtvrtém stavu hmoty. Plazma se svými vlastnostmi odlišuje od tuhého, kapalného a plynného skupenství.

Každá látka je v takovém skupenství, které jí umožňuje udržet její vnitřní energie. Zvyšováním vnitřní energie v látkách (například zahříváním, přidáním tepelné energie) měníme skupenství látky z tuhé na kapalnou a z kapalnou na plynou (Obr.1). Přidáním mechanické, nebo tepelné energie, do plynů dochází k jejich ionizaci. Ionizace je uvolnění elektronů z valenčních orbit atomů. Uvolněné elektrony mají záporný náboj a vedou elektrický proud, ionizovaná jádra atomů ionty se zabývajícími elektrony mají kladný náboj. Ionizovaný plyn, plazma je tedy elektricky vodivá, ale chová se elektricky neutrálně.⁷

Pro bližší pochopení těchto vlastností plazmy například u vodíku. V pevném skupenství je vodík, v podmínkách na Zemi, při teplotě nižší než 14 K (-259,15 °C), v řadě za atmosférického tlaku při 20 K (-253,15 °C) a při teplotě 293,15 (20°C) je vodík plyn složený z dvouatomových molekul H_2 (molekulový plyn). Dodáním energie 4,53 eV se může tato vazba porušit a molekula vodíku H_2 se rozdělí na volné atomy H. Tento jev se nazývá disociace.⁷

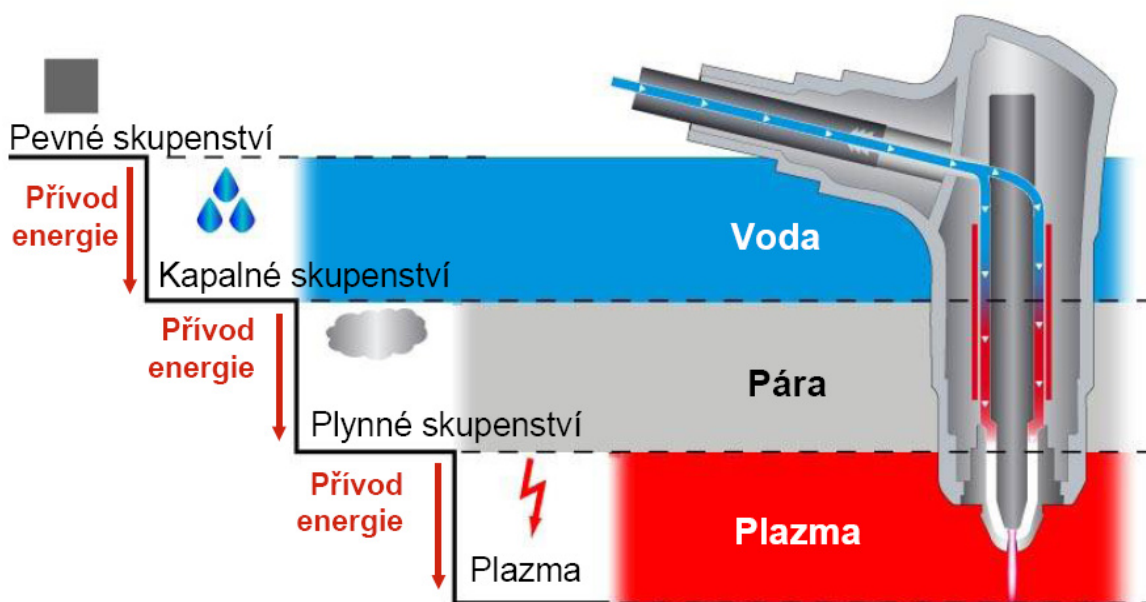
Při následné dodávání energie, např. tepelné, roste počet srážek vedoucích k disociaci molekul a z molekulového plynu se stává atomový plyn. Některé atomy netvoří molekuly a tato látka je pouze atomovým plynem. Atomový plyn se od molekulového svými fyzikálními vlastnostmi příliš neliší. Neobsahuje volné elektricky nabitě částice, a je tedy stejně jako molekulový plyn izolátorem.⁷

Velká změna vlastností plynu nastane, při ionizaci atomů, rozdělí se na volné záporné elektrony a kladné ionty. Volně se pohybující elektrony a ionty mohou vést elektrický proud. V tento okamžik látky přechází ze skupenství plynného do skupenství plazmatického.⁷

Plazma je tedy směs elektricky nabitých a neutrálních částic, které na sebe navzájem působí. Jedna z vlastností plazmatu je jeho kvazineutralita (v dostatečně velkém objemu je přibližně stejný počet kladně a záporně nabitých částic).⁷

Uvedme dva parametry jako základní charakteristiku plazmatu: hustotu, neboli počet částic v 1 m^3 a střední kinetickou energii pro určitý druh částic (elektrony, ionty), kterou uvádíme v elektronvoltech ($1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$). Tyto parametry se mění v širokém rozsahu. Hustota a se mění řádově od 10^5 do 10^{30} v 1 m^3 a teplota řádově 10^2 K až 10^{14} K . Zejména rozsah hustot je obrovský, srovnáme-li to například s rozdílem mezi hustotou vody a vzduchu, který je 10^3 .⁷

V přírodě můžeme pozorovat několik plazmových stavů. Například plazmové mraky při erupci slunce, které se skládá z atomů vodíku a z elektronů. Tyto mraky, přiletí na naši Zemi rychlostí $1500 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, vytváří známé polární záře, magnetické bouřky a poruchy v ionosféře.⁷



Obr. 1 Plazma čtvrtý stav hmoty⁸

1.1 Elementární procesy v plazmatu

1.1.1 Srážky, ionizace a rekombinace

Srážky jsou důležitým elementárním procesem v plazmatu. Můžeme je rozdělit do dvou druhů srážek, a to pružné a nepružné.⁷

Pružné srážky: při těchto srážkách zůstává zachována kinetická energie. Součet kinetických energií částic před srážkou a po srážce je stejný. Částice si zachovávají stejnou vnitřní strukturu. Mění se směr a velikost rychlosti. Příkladem mohou být srážky nabitých a neutrálních částic při jejich tepelném pohybu plynu.⁷

Nepružné srážky: Při těchto srážkách zůstává zachována celková energie, ne však kinetická. Podle způsobu přeměny energie při srážce dělíme dále tyto srážky takto.⁷

- Nepružné srážky prvního řádu; Při těchto srážkách se mění část kinetické energie před srážkou ve vnitřní energii částic po srážce. Patří sem nabuzení a ionizace atomu elektrony nebo zářením a tepelná ionizace.⁷

- Nepružné srážky druhého řádu; tady se mění část vnitřní energie před srážkou v kinetickou energii částic po srážce. Při srážce částice s malou kinetickou energií s nabuzeným atomem se potenciální energie atomu změní v kinetickou energii částice.⁷

1.1.2 Ionizace a rekombinace

Při tomto srážkovém pohybu jejich elementárních částic si molekuly navzájem vyměňují energii a hybnost (impuls). Pokud plynu přivedeme určité množství energie, zvýší se i rychlost pohybu molekul a atomů. Čím je rychlost větší, tím častější jsou vzájemné srážky částic. Přirozeným důsledkem tohoto energetického pochodu je zvyšování teploty ovlivněného plynu. Rychlost částic může mít tak vysokou hodnotu, při které se například u dvouatomového plynu molekuly vzájemnými srážkami rozpadají na atomy. Tento proces, odehrávající se v plazmě, nazýváme disociací. Při molekulách vodíku proces disociace váže na teploty 2500K (2227°C) až 6000K (5727°C). Při dodávání další energie může rychlost dosáhnout vysokou hodnotu, při které se rozpadají nejen molekuly, ale mohou být z elektronového obalu atomu

vyraženy elektrony. Energie potřebná na vyražení elektronu z jeho dráhy je vyšší než energie potřebná k procesu disociace. Nazývá se ionizační energie a celý proces, který se také odehrává v plazmovém oblouku, je nazýván ionizací. Je charakterizován ionizačním potenciálem U_i . Kinetickou energii, kterou musí mít částice o hmotnosti m s nábojem e , pohybující se rychlostí v , k uskutečnění ionizace, pak měříme prací potřebnou na urychlení částice z klidu v elektrostatickém poli s potenciálem U_i .⁷

Vzorce

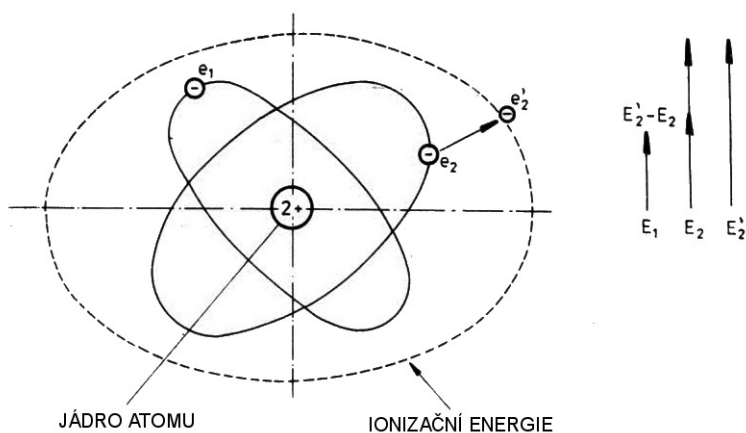
Práce potřebná na urychlení částice dána vztahem

$$\frac{1}{2}mv^2 = eU_i$$

Toto je nutná, ale ne postačující podmínka, např. při ionizaci elektrony, a proto zavádíme ještě pravděpodobnost ionizace, která je dána relativním počtem srážek vedoucích skutečně k ionizaci.⁷

Ionizační proces si podrobněji ukažme na příkladě atomu se dvěma elektrony. Okolo atomového jádra se dvěma $+$ náboji atomu krouží na dvou k jádru blízkých drahách elektrony e_1 a e_2 . Každý elektron má energii E_1, E_2 . Tento atom je neutrální, když pro dva $+$ náboje jádra a normálním stavu plynu obíhají oba elektrony, každý s $-$ elektrickým nábojem. Při dodání dostatečné energie vyskočí alespoň jeden elektron e_2 s největší energií E'_2 . Atom se nachází v ionizovaném, nabuzeném stavu. Množství energie potřebné na vyražení elektronu z jeho původní dráhy na ionizaci atomu, se nazývá ionizační energie tohoto atomu. V tomto stavu již rozlišujeme dvě částice. První je ionizovaný atom, tedy původní atom bez jednoho elektronu, druhou částicí je volný elektron. Ionizovaný atom nazvěme iontem, jeho elektrický náboj bez jednoho elektronu je $+1$. Volný elektron má náboj -1 . Jestliže volný elektron e'_2 se snaží co nejdříve dosáhnout stavu nejnižší energie, vrátí se zakrátko do původní dráhy, kde dosáhne původního energetického stavu. Při tomto procesu se uvolňuje daná rozdílem $E' = E'_2 - E_2$ odevzdá se ve formě kinetické energie nebo elektromagnetického záření (Obr. 2). Uvedený princip

možno aplikovat na dva nebo více neutrálních atomů tvořících molekulu, kterou možno znova považovat za samostatnou částici.⁷



Obr. 2 Nabuzení neutrálního atomu⁷

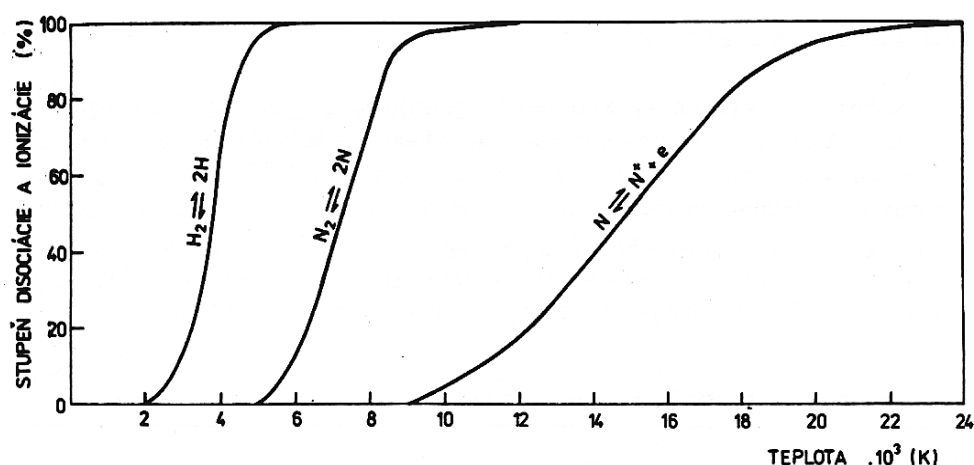
Konečný důsledek procesu disociace a ionizace je plazma jako stav hmoty, která obsahuje elektricky nabitě vodivé částice. Je třeba poznamenat, že navenek je plazma elektricky neutrální, protože se v ní musí rozložit stejný počet elektricky kladných a záporných nábojů. Zde popsane procesy disociace a ionizace jsou v rovnováze. Znamená to, že v závislosti na teplotě se vytvořil rovnovážný stav mezi disociací a ionizací na jedné straně a jim odpovídajícími vratnými procesy na straně druhé.⁷

Disociovaný a ionizovaný plyn v termické rovnováze splňuje rovnici dle Saha. Tato rovnice, vyjadřující stupeň ionizace, vychází ze statistické termodynamiky a vyjadřuje rovnováhu reakce.⁷

$$A^{i+} \leftrightarrow A^{(i+1)} + e \text{ pro jednoatomové plyny nebo reakci}$$

$$N_2 + U_{dN} \leftrightarrow 2N \text{ pro dvouatomové plyny}$$

Kde U_d značí energii disociace [eV]

Obr.3 Disociace a ionizace dvouatomových plynů ⁷

Ionizací vytvořené volné elektrony a ionty mají omezenou dobu trvání. Dvojice opačně nabitých částic se spojují v neutrální atomy a molekuly. Tento děj se nazývá rekombinace. Úkaz vysvětluje většinu úbytku v počtu elektronů a iontů v husté plazmě. ⁷

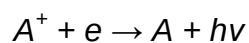
Rekombinaci můžou zapříčinit srážky mezi kladnými a zápornými ionty nebo mezi kladnými ionty a elektrony. ⁷

Rychlost rekombinace (počet rekombinujících částic za jednotku času) je úměrná počtu jejich srážek mezi elektrony a ionty. Počet srážek je úměrný koncentraci elektronů n_e a n_i . Z toho úbytek nabitých částic dn rekombinací za čas dt je: ⁷

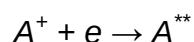
$$dn = -\rho n_e n_i dt$$

Součinitel rekombinace ρ je parametr charakterizující proces rekombinace nabitých částic. Hodnota součinitele rekombinace elektronů ρ_e je asi 10^{-8} až $10^{-14} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ a součinitel rekombinace iontů ρ_i asi $10^{-6} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Hodnoty obou součinitelů velmi závisí na teplotě částic. ⁷

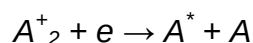
Rekombinace s emisí záření vzniká, když iont zachytává k němu se přibližující elektron, tvořící tak neutrální atom. ⁷



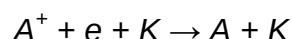
Rekombinace s dvojitým nabuzením probíhá, když uvolňující se energii se přemístí dva elektrony se vznikem neutrálního atomu ⁷



Disociační rekombinace s dvojitým nabuzením probíhá v jednoatomových plynech, které také mohou tvořit dvouatomové ionty⁷



Rekombinace při trojité srážce je opačný proces než proces ionizace při srážce s elektronem, iontem nebo i s neutrální částicí K ⁷



Pro začátek ionizace je potřebné působení vnější síly, kterou vznikají tvrdé (nepružné) srážky částic. Vnější silou může být působení vysoké teploty nebo působení elektrického vysokofrekvenčního pole. V závislosti na druhu vnějších sil rozlišujeme termickou obloukovou nebo vysokofrekvenční plazmu.⁷

1.2 Plazmové plyny

V současnosti se v plazmových hořácích používají plazmové plyny Ar, (jednoatomové) He, (dvouatomové) H_2 , N_2 , v menší míře i vzduch a voda (v plazmových hořácích s vodní stabilizací). Základní fyzikálně-chemické charakteristiky plynů jsou uvedeny v Tab.1. Plynné prostředí v plazmovém hořáku vytváří plazmu, chrání elektrody před oxidací a zároveň je chladí.⁷

Tab.1 Fyzikálně chemické charakteristiky plazmových plynů⁷

Charakteristika	Jednotka	Argon	Dusík	Vodík
Relativní molová hmotnost		39,944	28,016	2,0156
Hustota při 0°C a tlaku 101,32 kPa	(kg · m ⁻³)	1,783	1,2505	0,0898
Specifická tepelná kapacita c_p při 20°C	(kJ · kg ⁻¹ · K ⁻¹)	0,511	1,046	14,268
Součinitel tepelné vodivosti při 0°C	(W · m ⁻¹ · K ⁻¹)	0,01633	0,02386	0,17543
Potenciál ionizace jednostupňové	(V)	15,7	14,5	13,5
dvoustupňové	(V)	27,5	29,4	-
Teplota	(K)	14 000	7 300	5 100
Napětí oblouku	(V)	40	60	62
Výkon přivedený do oblouku	(kW)	48	65	120
Koeficient využití energie na ohřev plynu	(%)	40	60	80

Plazmový plyn je možno volit v závislosti na požadované teplotě a rychlosti plazmového plamene a stupně inertnosti ke stříkanému a základnímu materiálu.⁷

Dle mechanismů uvedených v předcházející kapitole doprovázejí u konkrétních plynů disociaci a ionizaci následující energetické jevy, které jsou uvedeny v Tab. 2.⁷ Množství energie potřebná na disociaci a následně na jedno, nebo více stupňovou ionizaci, vytváří potřebný vzrůst energie k uvolnění elektronů z elektronového obalu. K uvolnění vnějších elektronů je potřeba menší energie než k uvolnění elektronů ve vnitřní vrstvě. Z uvedených hodnot lze vidět, že se stupeň ionizace roste i potřebná ionizační energie. Každý plyn má jinou hodnotu ionizační a disociační energie.

Tab.2 Energetické jevy při disociaci a ionizaci⁷

Dusík N ₂	$N_2 \leftrightarrow 2N$ (9,764 eV) $N \leftrightarrow N^+ + e$ (14,54 eV) $N \leftrightarrow N^{++} + e$ (29,6 eV) $N \leftrightarrow N^{+++} + e$ (47,36 eV)
Vodík H ₂	$H_2 \leftrightarrow 2H$ (4,477 eV) $H \leftrightarrow H^+ + e$ (13,595 eV)
Argon Ar	$Ar \leftrightarrow Ar^+ + e$ (15,76 eV) $Ar \leftrightarrow Ar^{++} + e$ (27,64 eV) $Ar \leftrightarrow Ar^{+++} + e$ (40,94 eV)
Hélium He	$He \leftrightarrow He^+ + e$ (24,58 eV) $He^+ \leftrightarrow He^{++} + e$ (54,40 eV)

Plazmový oblouk může dosahovat teploty od 9 000 do 35 000 K, podle zvoleného plazmového plynu. Tento fakt je závislý především na vlastnostech konkrétního plynu případně směsi plynů. Především závisí na tepelné vodivosti, tepelné kapacitě, ionizační energii a energii potřebné k tepelné disociaci molekul. Plyny obecně dělíme do dvou skupin molekulární a atomové. Molekulární plyny se v přírodě vyskytují vždy jako molekuly například kyslík (O₂) je nejčastěji v molekule O₂, případně jako nestabilní ozon (O₃). Do skupiny molekulárních plynů patří také vodík (H₂) a dusík (N₂). Atomární plyny jsou ty, které se vyskytují ve formě atomů, argon (Ar) a helium (He). U molekulárních plynů musí nejprve proběhnout disociace molekuly.

Úplná ionizace plynu probíhá až při teplotách 100 000 K, které nejsou při svařování ani při řezání dosahovány. Plazma je proto částečně ionizována, neionizovaný plyn vytváří chladnější vrstvu a stabilizuje plazmový paprsek v ose hořáku tak, aby se plazma nedotýkala stěn trysky.⁹

Dusík

Od teploty 7000 K obsahuje dusíková plazma větší množství tepla než ostatní plyny při této teplotě. Vyšší entalpií a větší délkou plazmového plamene dusíkové plazmy je možno nanášet těžkovitelné materiály. Z tohoto důvodu je ovšem nutno dodržovat větší vzdálenost hořáku od stříkaného předmětu, než při použití argonové plazmy. Používaný dusík nesmí mít příměsi kyslíku z důvodu tvorby jedovatého oxidu dusíku a také se projevuje nepříznivá oxidace elektrod.⁷

Vodík

Disociace vodíku vyžaduje menší energii než jak je tomu u dusíku. Má vysokou tepelnou vodivost, ze všech ostatních plynů vyžaduje vodíková plazma nejvyšší napětí oblouku a největší přivedený výkon do oblouku. Naopak teplota vodíkové plazmy je nejnižší. Plazmový hořák musí být dokonale těsný, neboť s kyslíkem tvoří vodík výbušnou směs.⁷

Argon a Hélium

Entalpie těchto jednoatomových plynů je podstatně nižší než dvouatomových. Jejich předností je ovšem jednodušší přechod do plazmatického stavu. Dávají stabilní elektrický oblouk, vyžadují nižší provozní napětí a teploty jejich plazmy jsou nejvyšší. Z hlediska ovlivnění materiálu se chovají inertně. Tím, že Ar a He nedisociují, mají plazmový plamen kratší a kontrahovaný. V konečném důsledku to znamená vyšší účinnost nanášení, díky možnosti nanášet přídavný materiál lokalizovaně.⁷

Ke zvýšení entalpie a rychlosti plazmového plamene se využívají směsi plynů v různých poměrech. Zvýšení kinetické energie plamene je možné dosáhnout např. směsí argonu a dusíku, jako nejtěžších plazmových plynů.⁷

Entalpie a teplota plynu se dají v širokém rozsahu regulovat změnou přivedeného elektrického příkonu, průtoku a složení plazmových plynů v plazmovém hořáku.⁷

1.3 Teplota plazmatu

Jedna ze zajímavostí je, že v plazmatu může být několik teplot současně. K tomu jevu může dojít proto, že frekvence srážek iontů mezi sebou a frekvence srážek elektronů mezi sebou je větší než frekvence srážek mezi ionty a elektrony. Každý druh částic potom může být ve své vlastní termodynamické rovnováze. Taková plazma se nazývá neizotermická. Příkladem je plazma kladného sloupce doutnavého výboje. V něm jsou elektrony vzhledem ke své malé hmotnosti podstatně více urychlovány vnějším elektrickým polem než kladné ionty a tím získávají i více energie z elektrického pole. Plazma v termodynamické rovnováze lze charakterizovat teplotou jednoho druhu částic. Takové plazma se nazývá izotermické. Příkladem je plazma při termojaderné reakci.⁷

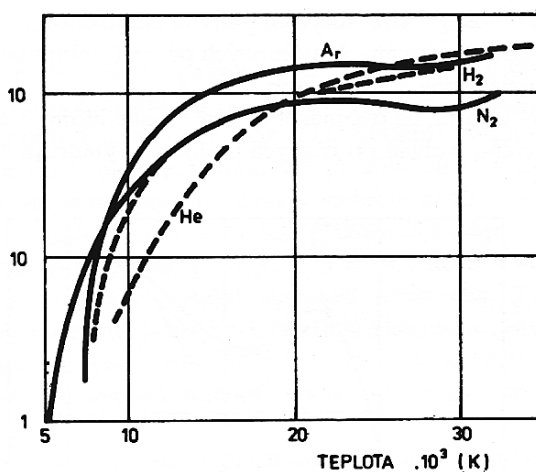
Úplně ionizované vodíkové plazma obsahuje jen protony a elektrony. Žádná z těchto částic nevyzařuje spektrální čáry jako neutrální atom. Elektrony a protony v úplně ionizovaném vodíkovém plazmatu vyzařují pouze elektromagnetické vlny šumového charakteru, vyvolané tím, že při srážkách elektronu s elektronem nebo elektronu s iontem dojde k prudké změně směru jeho pohybu. Plazma tohoto typu vysílá tedy záření v širokém oboru vlnových délek, které sahají až do rentgenové oblasti, pokud je teplota dostatečně vysoká.⁷

Jsou-li v plazmatu přítomny atomy nebo ionty se zbylými elektrony v obalu, vyzařuje plazma i čárové spektrum. Každý atom a iont má své charakteristické spektrum, které má vždy spektrální čáry i ve viditelné oblasti. Podle charakteristických čar těchto spekter je možné v některých případech určit atom nebo iont, který se v plazmatu vyskytuje, a srovnáním intenzity spektrálních čar lze zpravidla poměrně přesně určit i teplotu. Touto problematikou se zabývá spektrometrie (popř. optická emisní spektrometrie - OES).⁷

Například v plazmochemických reakcích, které probíhají v téměř izotermickém plazmatu (elektrický oblouk, plazmatron) při vysokých teplotách neutrálního plynu, se nové typy molekul tvoří až v chladnějších zónách (pod 5000 K) spektra. Jednotlivé teplotní zóny se spektrálně od sebe liší a poskytují tak informaci o průběhu reakce a výsledných produktech.⁷

1.4 Elektrická vodivost plazmy

Elektrická vodivost plazmy s vysokou teplotou závisí na přítomnosti nabitých částic, na pohyblivosti elektronů, která je asi 100 krát větší než pohyblivost iontů. Elektrická vodivost dusíkové, argonové, héliové a vodíkové plazmy je v grafu na Obr. 4. Elektrické vodivosti dusíkové a argonové plazmy se nad 20 000 K prakticky už nemění a jsou srovnatelné s elektrickou vodivostí kovových vodičů.⁷



Obr.4 Elektrická vodivost plazmy Ar, He, N₂ a H₂ v závislosti na teplotě⁷

1.5 Obloukový výboj

Elektrický oblouk je samostatný výboj vznikající za atmosférického nebo zvýšeného tlaku (výjimečně může vzniknout i za sníženého tlaku). Hlavními znaky obloukového výboje jsou:⁷

- vysoká teplota katody (dostatečná k tepelné emisi elektronů)

- velká proudová hustota v okolí katody (řádově $10^3 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$)
- velký proud protékající výbojovou trajektorií ($1\text{A} - 10^5 \text{ A}$)
- nízké obloukové napětí při hoření oblouku (desítky V)
- malý katodový úbytek (menší než 50 V)
- intenzivní vyzařování světla z výbojové trajektorie a elektrod.

Elektrický proud v obloukovém plazmatu je převážně tvořen elektrony, které jednak vylétají z rozžhavené katody a jednak vznikají tepelnou ionizací plazmatu mezi elektrodami. V druhém případě vznikají také kladné ionty, které se v elektrickém poli pohybují směrem ke katodě a bombardováním na ní udržují vysokou teplotu potřebnou k tepelné emisi elektronů.⁷

V obloukovém plazmatu se teplota elektronů přibližně rovná teplotě kladných a záporných iontů a neutrálních částic. Plazma obloukového výboje je velmi blízké izotermickému plazmatu. Při vzniku výboje dochází ke generaci nabitých částic lavinovitým způsobem. Důsledkem je pokles odporu ve výbojové trajektorii, tj. při stálém napětí dochází ke vzrůstu proudu, a proto je charakteristika obloukového výboje klesající. Při dostatečně "tvrdém" zdroje napětí by proud neomezeně vzrůstal, a proto je do obvodu s obloukem nutno sériově zapojit rezistor (stabilizace oblouku).⁷

Vysoké teploty elektrod při obloukovém výboji se využívá především při obloukovém svařování a v tavicích pecích. Vhodnou úpravou obloukového výboje můžeme dosáhnout vysokých teplot. Taková zařízení nazýváme plazmové hořáky – plazmatrony.⁷

1.5.1 Části elektrického oblouku

Elektrický oblouk se skládá z katody, sloupce oblouku a anody. Napětí na elektrodách je poměrně nízké oproti jiným výbojům a je rozděleno na anodový úbytek, úbytek ve sloupci oblouku a katodový úbytek. Přenos proudu v elektrickém oblouku je zprostředkován převážně elektrony uvolněnými termickou emisí z povrchu ohřáté katody. Příznivý vliv na emisi elektronů z katody mají některé prvky jako thorium, baryum, cesium a také některé

kysličníky kovů. Z tohoto důvodu se elektrody legují některým z těchto prvků. Oblouk potom hoří klidněji a je stabilnější i při nižší teplotě elektrod, což snižuje opotřebení elektrod.⁷

1.5.2 Sloupec elektrického oblouku

Je tvořen plazmatem. Poměrně malý gradient sloupce oblouku je závislý na celé řadě faktorů: velikosti a druhu proudu, druhu plynu, ve kterém oblouk hoří, tlak plynu, materiál elektrod, chlazení, vnější mechanické síly a elektromagnetické síly atp.⁷

Zvětšováním velikosti proudu se zvětšuje teplota plazmatu, zároveň stoupá i jeho elektrická vodivost. To má za následek zmenšení gradientu napětí a zvětšení proudu. Také druh plynu do značné míry ovlivňuje napětí na oblouku. Jednoatomové plyny jako argon, hélium, tvoří molekuly a pro jejich zahřátí na ionizační teplotu je potřeba mnohem méně energie než u víceatomových plynů jako např. vodík, kyslík, dusík atd. Jak již bylo uvedeno u víceatomových plynů, probíhá před ionizací disociace.⁷

K dosažení stejné teploty je u těchto plynů třeba několikanásobně větší energie než u jednoatomových. Termická ionizace začíná teprve při teplotách řádově 10^4 K. Průměr sloupce oblouku závisí na velikosti ztrát, které ve sloupci vznikají převážně v důsledku tepelné vodivosti plazmatu. Ztráty vedením a prouděním u volně hořícího oblouku lze v mnoha případech zanedbat. U jednoatomových plynů tepelná vodivost se zvětšující se teplotou stoupá do teplot 10^4 K. Vliv druhu plynu a jeho tepelných vlastností na plazmu oblouku je větší než vliv ionizačního napětí.⁷

Zvýšením tlaku plynu, ve kterém oblouk hoří, má za následek zvýšení napětí na oblouku. Vliv materiálu na gradient oblouku se uplatňuje podle množství, v jakém se materiál elektrody do plazmy vypařil. I velmi malé množství vypařeného materiálu elektrody s malým ionizačním napětím značně ovlivní stupeň ionizace a elektrickou vodivost plazmatu. Vlivu cizích materiálů na teplotu okrajových vrstev oblouku se využívá u stabilizovaných oblouků, kde je plazma uměle chlazena. Elektrická vodivost vnějších vrstev sloupce se

sníží, následkem toho se zmenší průřez vodivého jádra oblouku a nemá-li klesnout přenášený elektrický výkon, musí dojít ke zvýšení gradientu napětí anebo zvýšení vodivosti plazmatu, což má za následek zvýšení teploty. Tím lze vysvětlit skutečnost, že plazma uměle chlazeného oblouku má vyšší teplotu než plazma oblouku nechlazeného.⁷

Také vnější mechanické a magnetické síly ovlivňují sloupec oblouku. Při horizontálně umístěných elektrodách vychýlí se sloupec oblouku vlivem stoupajících teplých vrstev vzduchu do charakteristického obloukovitého tvaru. Vnější ofukováním lze změnit tvar sloupce oblouku nebo celý oblouk posouvat po elektrodách. Ofukování plynem je realizováno tak, že se plyn přivádí, aby rotoval kolem sloupce oblouku a zároveň se v axiálním směru posouvá.⁷

Tohoto efektu se v plazmových hořácích využívá ke stabilizaci i k chlazení vnějších sfér sloupce oblouku. Magnetické pole působící kolmo ke sloupci oblouku vychyluje oblouk podle své intenzity. Magnetické pole působící ve směru osy oblouku stabilizuje sloupec oblouku proti náhodným příčným výchylkám, zároveň může ovlivňovat rychlost částic v oblouku a tím i přenosové jevy oblouku.⁷

1.5.3 Anoda

Je intenzivně zahřívána dopadajícími elektrony, které jsou urychlovány elektrickým polem. Teplota anody dosahuje až bodu varu materiálu. Ovšem na rozdíl od katody, může být anoda zcela studená, oblouk hoří dobře i s vodou chlazenou anodou. Anodový úbytek je do značné míry závislý na plynu, který tvoří plazma. Materiál anody je namáhán vysokými teplotami a u některých materiálů anod dochází k charakteristické nestabilitě tzv. nestabilitě oblouku.⁷

1.6 Plazmový hořák (plazmatron)

Normální obloukové výboje dosahují maximálně teploty 10^4 K. Dále lze zvyšovat teplotu zvýšením elektrického příkonu, přičemž ovšem dochází k rychlému tavení a vypařování elektrod, a tím k jejich rychlému opotřebování.

Oblouk je při tom dále ochuzován o energii potřebnou ke změnám skupenství elektrod. K získání plazmatu s vysokou teplotou (5×10^4 K) je proto nutné oddělit velmi teplé plazma od elektrod. To se děje v plazmovém hořáku. Katoda (např. uhlíková – grafitová, žáruvzdorný wolfram) zasahuje ve směru osy do válcové komory uzavřené v čele s anodou, tvořenou kruhovou deskou s otvorem ve středu. (Polarita elektrod může být i opačná). Do prostoru obloukového výboje je pod tlakem tryskou vháněno pracovní médium (voda, plyn), které víří po stěnách nádoby, nezasahuje plamen a vytváří chladicí vrstvu, chránící nádobu i elektrody před vysokou teplotou (viz obrázky dále). Proudící pracovní látka vymezuje kanál určující tvar výboj, provádí stabilizaci obloukového výboje. V důsledku toho dochází k tepelnému zúžení plazmy. Část pracovního média, pokud je tvořeno kapalinou, se vypaří a zbývající část vytéká otvorem v anodě a udržuje se i nadále na anodě adhezí a rotací. Tlakem média, který se zvyšuje ohřevem, je horké plazma obloukového výboje z nádoby vytlačováno ve tvaru paprsku a dosahujícího délky od několika centimetrů až do několika decimetrů. Vytékající paprsek je obklopen plazmatem o nižší teplotě, které chrání vnitřní velmi teplou část plazmového plamene od znečištění.⁷

Jako pracovní médium lze použít jak plyny neutrální (argon, hélium), tak aktivní (CO_2 , H_2 , N_2) i agresivní (O_2 , Cl_2) a rovněž kapaliny, které přecházejí v prostoru oblouku v páry.⁷

Tlaky v oblasti oblouku se pohybují od 1,3 Pa do 10 MPa. Výtokové rychlosti se pohybují od několika metrů za sekundu do řádově $10^3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. obloukové plazmové hořáky mohou pracovat s výkonem až asi 10 MW při teplotě v ose oblouku 50 000 K a s účinností 60% až 90%.⁷

Podle způsobu užití má plazmatron několik konstrukčních variant (viz dále). Může být proveden například v sestavě jednopólové, kdy je anoda tvořena kovovým předmětem, který potřebujeme plazmovým plamenem opracovávat. Obecně pak hovoříme o hořáku s přeneseným obloukem, který vytváří kontrahovaný plazmový oblouk. Všeobecně se používá v technologiích plazmového svařování, navařování a řezání kovů. Transport plazmatu v těchto zařízeních je realizován expanzí v trysce kde přeměňuje svoji potenciální

energii v energii kinetickou. Tento způsob rovněž využívají plazmové raketové motory.⁷

1.7 Konstrukční varianty

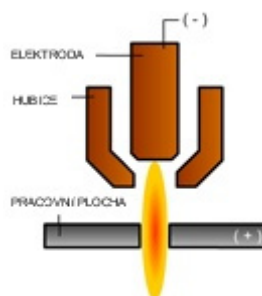
Plazmatronem je možné řezat, vrtat a tavit různé materiály nebo se používá k nanášení ochranných vrstev z těžkotavitelných přídavných materiálů. Důležité je užití v metalurgii, zejména k výrobě těžkotavitelných slitin nebo k získání nových látek, obtížně dostupnou běžnou technologií.⁷

Nehledě k různým konstrukčním úpravám existují dva základní typy zapojení hořáků a jejich kombinace:⁷

- Závislý oblouk – v tomto případě hoří oblouk mezi elektrodou, která je zapojena jako katoda a základním materiálem, který tvoří anodu. V tomto zapojení pracují plazmové hořáky pro svařování, řezání a navařování elektricky vodivých materiálů. Výhodou zapojení je menší tepelné namáhání trysky. Tryska zde pouze stabilizuje a tvaruje oblouk, je namáhána pouze teplem vyzařovaným sloupcem oblouku. Chlazení je realizováno poměrně jednoduchými konstrukčními úpravami.
- Nezávislý oblouk - pokud oblouk hoří mezi zápornou katodou a kladnou anodou ve tvaru dýzy uvnitř hořáku, hovoříme o hořáku s nepřeneseným obloukem (obr. 1). Hořák s nepřeneseným obloukem vytváří plazmový plamen používaný jako tepelný zdroj k tavení různých materiálů v technologiích plazmového stříkání, natavování a v plazmových pecích.
- Kombinované zapojení - toto zapojení je kombinací obou předešlých. Používá dvou oblouků. Jeden oblouk je pomocný a hoří mezi elektrodou a tryskou. Jeho výkon je omezen odporem. Tento oblouk slouží k zapálení hlavního oblouku. Zapálením pomocného oblouku se vytvoří plazma, které po výstupu z trysky spojí vodivě elektrodu se základním materiálem a umožní zapálení hlavního oblouku.

1.7.1 Stabilizace oblouku stěnou

Tato stabilizace je nejjednodušší. Plyn je přiváděn ve směru axiálním (Obr.5). Vyplňuje rovnoměrně celý prostor. Plochy stěn jsou intenzivně ochlazovány. Množství proudícího plynu je malé, proto se tento způsob používá tam, kde se nepožaduje velká výtoková rychlost. Celková rychlost těchto hořáků je malá a maximální teplota plazmatu nízká, především vlivem nepříznivých poměrů chlazení plazmatu. ⁷

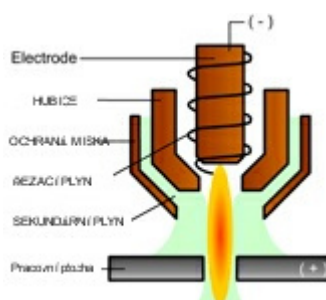


Obr. 5 Stabilizace stěnou ¹³

1.7.2 Stabilizace oblouku vírová

Plazmový plyn je přiváděn pod tlakem v tangenciálním směru do komory elektrody. Přiváděný plyn je expanzí ve vstupním otvoru urychlen a vzhledem k tangenciálnímu vstupu a tvaru komory elektrody se dostává do rotace současně s axiálním posuvem směrem k trysce. Vzniklý vír stabilizuje oblouk do osy elektrodové komory (obr.6). ⁷

Protože rotace plynů pokračuje i v oblouku a trysce, vlivem působení odstředivé síly se soustředí lehčí částice do středu a těžší a chladnější na obvod sloupce oblouku. Vlivem expanze plazmatu v trysce se zvětšuje axiální složka rychlosti, takže plazma vystupující z trysky má rotaci téměř potlačenou. Vzhledem k tomu, že se u plynových plazmových hořáků používá W elektrod nelze použít k ofukování elektrody aktivního plynu pro vysoké úbytky elektrod. Některé konstrukce hořáků pracují se dvěma plyny. Elektroda je ofukována malým množstvím inertního plynu, vlastní pracovní plyn je aktivní a je přiváděn v místech, kde nepoškodí elektrodu. ⁷

Obr6. Stabilizace Vírová¹³

1.7.3 Stabilizace oblouku kapalinou

Princip této stabilizace spočívá ve vytvoření vodního víru s dvojitým průměrem. Jeden vír je vytvořen v komoře elektrody tangenciálním přívodem tlakové vody. Vznikne vrstva, která chrání stěny komory před tepelnými účinky oblouku. Zároveň se vypařováním vytváří páry, které vstupují do oblouku, disociují, ionizují a vytváří plazma oblouku. Všechna přiváděná kapalina se nevypaří, přebytečná je odváděna rovnoměrně na obě strany směrem k elektrodě. Druhý vír má menší průměr a je ve vlastní trysce hořáku. Jeho průměr určuje průměr vystupujícího paprsku plazmatu. Stabilizace kapalinou se používá pro řezání vodivých materiálů v zapojení se závislým obloukem.⁷

Protože se disociací vody vytváří aktivní prostředí, používá se uhlíkových elektrod, které během práce ubývají. Tyto hořáky mají zabudován systém podávání elektrody.⁷

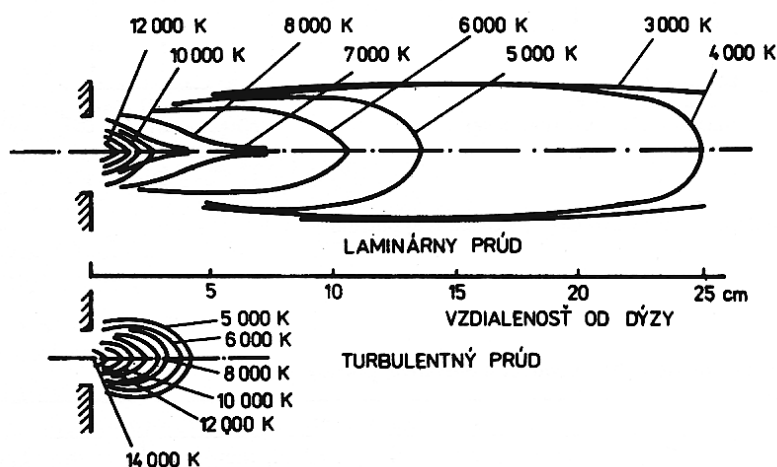
1.7.4 Teplota a výkon plazmového plamene

Výkon plazmového plamene a jeho teplota patří mezi jeho základní charakteristiky. Teplota plazmového plamene závisí především na stupni ionizace, kterou opět ovlivňuje druh plazmového plynu a pracovní parametry plazmového hořáku.⁷

Typické rozdělení teplot v plazmovém plameni je na (obr. 7). Teplota plazmy je okolo 5000 až 30 000 K. Na obr. Velmi dlouhé izotermy laminárního proudu naznačují, že nevzniká žádné turbulentní míšení okolního vzduchu s hořícím plynem plamene. Toto pozorování neplatí pro turbulentní proud, kterého izotermy jsou velmi krátké.⁷

Místní teplotu v plazmovém plameni je možné měřit spektroskopicky. Přesné určování teploty je obtížné vzhledem k absorpci záření víceméně nepřehledným plazmovým plamenem a výkyvy teploty.⁷

Teploty plazmového plamene odpovídají rozdílným vlastnostem jednoatomových a dvouatomových plynů. Rozdělení teplot podle obr. 7 nasvědčuje, že skutečné teploty plazmy od 10 000 K a více jsou pouze v centru dýzy a do vzdálenosti pouze asi 20 mm před dýzou.⁷



Obr. 7 Rozložení teplot v plazmovém plameni⁷

2 SOUČASNÝ STAV ŘEZÁNÍ PLAZMOU

2.1 Vývoj a stručná historie plazmového řezání

První plazmový řezací hořák byl patentován jako modifikace TIG hořáku v roce 1957 (Dr. R. Gagge - Buffalo, USA). První vzduchové plazmy byly uvedeny na trh začátkem 60. let minulého století. Dvouproudový plazmový oblouk, stíněný sekundárním plynem 1962 a v roce 1963 vzduchová plazma. Jejich hlavním úskalím bylo rychlé poškození dílů vystavených oxidaci, především elektroda. Vzduchové plazmy až do dnešních dnů řeší tento hlavní problém. Vzduchové plazmy jsou rozšířené a používají se pro řezání uhlíkových ocelí do tloušťky cca 40 mm. Stlačený vzduch (0,4 až 0,8 MPa) o velkém průtoku (až 130 l·min⁻¹) se používá také ke stabilizaci plazmy. V těchto plazmách se nepoužívá wolframová elektroda ale zirkoniová nebo hafniová.

Oxidy a nitridy těchto materiálů mají vysoké teploty tavení (2 500 °C až 3 300 °C).⁹

Vodou stíněná plazma, vodní tlumiče a vodní stoly byly na trh uvedeny v 70. letech minulého století. Dusíkovou plazmu lze úspěšně upravit tak, aby její teplota vzrostla více než 2x. Kolem plazmového paprsku se vstřikuje voda a ta ochlazuje vnější vrstvy plazmy a koncentruje průchod energie do osy plazmového oblouku.⁹

Vznikající prach a hlučnost plazmových řezacích procesů přivedly na myšlenku umístit celý proces pod vodu. Vodní stůl, zvláště vhodný pro plazmy s proudovou hustotou nad 100 A se používá dodnes. Snížení hlučnosti a snížení úrovně záření je výrazné, mezi nevýhody však patří snížení řezné rychlosti až o 20 % a špatná kontrola procesu řezání ze strany operátora.⁹

Nízko proudové vzduchové plazmy, 80 léta minulého století, nové trhy pro plasmové řezání. V těchto letech kyslíkové plazmy, zvyšují řeznou rychlost a kvalitu řezu u uhlíkových ocelí.⁹

1990 Plazmy s vysokou koncentrací paprsku (Hy Definition plazma) jsou v současnosti poslední modifikací plazmových hořáků. Fokucase plazmového paprsku je provedena pomocí sekundárního plynu. Vycházející plazmový paprsek má až trojnásobné zvýšení hustoty energie při současném zvýšení teploty a výstupní rychlosti. Výsledkem je poloviční zúžení řezné spáry, zvýšení řezné rychlosti. Řezy HD plazmou jsou téměř kolmé (odchylka 1-2°), velmi hladké a bez otřepů⁹

2.2 Řezání plazmou

Pro dělení plazmou je většinou používán přenesený plazmový paprsek. Kov je natavován teplem kontrahovaného plazmového oblouku a z místa řezu je odstraňován kinetickou energií plazmových plynů. Princip řezání plazmovým paprskem je v podstatě stejný jako svařování plazmou. Jako aktivní plyny lze používat vzduch, vodík, argon, CO₂, apod. Využívá se dynamického účinku plazmového paprsku k odstraňování oxidů vzniklých při řezání. Rychlost řezání závisí na nastavení parametrech řezání, tloušťky a chemického složení řezaného materiálu. Plazmový oblouk může být

stabilizovaný vodou, plynem a nebo směsí plynů. Současná řezací plazmová zařízení pracují převážně na principu plynové stabilizace. Vybrané parametry řezání plazmou jsou uvedeny v Tab 3.⁴

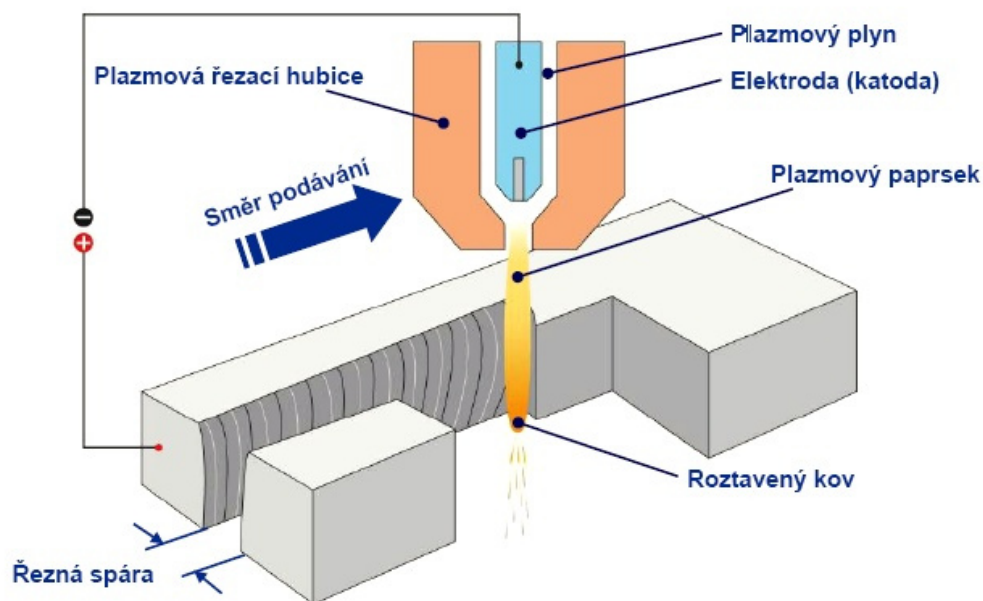
Tab 3 Základní parametry řezání plazmou⁴

Tloušťka řezaného materiálu s (mm)	Výkon řezacího zařízení A (kW)	Řezací rychlost v (mm/min)
25	30	630
50	100	760
100	200	630
200	150	100

V dnešní době je rozšířeno řezání vzduchovou plazmou. Tato metoda řezání je relativně jednoduchá, jak zařízení tak i s velmi jednoduchou obsluhou.⁴

V některých případech se používají plazmové řezací hořáky tak, že řezaný materiál je ponořen v procesu řezání pod vodu. Tímto způsobem se mimo jiné snižuje také produkce škodlivých zplodin.⁴

Plazma se s výhodou využívá pro řezání kovových materiálů a to jak uhlíkových ocelí, tak nerez ocelí a barevných kovů (např. hliník a jeho slitiny). Plazmové řezání využívá vysoké teploty a výstupní rychlosti plazmového paprsku. Pro řezací proces je nejdříve zapálen pilotní oblouk mezi tryskou a katodou prostřednictvím vysokého napětí. Tento energeticky slabší pilotní oblouk připraví částečně ionizací dráhu mezi plazmovým hořákem a obráběným předmětem. Dotykem pilotního oblouku s obráběným předmětem (letmé naříznutí, letmý pro pich) je automaticky zvýšen výkon hlavního oblouku a dochází k vyfouknutí nataveného materiálu z řezné spáry (obr. 8). Při řezání jsou výstupní rychlosti vyšší a dosahují hodnoty kolem 1500 až 2300 m.s⁻¹.⁴



- Termický proces řezání
- Svázaný oblouk (plazmový paprsek)
- Vysoká hustota energie taví obrobek
- Roztavený materiál je vyfukován z řezné spáry

Obr. 8 Princip plazmového řezání⁸

Rychlost řezání je závislá na výkonu zdroje, plazmovém plynu, tloušťce a druhu řezaném materiálu a jeho fyzikálních vlastnostech. Rychlost řezání uhlíkových ocelí lze zvýšit při použití kyslíku jako plazmového plynu. Maximální tloušťka materiálu, kterou lze řezat je cca 250 mm. Zdroje pro řezání mají vysoké napětí naprázdno, cca 250 až 350 V a při řezání dosahuje hodnota napětí mezi 110 až 150 V. Rychlost řezání tenkých plechů se pohybuje mezi 9 až 12 m. min⁻¹.⁴

Na kvalitu řezu a opotřebení spotřebních dílů plazmového hořáku má výrazný vliv čistota plazmového plynu. Pro plazmové řezání je doporučeno používat směsi s vyšší čistotou určené pro plazmové zdroje.⁴

Vysoká teplota plazmového paprsku umožňuje řezat všechny kovové vodivé materiály bez ohledu na jejich řezatelnost kyslíkem. Omezeně lze nezávislým zapojením řezat i elektricky nevodivé materiály.⁴

V současnosti se používají pro stabilizaci plazmy různé plyny tab. 4.⁴

Tab. 4 Typy řezacích plazmových zařízení ⁴

Typ plazmy	Rychlost řezání	Kvalita řezu
Vzduchová	Vysoká	Průměrná
Plynová	Nízká	Vysoká
Dusíková kombinovaná s vodou	Vysoká	Vysoká
Kyslíková	Vysoká	Vysoká

2.2.1 Druhy plazmových zařízení

Plynová plazma je stabilizovaná směsí Ar + H₂, elektroda se používá wolframová. Plynové plazmy se používají pro řezání především vysokolegovaných ocelí, niklu, molybdenu, mědi a dalších kovů. Kombinací argonu a vodíku (od 5 do 35 %) lze dosáhnout optimálních výsledků s ohledem na teplotu plazmatu, řeznou rychlost a kvalitu řezné plochy u většiny kovů. Někdy se místo vodíku používá dusík, nebo může být použita tří složková směs. U malých tloušťek materiálů je řezání plynovou plazmou několikanásobně rychlejší než u řezání kyslíkem a k vyrovnání rychlosti dochází v rozmezí tloušťek 30 – 50 mm. ⁴

Vzduchová plazma je v současnosti velmi rozšířena a její provoz je ekonomicky velmi výhodný do tloušťky cca 40 mm. Ke stabilizaci se používá stlačený vzduch (0,4 až 0,8 MPa) o vysokém průtočném množství až 130 l.min-1. Vysokým průtokem vzduchu se ochlazují vnější vrstvy plazmy, čímž se kontrahuje plazmový paprsek a získá se úzká rovnoběžná řezná spára. Současně se s vysokým průtokem zlepšuje chlazení hořáku. Vzduchová plazma má ve srovnání s plynovou výrazně větší tepelnou kapacitu a tím i vysokou rychlost řezání. Ke spalování řezaného materiálu kyslíkem dochází jen omezeně, ale v chladnější zóně řezu na spodní straně dochází k výraznější oxidaci, což zajišťuje čistou spodní hranu řezu. ⁴

Velmi rozšířené je řezání vzduchovou plazmou u nelegovaných a středně legovaných ocelí. ⁴

Vzhledem k výrazně reakční schopnosti vzduchu nelze použít wolframovou elektrodu (teplota tavení oxidů wolframu se pohybuje mezi 1270

až 1473 °C), ale zirkonovou nebo hafniovou elektrodou jejichž oxidy a nitridy mají vysoké teploty tavení 2500 až 3300°C. Vlastní hafniová elektroda je uložena v niklovém pouzdře měděného nosiče, ale i v tomto případě není životnost elektrod příliš velká.⁴

Kyslíková plazma je velmi podobná vzduchové, má však vyšší entalpii a hustotu. Kyslík dává vysokou rychlost řezání, čisté řezy bez ulívajících oxidů a zvýšení kvality řezu s malým deviačním úhlem a jemnou strukturou povrchu.⁴

Dusíková plazma kombinovaná s injekčním přívodem vody je určena především pro řezání velkých tloušťek vysokolegovaných ocelí. Konstrukčním uspořádáním hořáku se k okrajovým vrstvám plazmového paprsku tangenciálně přivádí voda (někdy oxid uhličitý). Vytváří se vodní vír, který ochlazuje vnější vrstvy plazmy a dochází k disociaci vody, čímž se dosahuje jejího zúžení a zvýšení teploty. Dusíková plazma kombinovaná s vodou zlepšuje kvalitu řezných ploch, jejich kolmost a zvyšuje řeznou rychlost. Řezání dusíkovou plazmou lze kombinovat s vodní sprchou, nebo se hořák po zapálení ponoří pod hladinou vody, která výrazně zvyšuje hygienu práce.⁴

HD Hy Definition plazma představuje poslední vývojový stupeň plazmového řezání. Celý název zní „High Tolerance Plasma Arc Cutting“ a vlastní plazmový hořák patentovala Americká firma Hypertherm. V principu se jedná o velmi intenzivní zúžení plazmového paprsku a odvedením vnějšího chladnějšího obalu plazmy. Z hořáku vycházející plazmový paprsek má až trojnásobné zvýšení hustoty energie při současném zvýšení teploty a výstupní rychlosti. Výsledkem je poloviční zúžení řezné spáry, zvýšení řezné rychlosti a dosažení kolmosti řezných ploch bez otřepů na spodní hraně plechu. Při použití vysoce čistého kyslíku (99,95%) jako plazmového plynu se dosáhne u nelegovaných ocelí kvality řezných ploch srovnatelným s řezáním laserem. Při řezání vysokolegovaných ocelí, hliníku a mědi se používá směs dusíku (99,999%) a kyslíku. HD plazma je velmi vhodná alternativa za řezání laserem s nižšími pořizovacími i provozními náklady.⁴

2.2.2 Parametry řezatelnosti materiálů plazmou

Řezatelné materiály

- Konstrukční oceli
- Vysokolegované materiály
- Hliník

MAX tloušťky

standartní

HD

- | | | |
|-----------------|-------|--------|
| • Dělicí řezy | 80 mm | 150 mm |
| • Kvalitní řezy | 50 mm | 120 mm |

Rychlost řezání u plazmy

- | | |
|---------------------------|----------------------------------|
| • Tloušťka materiálu [mm] | Rychlost [mm.min ⁻¹] |
| 5 | 7000 |
| 20 | 2000 |
| 50 | 400 |

Rychlost řezání plazmy s vysokou hustotou oblouku

(High Definition- Hypertherm, Hi Focus – Kjellberg atd.)

- 0,5 – 0,8 mm (20 - 50A)
- 4 – 10 mm (50 – 100A)

2.2.3 Základní přednosti a nevýhody jednotlivých způsobů dělení

Tab. 5 Všeobecné přednosti a nevýhody jednotlivých způsobů dělení ¹⁶

Všeobecné přednosti a nevýhody jednotlivých způsobů dělení		
Technologie	Výhody	Nevýhody
Autogenní (vhodné jen pro konstrukční ocel)	-Pro střední a větší tloušťku materiálu -Hospodárné použití několika hořáků -Malé investiční a provozní náklady -Fasenschneiden s až 3 hořáky v jedné soupravě	-Špatné řezání pod 5 mm -Materiálové zakřivení v dolním rozmezí plechu; nutné rovnání -Vysoký přívod tepla, velká tepelně ovlivněná oblast -Malá rozměrová stálost u opakujících se řezů následkem vlivu tepla -Malá řezná rychlost

Plazma	-Provoz jednoho a více hořáků podle série -Řezání všech elektricky vodivých materiálů -Bez alternativy při řezání vysokolegované oceli a hliníkových materiálů ve střední a větší tloušťce -Vynikající schopnost u slabých a středních tloušťek konstrukční oceli (do 30 mm) -Řezání vysoce pevné konstrukční oceli s menším tepelným příkonem -Vysoká řezná rychlost (až 10x vyšší než autogenní) -Libovolné zpracování kvalitního řezu u středních a silných rozměrů plechů s technologií vířivého plynu ve spojení s technickými plyny -Velmi dobrá automatizace -Řezání plazmou pod vodou pro velmi malé tepelné ovlivnění řezaného materiálu a malou hladinu hluku v okolí pracoviště	-Omezí použití do 160 mm (180 mm) u suchého řezání a 120 mm u řezání pod vodou -Poněkud širší řezná spára
Laser	-Vysoká přesnost řezaných dílů u slabých a středních tloušťek materiálu -Řezání velmi malých otvorů, úzkých pásků, ostroúhlých tvarů; výroba komplexních obrysových dílů -Pravoúhlá řezná hrana -Velmi dobrá automatizace -Velmi malé přivedené teplo, žádné deformace obráběného předmětu -Velmi malá šířka řezné spáry (0,2 - 0,4 mm) -Vysoká řezná rychlost u tenkých materiálů	-Vysoké investiční a provozní náklady (vysoká spotřeba plynů) -Omezení tloušťky materiálu: - Konstrukční ocel: 20 (25) mm - Vysokolegovaná ocel: 15 mm - Hliník: 10 mm -U středně tlustých materiálů žádná přímá hladká řezná plocha -Nutné přesné řízení vzdálenosti k povrchu obrobku -Omezení stability paprsku u řezání konstrukční oceli s normálním Si a P obsahem -Snížení stability procesu u řezání lesknoucích se povrchů materiálu -Menší účinnost (CO2-laser max. 10%)
Vodní paprsek	-Řezání od kovových, nekovových a kompozitních materiál; velkých materiálů a tloušťek -Žádné metalurgické změny na řezné ploše; žádný přívod tepla -Úzká řezná spára, vertikální řezání, vysoká rozměrová stálost obráběných předmětů, vynikající kvality řezu -Dobrá Automatizace průběhu řezání -Podle druhu také provoz s více řezacími hlavami -Propojení vzduchové mezery	-Vysoké investiční a provozní náklady (ve srovnání s plazmou: provozní náklady 1:5 až 1:20 podle materiálu a tloušťky) -Relativně malá řezná rychlost u "tvrdých" materiálů -Hlučný a mokrá způsob řezání -Nemožnost použití pro ruční řezání a jen omezeně v 3-D rozměrech

Tab. 6 Srovnání technologií (Autogenní – Laser- Vodní paprsek – Plazma)¹⁶

Srovnání postupů: Autogenní - Laser - Vodní paprsek - Plazma					
Možnosti využití způsobu dělení při hodnocení kvality, produktivity a hospodárnosti					
(1 = nejlepší způsob, 4 = nevhodný způsob)					
Materiál	Tolerance	Autogenní	Laser	Vodní paprsek	Plazma
Konstrukční ocel < 5 mm	do ± 0,5 mm	3	2	4	1
Konstrukční ocel < 5 mm	do ± 0,1 mm	ne	1	2	2
Konstrukční ocel 5 - 20 mm	do ± 0,5 mm	2	3	4	1
Konstrukční ocel 5 - 15 mm	do ± 0,2 μm	2	1	3	1
Konstrukční ocel 15 - 25 mm	do ± 0,5 μm	2	3	3	1
Konstrukční ocel 25 - 45 mm		1	ne	3	1 (O ₂)
Konstrukční ocel > 45 mm		1	ne	2	2
Vysokolegované oceli		ne	ano	ano	ano
Hliník		ne	(ano)	ano	ano
Umělé hmoty		ne	ano	ano	ne

3 PLAZMOVÉ ŘEZÁNÍ SE ZAŘÍZENÍM TRANSCUT 300

V této kapitole je popsáno nové plazmové zařízení TransCut 300 (Obr. 9), které bylo použito pro experiment. Z důvodů netradiční a nové konstrukce, která není standardem u ostatních zařízení.

Výchozím médiem pro plazmové řezání se systémem TransCut 300 vyvinuté společností Fronius je místo plynu kapalina. Kapaliny se ve srovnání

se stlačeným vzduchem nebo plyny vyznačují výraznými přednostmi. Velmi malý objem, který zabírají, je zárukou bezproblémového samozásobení, takže odpadá jinak nutná přípojka pro řezací plyn, popř. stlačený vzduch. Tímto je dána největší výhoda je neomezená mobilita a současně snížení emisí škodlivých látek. Tento kompaktní řezací přístroj lze vzít kdykoli a kamkoli sebou během nejkratší možné doby je připraven k použití.¹⁵

Název TransCut 300 je jednak označením pro nový systém plazmového řezání, jednak pojmem pro novou technologii řezání. Přístroj je vybaven integrovaným zásobníkem pro kapalné řezací médium, jež pojme 1,5 l a lze jej jednoduše doplnit kartuší. V podobě ionizované páry tato kapalina slouží jako médium pro plazmu, přičemž spotřeba činí jenom několik gramů za minutu. Plný zásobník vystačí při běžném použití na staveništi až měsíc a při nepřetržitém řezání stačí jedna náplň kartuše cca tři hodiny. Bezoxidové řezné plochy nevyžadují další opracování. Jelikož řezný proces zabraňuje zadušení řezných ploch, snižuje se při následném svařování riziko tvorby pórů. Při následujících svařovacích pracích je sníženo riziko tvorby pórů: Proces TransCut 300 zamezuje nitridaci řezných ploch, neboť využívá řezací médium bez dusíku. Vyšší rychlost řezání přispívá i k větší hospodárnosti. Přístroj TransCut 300 je nejmenší a s hmotností pod 14,6 kg i nejlehčí systém plazmového řezání ve své třídě a je vhodný také pro použití s generátorem. Potřebuje pouze přípojku na 230 V a kvalitně řeže plechy z oceli, hliníku nebo vysoce legované (nerezové) oceli až do tloušťky 6 mm. Má stabilní oblouk díky moderní invertorové technologii s rezonanční inteligencí. TransCut 300 je ideální řezací nástroj pro mobilní nasazení. Široká oblast využití sahá od konstrukcí vzduchotechnických a klimatizačních zařízení, strojírenská výroba, opravy a výroby karoserií přes montážní firmy, konstrukce průmyslových zařízení a potrubních vedení až k rekonstrukčním a opravářským pracím.¹⁵

Řezací médium TransCut Liquid, kapalina na vodní bázi a z ní vyvíjené parní plazmové médium, produkuje v porovnání se stlačeným vzduchem nebo plazmovým plynem extrémně malé množství emisí. Odsávací zařízení, která jsou jinak nutná pro odsávání zplodin nebo kovového prachu, díky tomu odpadají. Při řezání oceli se vdechovatelné emise snižují o faktor 18 a emise NO_x o faktor 8; u koroziivzdorné oceli (1.4301) představují odpovídající

hodnoty 1,8, resp. 3. Plazmové řezání se zařízením TransCut 300 je tzv. „zelené řezání“. Emise závažných škodlivých látek jsou razantně sníženy až o 90%. Tímto se pracovní prostředí podstatným způsobem zlepší. Toto zařízení snižuje vytváření kovových jisker a znečištění stavebních součástí. Zejména u potrubí se podstatně snižuje náročnost čistících a dodatečných prací.¹⁵



Obr. 9 Zařízení TransCut 300¹²

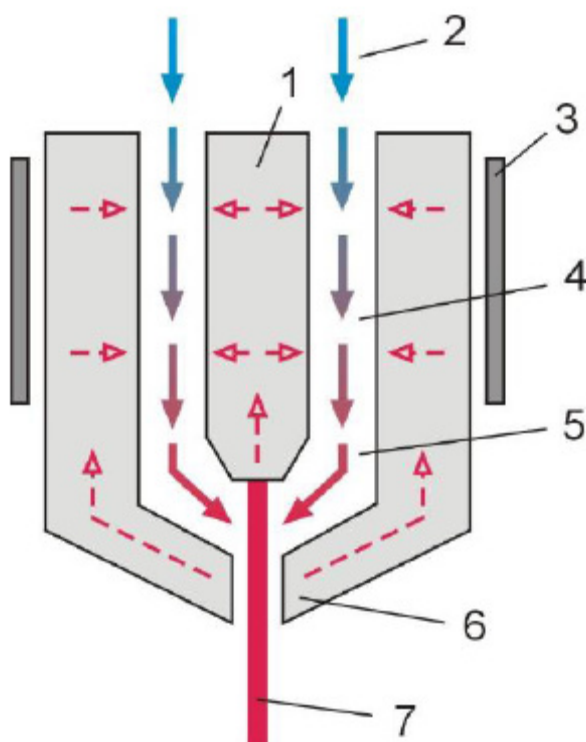
3.1 Regenerativní chlazení

Princip regenerativního chlazení u zařízení TransCut 300 pracuje takto. Shora přiváděná kapalina se ohřívá, toto teplo se používá k ohřevu trubice a zároveň chladí výstupní plazmový paprsek.

Výstupní plazmový paprsek má vysokou teplotu. Toto teplo se částečně předává do řezací hubice, která dále odvádí toto teplo, od nejteplejšího místa po nejchladnější místo směrem nahoru. Je zde využito odpadní teplo, které se

dále využívá pro ohřev přiváděné kapaliny. Stejným způsobem se využívá teplo, které vzniká v katodě.

Po obvodě jsou žhavicí prvky, které pomáhají k ohřátí při startu a k dodržení stabilně správné teploty. Rychlost výstupu je velice vysoká musí se ohřát intenzivně.



1. Katoda
2. Kapalina
3. Žhavicí prvek
4. Směs páry s kapalinou
5. Pára
6. Řezací hubice
7. Plazmový paprsek

Obr. 10 Regenerativní chlazení⁸

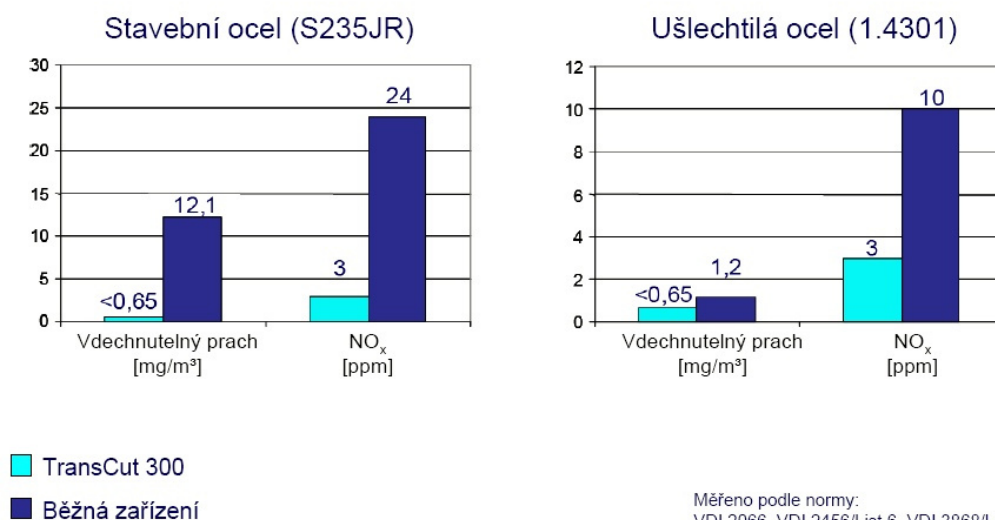
3.2 Princip výrazného snížení emisí

Kapalné řezací medium „TransCut Liquid“ rozhodujícím způsobem redukuje emise škodlivin a umožňuje „zelené řízení“. Emise škodlivých látek jsou sníženy až o 90% (Obr.11) . Díky minimálním emisím je ideálnější klima na pracovišti.

Proces je založen na stabilizaci plazmy vodní parou. Voda (H_2O) obsahuje 33% kyslíku a 66% vodíku po disociaci. Převažující vodíkový plyn má silný redukční účinek. Obecně $\text{MeO} + \text{H}_2 = \text{Me} + \text{H}_2\text{O}$. Redukce je podmíněna teplotou.

Např. redukce oxidu nikelnatého. Oxid nikelnatý je redukován vodíkem ze syntetického plynu při teplotě 200°C . $\text{NiO (s)} + \text{H}_2 \text{ (g)} \rightarrow \text{Ni (s)} + \text{H}_2\text{O (g)}$.

Podobným principem, ale při jiných teplotách reaguje také oxid hlinitý a redukci na hliník, a také oxid chromitý s redukcí na chrom. Tímto jsou dány nižší oxidy a snižují se emise.



Obr. 11 Emise škodlivin⁸

Tab. 7 Porovnání TransCut s běžným zařízením⁸

Popis: + Velmi dobře O Uspokojivě - Neuspokojivě	TransCut 300	Běžná vzduchová plazmová řezací zařízení	
	Interní zásoba	Externí zásobené vzduchem	Integrované zásobené stlačeným vzduchem
Médium	Kapalina	Vzduch	Vzduch (okolní vzduch)
Spotřeba média	6 ml/min	120 l/min	120 l/min
Mobilita	+	-	O
Hmotnost	+	+/-	-
Síťové napájení	+	+	-
Materiál	+	+	+
-Rychlost řezání	+	+	-
-Řezné plochy	+	-	-
-Tvorba nerovností	O	+	+
Životnost spotřebních součástí	O	O	O
Emise škodlivin	+	-	-

4 EXPERIMENT

4.1 Řezané materiály

Vysokopevnostní ocel Creusabro 4800

Ocel Creusabro 4800 je otěruvzdorná ocel u které je odolnost proti opotřebení až o 50% vyšší v porovnání s vodou kalenou ocelí tvrdosti 400 HB. Oceli Creusabro jsou termomechanicky válcované s řízenou rychlostí ochlazování, případně kalené do oleje. Jejich struktura je martenziticko-bainitická. Tyto oceli též obsahují zbytkový austenit. Zbytkový austenit se při plastické deformaci mění na tvrdý martenzit. V těchto ocelích se využívá tzv. Trip – efekt. Ve struktuře se nacházejí také velmi tvrdé homogenně rozložené karbidy titanu. Odolnost proti otěru není výlučně spojená s tvrdostí ocelí v daném stavu. Mikrostruktura oceli má veliký vliv na její vlastnosti při použití. Chemické složení a výrobní postupy aplikované na ocel Creusabro 4800 zdokonalují její mikrostrukturu, která přispívá ke zlepšení odolnosti proti opotřebení následujícími efekty. Deformační zpevnění, TRIP (Transformation Induced by Plasticity) efekt, existence tvrdých karbidů titanu, chromu a molybdenu.¹¹

Garantovaná tvrdost oceli Creusabro 4800 v dodaném stavu umožňuje procesy zpracování jako řezání, obrábění a ohýbání nevykonávat složitěji než zpracování ve vodě kalené oceli tvrdosti 400 HB.¹¹

Tato ocel je ideální pro použití v dolech a lomech, cementářském a ocelářském průmyslu, v závodech a v zemědělské technice. Je vhodná pro všechny typy opotřebení, kluzu anebo dopadu, suchá anebo vlhká media včetně opotřebení, kde teplota dosahuje až 350 °C.¹¹

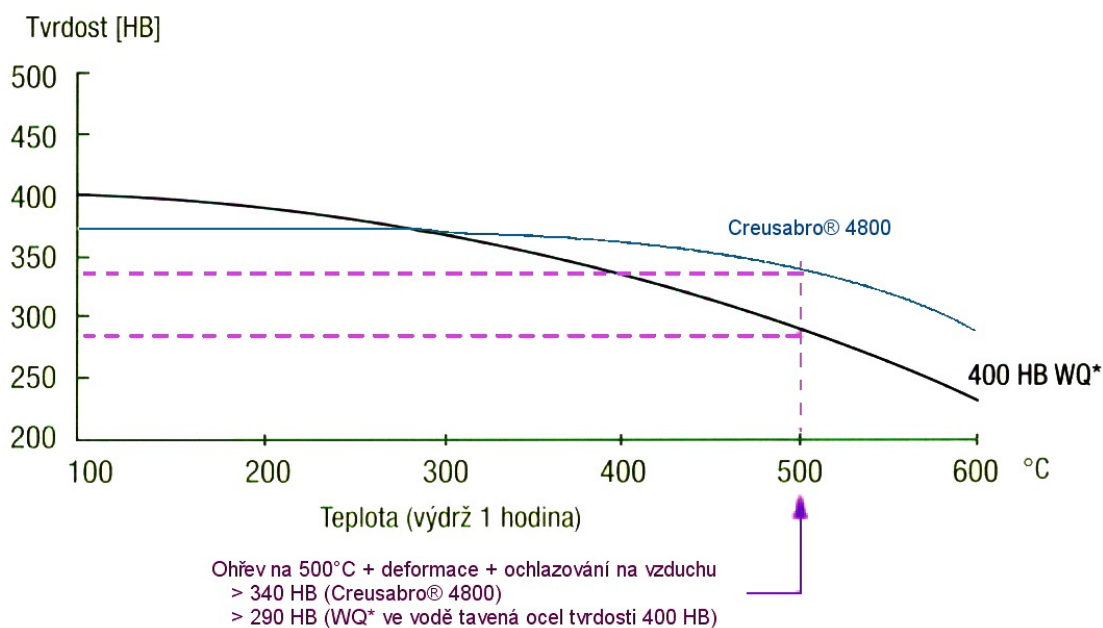
Ke zpracování tohoto materiálu se můžou použít všechny klasické teplotní procesy (plamen – plazma – laser). Plazma/laser procesy jsou obzvlášť doporučené, výsledky řezání poskytují lepší přesnost a produkují nižší tepelně ovlivněnou oblast. Pokud je použit jakýkoliv termální proces, jsou následné podmínky dostačující k tomu, aby zabránily vzniku trhlin za studena.

Tab.8 Chemické složení Creusabro 4800 ¹¹

C	S	P	Mn	Ni	Cr	Mo	Ti
≤ 0,200	≤0,005	≤0,018	≤1,600	0,200	≤1,900	≤0,400	≤0,200

Tab.10 Mechanické vlastnosti Creusabro 4800 ¹¹

Tvrdost [HB]	Rm [Mpa]	Re [Mpa]	A [%]	KCV -20°C [J.c m ⁻²]
370	1200	900	12	45

Obr.12 Vlastnosti Creusabro 4800 při vysoké teplotě ¹¹

Korozivzdorná ocel DIN 1.4301 / AISI 304 , X5CrNi18-10

Základní austenitická nestabilizovaná korozivzdorná ocel. Výborná svařitelnost a dobrá odolnost proti korozi při normálních teplotách. Je vhodná pro prostředí oxidační povahy, pro silné anorganické kyseliny jen při velmi nízkých koncentracích a v oblasti kolem normálních teplot. Je vhodná pro slabé organické kyseliny do středních teplot při současném provzdušnění. Má sklon ke zpevňování při tváření za studena. Zpevnění vzniká přetvořením austenitu na deformační martenzit a může dojít k zmagnetování. Při teplotách nad 450 °C může docházet k mezikrystalické korozi. ¹⁴

Používá se zejména v potravinářském, farmaceutickém a kosmetickém průmyslu, stavební architektuře, pro rozvody pitné vody, ČOV a mnoho dalších aplikací.¹⁴

Tab. 11 Chemické složení DIN 1.4301 / AISI 304 , X5CrNi18-10¹⁴

C	Si	Mn	P max	S	N	Cr	Ni
≤ 0,07	≤1,00	≤2,00	0,045	≤0,015	≤0,11	17,50-19,50	8,00-10,50

Tab. 12 Mechanické vlastnosti DIN 1.4301¹⁴

Tvrdość [HB]	Rm [Mpa]	Re [Mpa]	A [%]
92	515	205	40

Hliník AW-1060, ČSN EN 573-1

Dobrá leštitelnost, vysoká korozivní odolnost, dobrá svařitelnost, výborná tvářitelnost, nízká pevnost v tahu.¹⁰

Tab.13 Chemické složení Hliník AW-1060¹⁰

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Al min%
0,25	0,35	0,05	0,03	0,03	0,05	0,03	99,6

Tab. 14 Mechanické vlastnosti AW-1060¹⁰

Rm [Mpa]	Re [Mpa]	A [%]
Min 130	Min 35	25

Uhlíková ocel DIN 10036, S235JRG1, 11 373

Klasická uhlíková ocel neuklidněná konstrukční ocel obvyklé jakosti vhodná ke svařování. Součásti konstrukcí a strojů menších tlouštěk, i tavně svařované, namáhané staticky i mírně dynamicky. Vtokové objekty vodních turbín, výtoky, hradidlové tabule, stavidla, méně namáhaná svařovaná potrubí a odbočnice, jezové konstrukce. Dna plochá, klenutá a lemovaná, vysokotlaká. Vhodná ke svařování.¹⁰

Obvyklých jakostí. Svařitelnost zaručená. Na součásti (menších tlouštěk) konstrukcí a strojů (i tavně svařovaných), namáhané staticky i mírně

dynamicky. Pásky a pruhy na ráfky jízdních kol, pro profily k vázání svazků apod.¹⁰

Tab.15 Chemické složení Uhlíková ocel 11 373, S235JRG1, DIN 10036¹⁰

C	P	S
0,22	0,05	0,05

Tab. 16 Mechanické vlastnosti DIN 10036¹⁰

Rm [Mpa]	Re [Mpa]	A [%]	KCU 3 [J.cm ²]
365 - 441	235	25	34

4.2 Popis experimentu

Experimentální část byla provedena v dílenských prostorách Fakulty Strojní - Ústav strojírenské technologie. Pro srovnání jsme využily vzduchovou plazmu ESAB Power Cut LPH 50 (obr.13) a plazmu stabilizovanou vodní parou Fronius TransCut 300 (obr.13). Jejich technické údaje uvádí Tab.17. Ruční plazmové řezací hořáky byly pevně upnuty ve strojním posuvu Tab.18 v konstantní vzdálenosti od řezaného plechu, řezací rychlost byla nastavena na 250 mm/min. Řezný proud byl nastaven na 50 A (ESAB Power Cut LPH 50) a 30 A (Fronius TransCut 300).

Řezy byly prováděny kolmo a směr řezání byl pro všechny vzorky v rámci celého experimentu stejný. Vzhledem k tepelnému ovlivnění jsme zvolily vzdálenost sousedních řezů 25 mm, tepelně ovlivněná oblast se pohybuje řádově v několika milimetrech cca 2 mm. Testovaný materiál byly plechy typu (Vysokopevnostní ocel Creusabro 4800 tl. 3 mm, Korozi-vzdorná ocel DIN 1.4301 tl.6mm, Uhlíková ocel DIN 10036 tl. 6 mm, Hliník AW-1060 tl. 6 mm,) nebyly žádným způsobem upravovány, pouze byly upnuty a vystředěny. Po řezech plazmou byly vzorky ochlazovány volně na vzduchu.

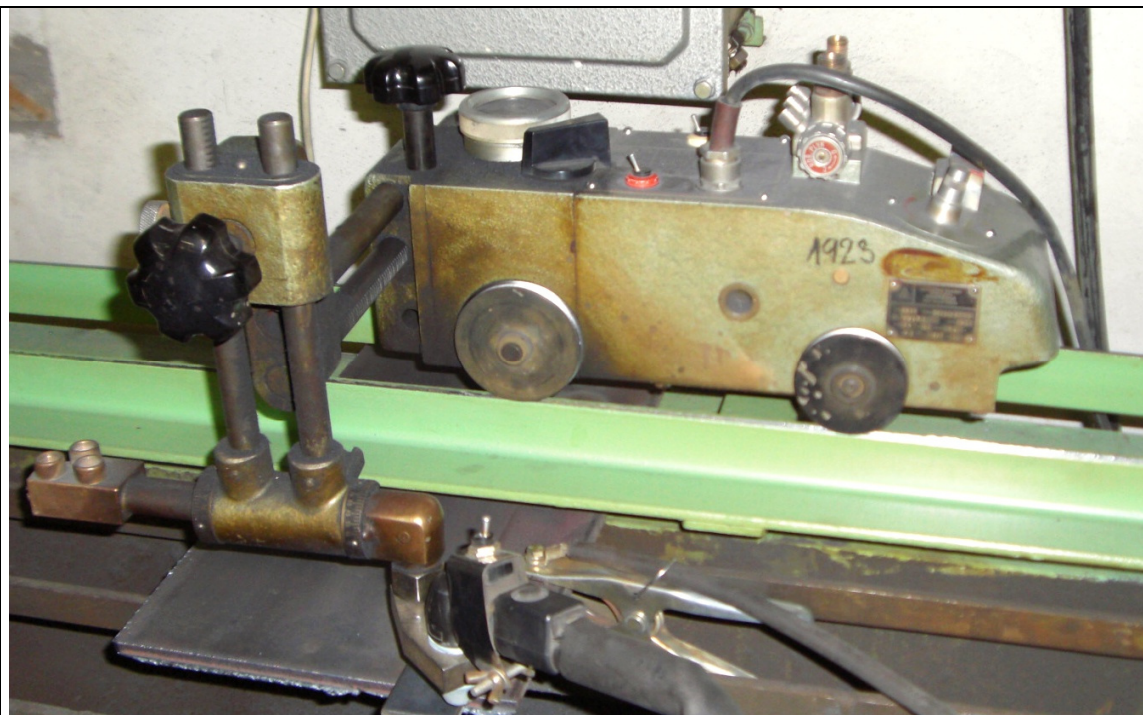
Následně byly vyřezány, ruční pilkou, vzorky řezných ploch o rozměrech 10 x 10 mm. Na těchto vzorcích byla zkoumána struktura povrchu řezu pod mikroskopem.

Použili jsme mikroskop (Obr.14) pro zpracování povrchu Schut Geometrical Metrology. Fotky byly pořízeny za pomoci kruhového osvětlení a snímáno s digitální kamerou s rozlišením 1,3 Mpix a softwaru Dinolit Digital Microscope. Vzhledem nerovnostem povrchu a hloubce ostrosti použité mikroskopové kamery nejsou všechny fotografie ideálně zaostřeny.

Tab. 17 Technické údaje TransCut 300 a Power Cut LPH 50

	TransCut 300	Power Cut LPH 50
Fázové síťové napětí	50/60 Hz +10%/-15% 230 V	400 V / 50 Hz 320 V
Síťové jištění, zpožděný typ	16 A	32 A
Rozsah řezacího proudu	16 – 30 A	0 – 50 A
Řezací proud	35% DZ 30A 100% DZ 16A	60% DZ 50A 100% DZ 30A
Doporučená tloušťka plechu	6 mm	12 mm
Tlak přívodního vzduchu		4,5 – 7,0 bar
Spotřeba vzduchu		118l/min
Kapacita dělicího řezu	10 mm	15 mm
Provozní doba na jedno naplnění	3 h	
Krytí	IP 23	IP 23
Rozměry d x š x v	460 x 180 x 275 mm	680 x 325 x 715 mm
Hmotnost	14,6 Kg	89 Kg

Tab. 18 Technické údaje strojního posuvu



Délka vodící dráhy	2000 mm
Rozsah tloušťky řezaného materiálu	3 – 300 mm
Rozsah řezací rychlosti	100 – 600 mm/min
Hmotnost	54 kg



Obr. 13 Power Cut LPH 50 a TransCut 300



Obr. 14 Mikroskop Schut Geometrical Metrology

Řez vzduchovou plazmou Power Cut LPH 50 - Creusabro 4800



Vysokopevnostní ocel Creusabro 4800

Zvětšeno: 10x

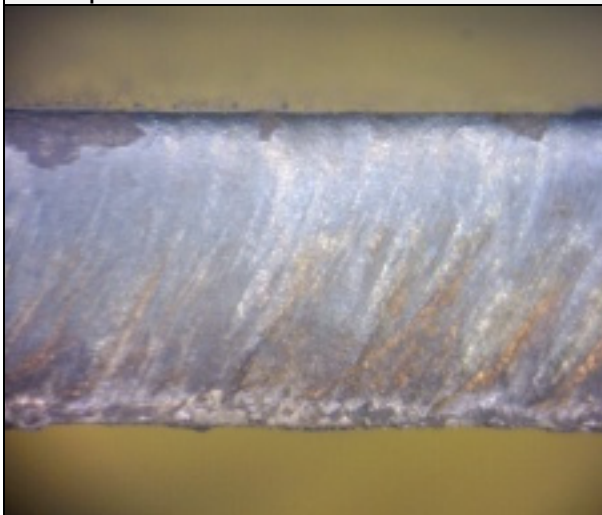


Vysokopevnostní ocel Creusabro 4800

Zvětšeno: 40x

Při čtyřicetinásobném zvětšení, na řezné ploše, jsou viditelné vytvrzující karbidy abrazi odolné oceli. Ve spodní části je natavená struska.

Řez plazmou TransCut 300 - Creusabro 4800



Vysokopevnostní ocel Creusabro 4800

Zvětšeno: 10x

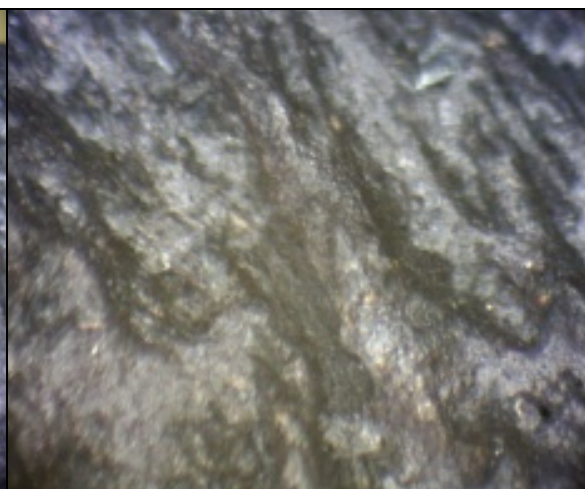


Vysokopevnostní ocel Creusabro 4800

Zvětšeno: 40x

Plocha řezu má vysokou čistotu a při vysokém zvětšení jsou viditelné uložené karbidy ve velmi tenké vrstvě oxidu.

Řez vzduchovou plazmou Power Cut LPH 50 - Korozivzdorná ocel DIN 1.4301



Korozivzdorná ocel DIN 1.4301

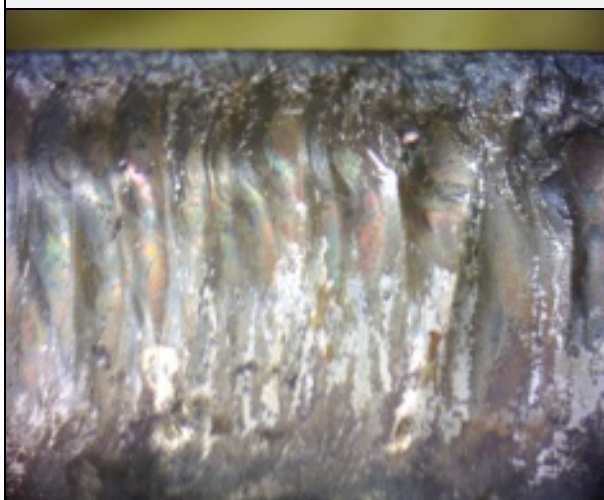
Zvětšeno: 10x

Korozivzdorná ocel DIN 1.4301

Zvětšeno: 40x

Na obrázcích lze vidět především kombinace oxidy chromu s oxidy železa. Hlavně oxidy a nitridy chromu a částečně železa. Tyto plochy vznikly reakcí mezi vysokolegovanou ocelí a vzduchem. Oxidy chromu se vyskytují ve větší míře než železa, protože chrom má větší afinitu ke kyslíku a slučuje se s ním spíše. Oxidy chromu dávají charakteristický tmavé zabarvení řezu.

Řez plazmou TransCut 300 - Korozivzdorná ocel DIN 1.4301



Korozivzdorná ocel DIN 1.4301

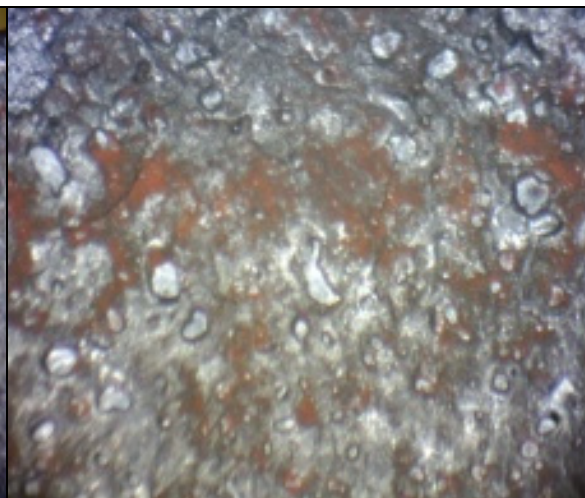
Zvětšeno: 10x

Korozivzdorná ocel DIN 1.4301

Zvětšeno: 40x

Na řezné ploše vidíme, že na povrchu nejsou oxidy a nitridy.

Řez vzduchovou plazmou Power Cut LPH 50 - Uhlíková ocel DIN 10036



Uhlíková ocel DIN 10036

Zvětšeno: 10x

Uhlíková ocel DIN 10036

Zvětšeno: 40x

Na obrázcích vidíme povrch který je tvořen relativně tlustou vrstvou oxidů a nitridů, která nemá výraznou vazbu na základní materiál. Toto je dokumentováno v levé části fotografie kde dochází k odloupení této vrstvy.

Řez plazmou TransCut 300 - Uhlíková ocel DIN 10036



Uhlíková ocel DIN 10036

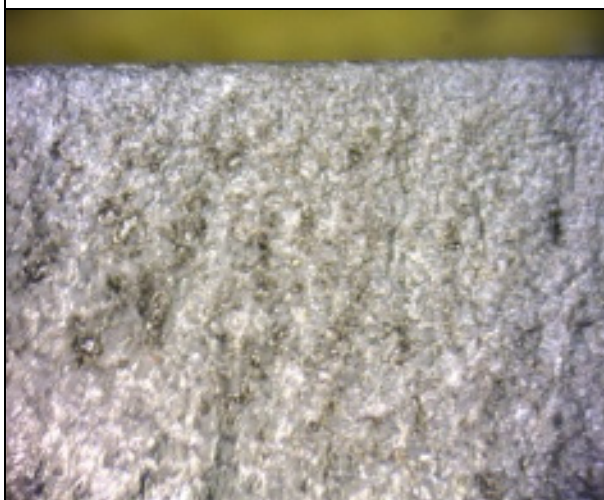
Zvětšeno: 10x

Uhlíková ocel DIN 10036

Zvětšeno: 40x

Na obrázcích je čistá viditelná plocha s výraznějším rýhováním a bez viditelných oxidů .

Řez vzduchovou plazmou Power Cut LPH 50 - Hliník AW-1060



Hliník AW-1060

Zvětšeno: 10x

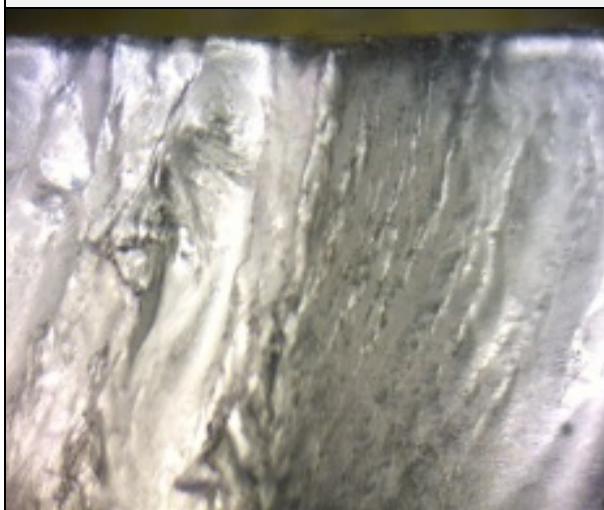


Hliník AW-1060

Zvětšeno: 40x

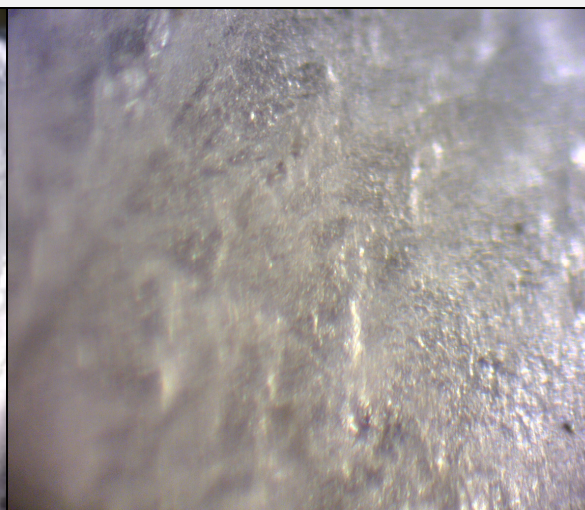
Na obrázcích jsou vidět plošky oxidu hlinitého.

Řez plazmou TransCut 300- Hliník AW-1060



Hliník AW-1060

Zvětšeno: 10x



Hliník AW-1060

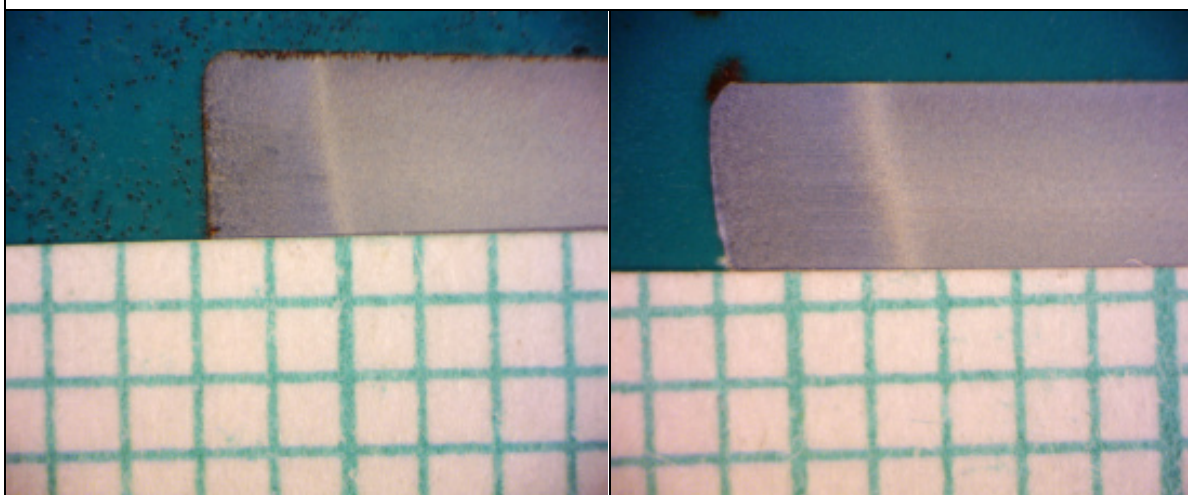
Zvětšeno: 40x

Na obrázcích jde vidět čistý kovový povrch bez oxidické vrstvy

4.3 Metalografická analýza

Vzorky z řezných ploch byly připravený běžným metalografickým postupem. Použitá leptadla byla vysokopevnostní ocel Nital 2%, korozivzdorná ocel 5+5, hliník Fuss, uhlíková ocel Nital 2%. Tepelně ovlivněná oblast (TOO) a její velikost byly sledovány na metalografických výbrusech makroskopicky i mikroskopicky. Uhel pozorování byl kolmý k rovině řezu.

Makrosnímky TOO- Vysokopevnostní ocel

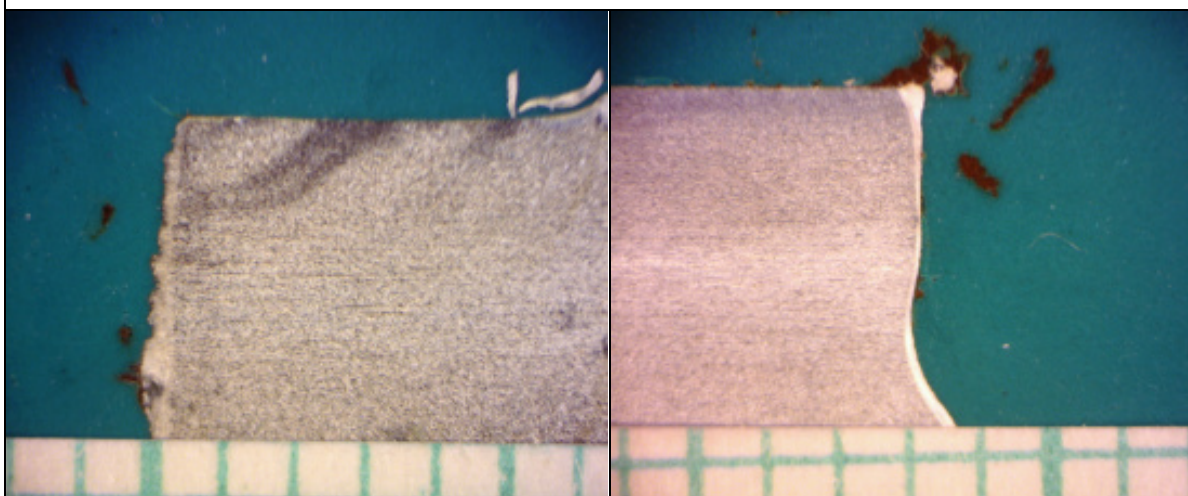


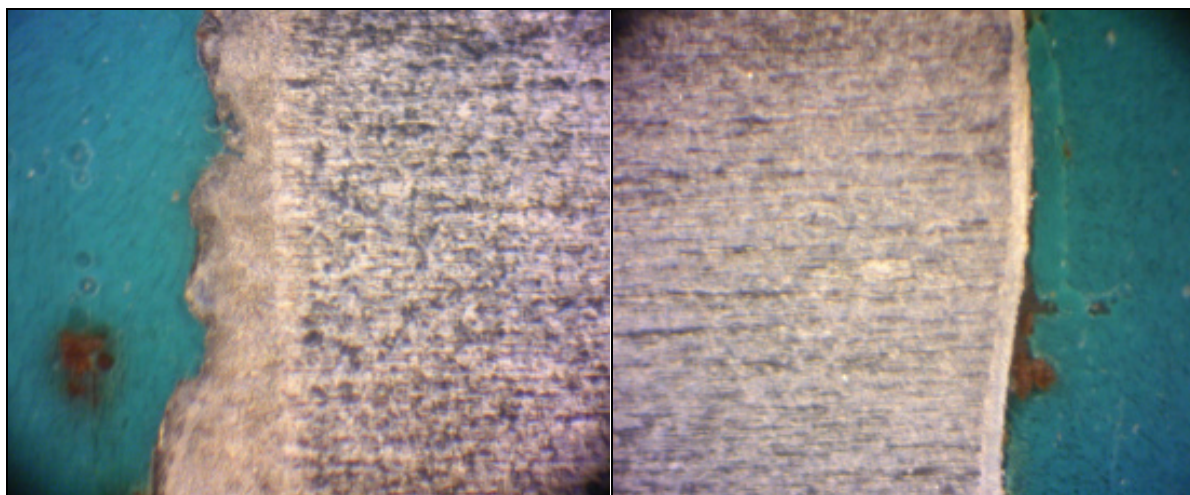
Vzduchová - TOO=1,8 mm

TransCut 300 – TOO=2,1 mm

U vzorku řezaným TransCutem 300 se nám projevila nepatrně větší TOO.

Makrosnímky TOO- Korozivzdorná ocel



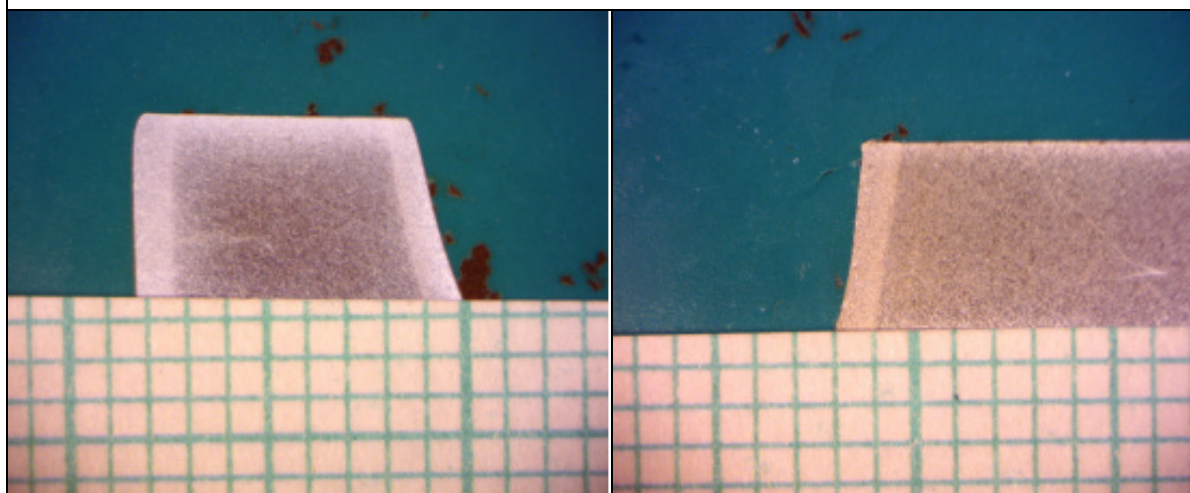


Vzduchová

TransCut 300

U vzorku řezaného vzduchovou plazmou se projevila větší vrstva oxidů na povrchu a u vzorku TransCutem 300 se projevila jen velmi tenká vrstva oxidů. TOO v korozi-vzdorných ocelích je velmi malá vzhledem k nízké tepelné vodivosti.

Makrosnímky TOO- Uhlíková ocel

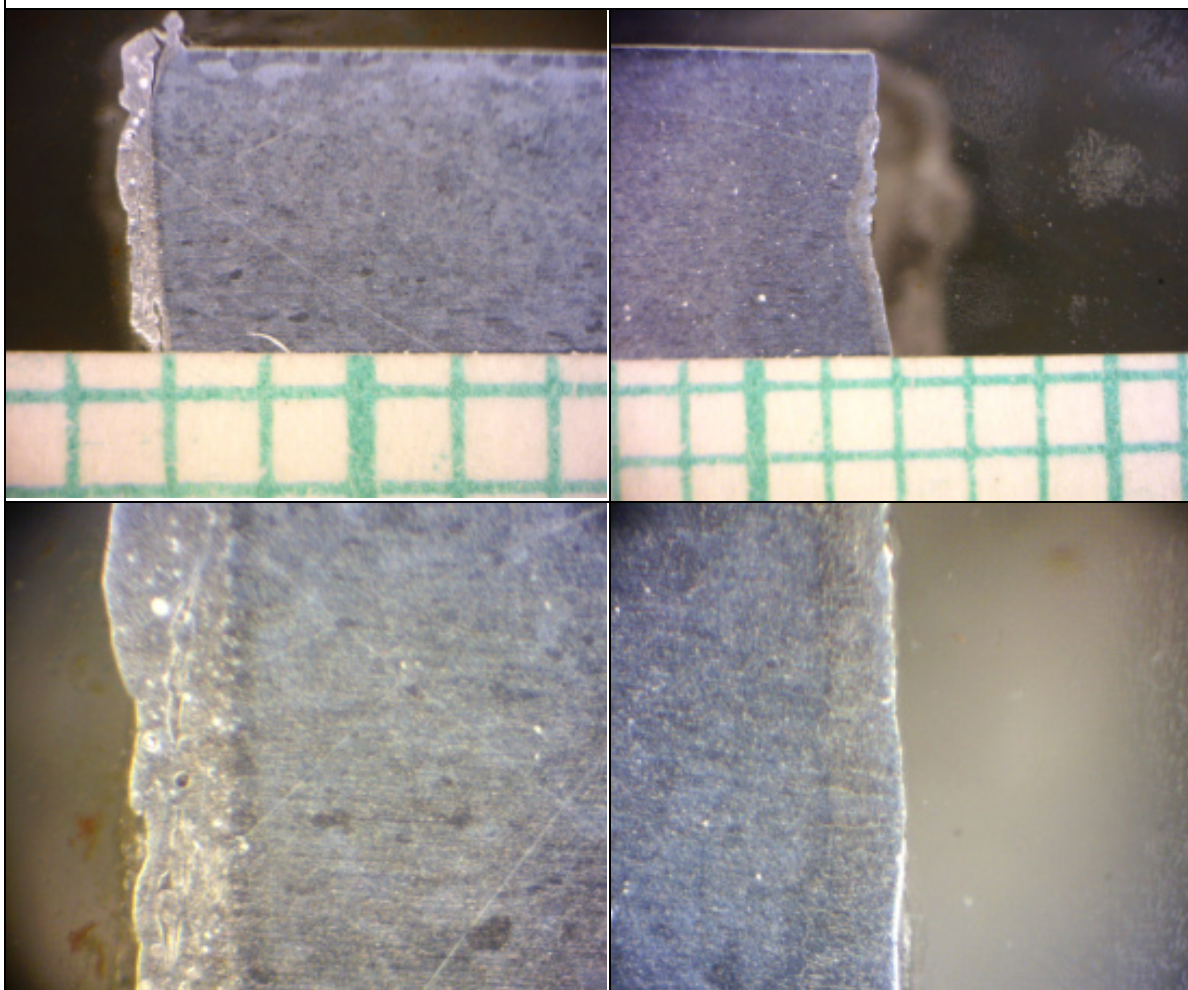


Vzduchová – TOO=1mm

TransCut 300 – TOO=1mm

TOO je velice viditelná. Šířka tepelné vrstvy je z velké míry ovlivněna tloušťkou materiálu. Čím větší šířka tím menší tepelné ovlivnění.

Makrosnímky TOO- Hliník

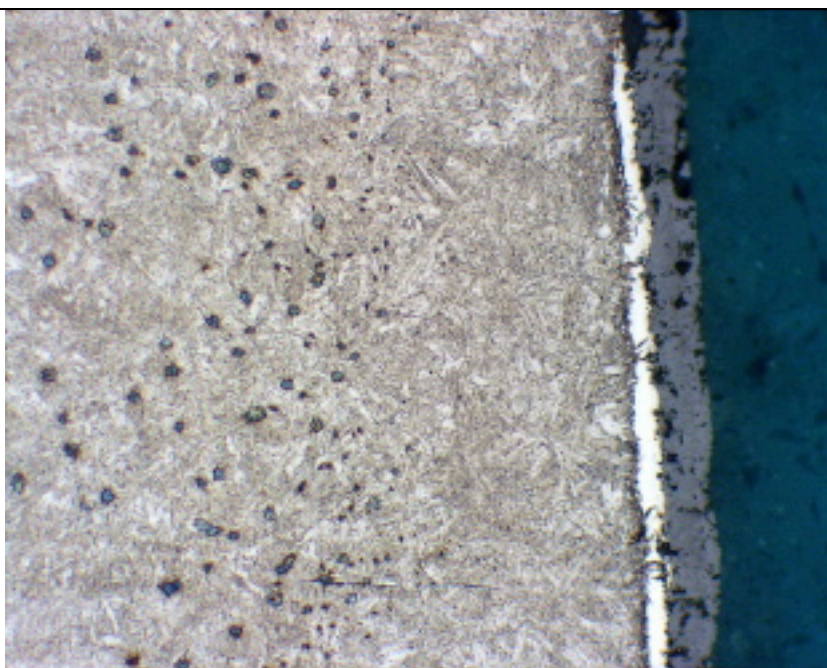


Vzduchová

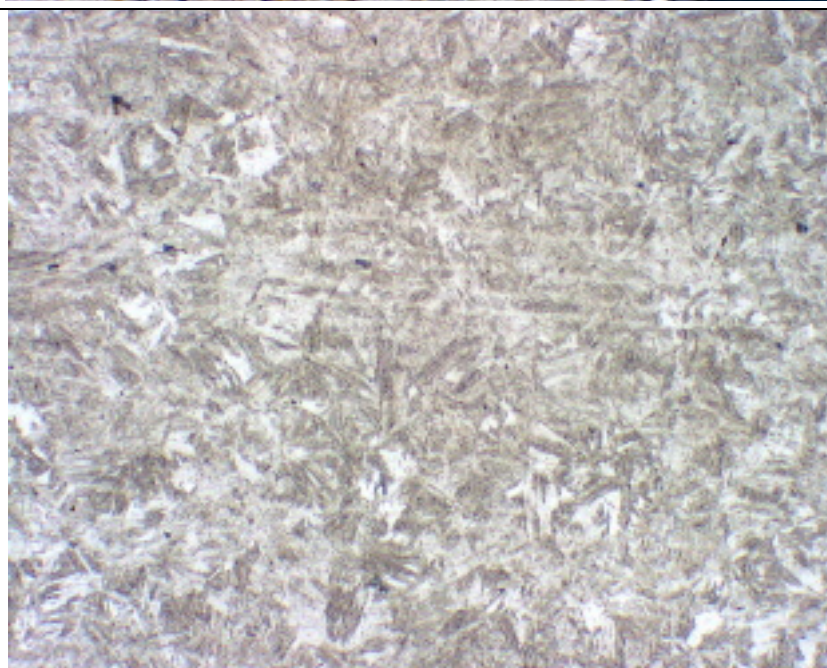
TransCut 300

TOO je docela rozsáhlá. Na fotkách není moc zřetelně viditelná, protože změna struktury není. Částečně zřetelná se projevuje u TransCutu. Projevuje se to jen poklesem tvrdosti materiálu. Na straně vzduchové je viditelná větší oxidická vrstva. Při tomto zvětšení TOO není zřetelně viditelná.

Mikro snímky - Vysokopevnostní ocel



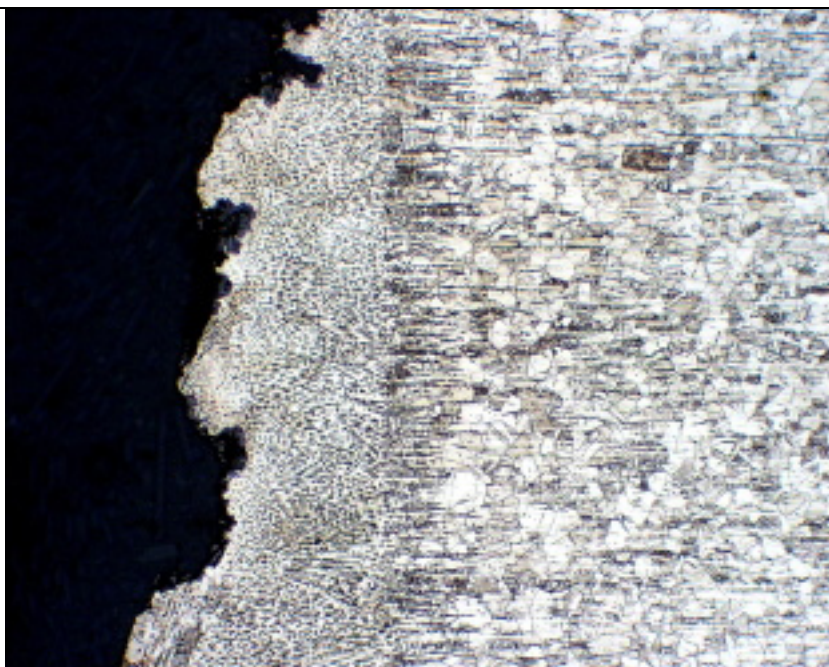
500X



200X

TOO je pokryta viditelnou vrstvou oxidů a oduhliničenou vrstvou. Také vidíme v TOO růst martenzitického zrna. Z důvodů identičnosti snímků vzorku, jsme umístili jen jeden pro obě plazmy.

Mikro snímky – Korozivzdorná ocel Vzduchová



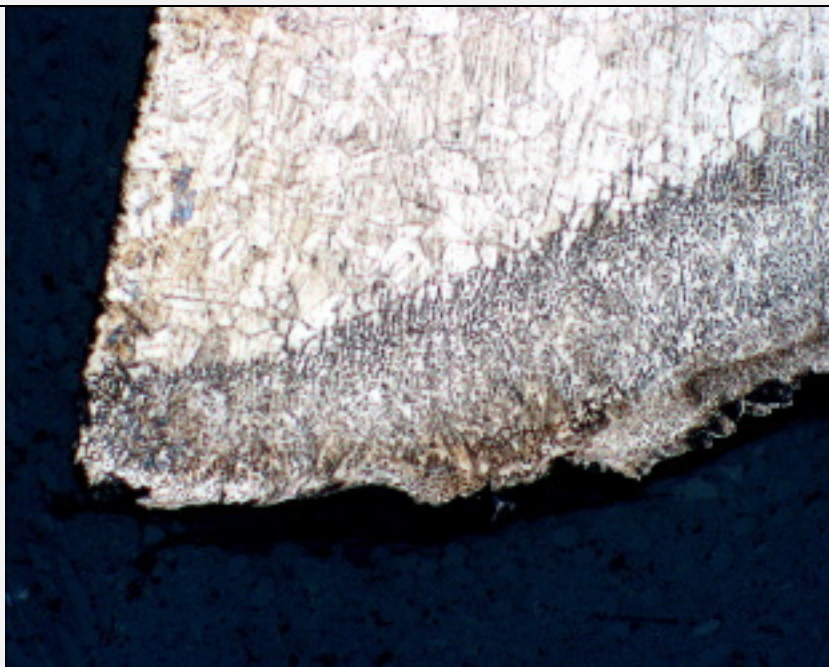
100x



200x

Na snímku lze vidět velký nárůst oxidů tepelně ovlivněná oblast je stíněna vrstvou oxidů.

Mikro snímky – Korozivzdorná ocel TransCut 300



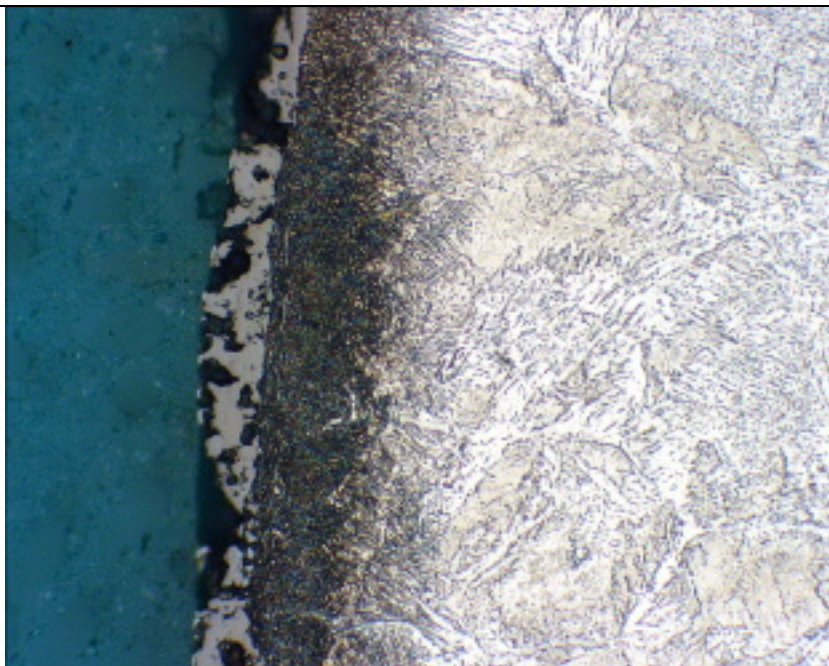
200x



200x

Na snímku jde vidět velmi tenkou vrstvu oxidů. TOO bude přibližně stejné jak u vzduchové plazmy.

Mikro snímky – Uhlíková ocel Vzduchová plazma



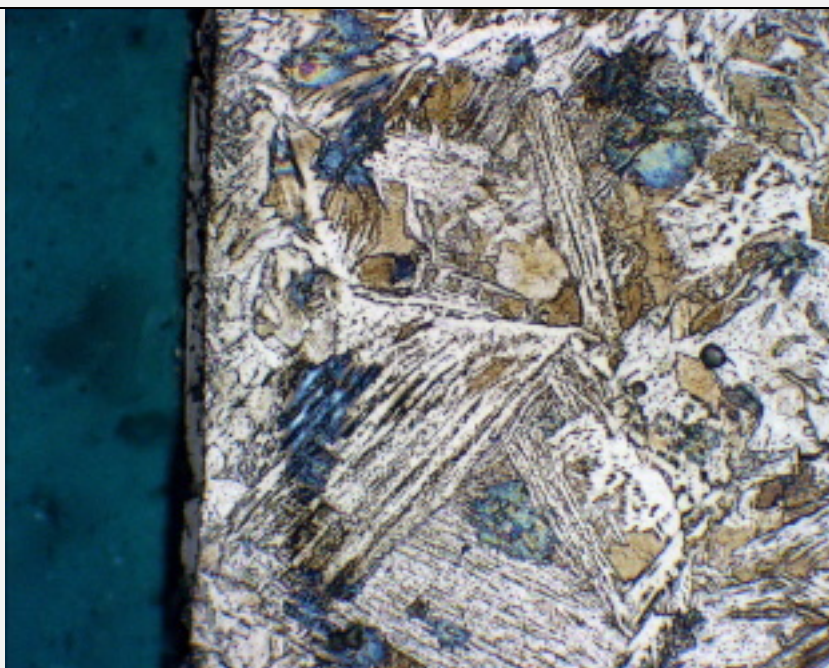
500x



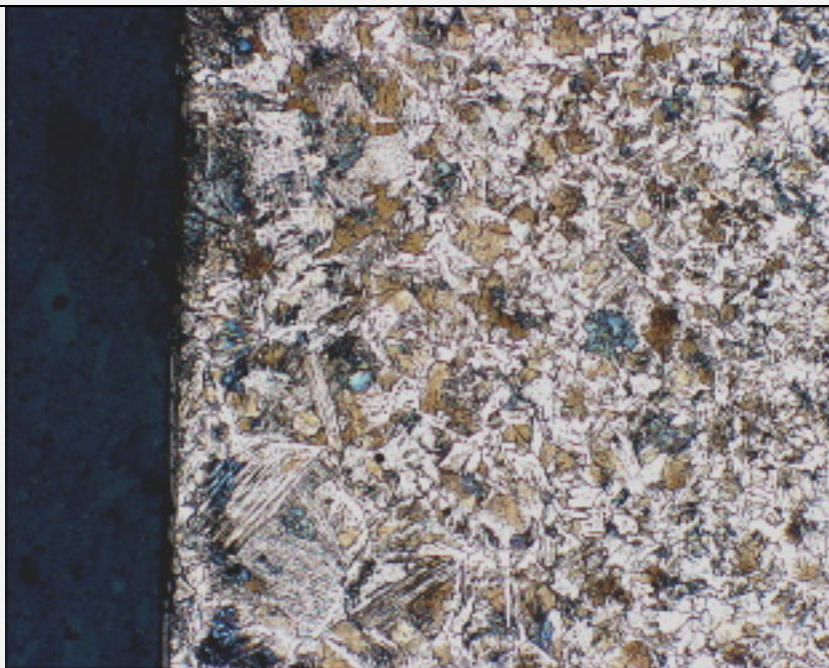
200x

Na obrázcích je viditelná vrstva oxidů a výrazné tepelné ovlivnění pod vrstvou oxidů i se zhrubnutím struktury.

Mikro snímky – Uhlíková ocel TransCut 300



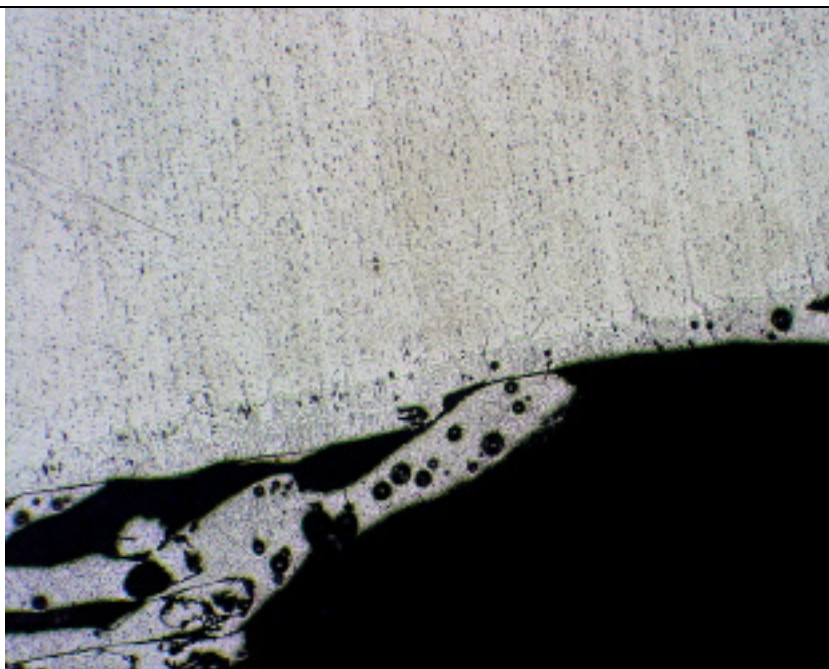
500x



200x

Vrstva oxidů je viditelně menší než u vzorku ze vzduchové plazmy.

Mikro snímky – Hliníková ocel -Vzduchová



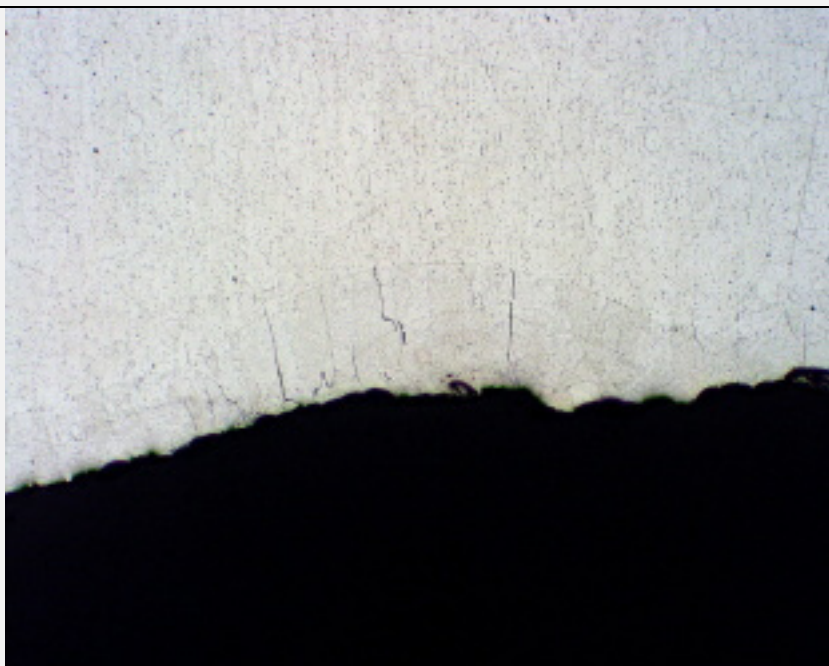
100x



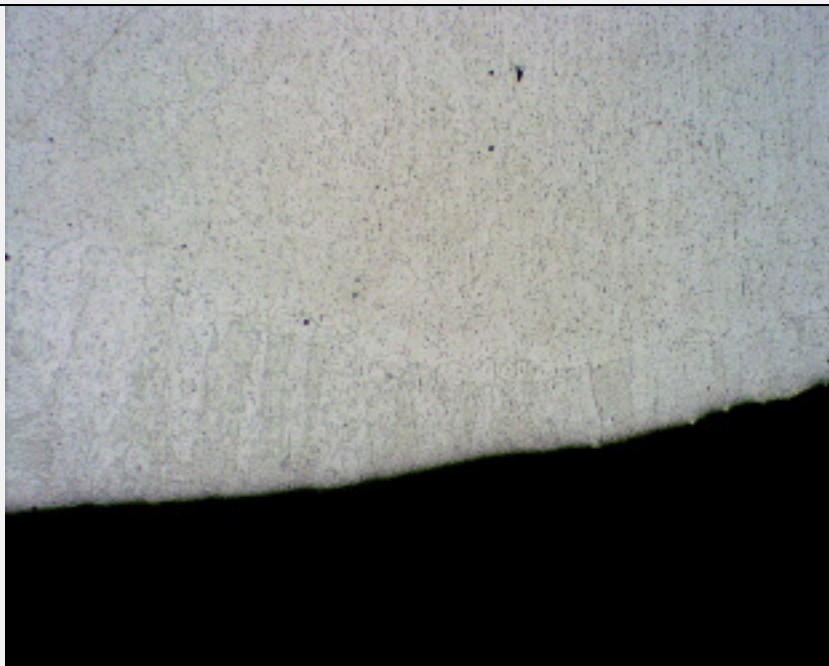
100x

Na vrchním snímku jdou vidět oxidy a natavený hliník, dole jde vidět základní materiál.

Mikro snímky – Hliník - TransCut 300



50x

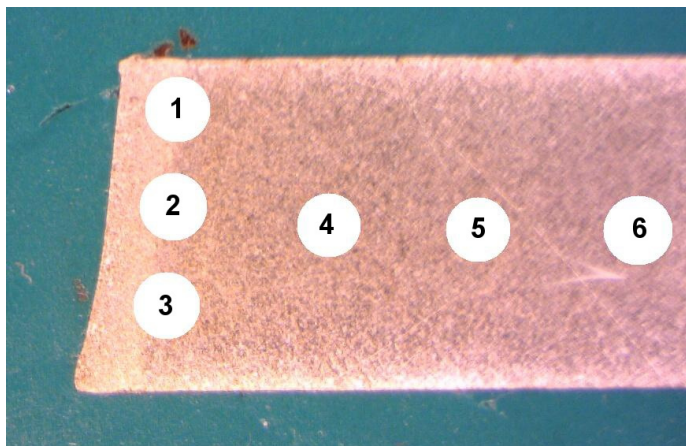


50x

Na snímcích lze vidět tepelné ovlivnění. Pokles tvrdosti jde dál.

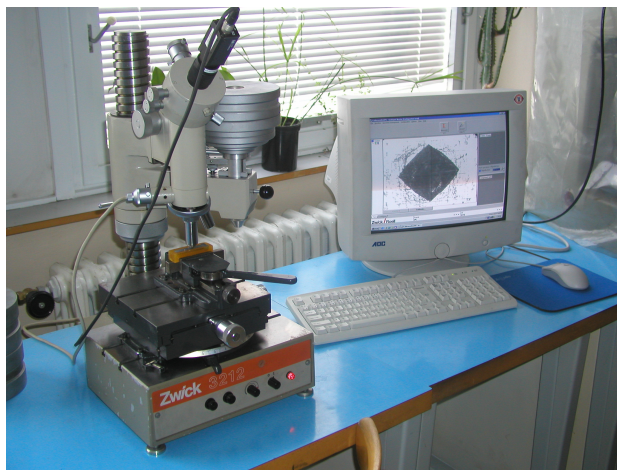
4.4 Měření tvrdosti vzorků

Na jednotlivých vzorcích byla měřena tvrdost. Každý vzorek byl měřen v šesti bodech (Obr.15), tři vpichy byly provedeny po délce řezu a tři na tepelně ovlivněné oblasti.



Obr. 15 Pozice měření tvrdosti

Hodnocení tvrdosti bylo provedeno na zařízení Zwick 3212 (obr.16) bylo provedeno metodou dle Vickerse při zatížení 5 kg – HV5.. Přístroj slouží pro stanovení tvrdosti podle Vickerse podle DIN 50133, ASTM E 92, BS 427, ISO/R81, ISO/R192, ISO/R399. Postup je vhodný pro měření tvrdosti běžných ocelí, ale také pro velmi tvrdé materiály nebo vrstvy. Dále je přístroj vybaven zařízením pro měření mikrotvrdosti. Pro snímání a vyhodnocení vtisků je standardní stroj vybaven souřadnicovým stolem a připojením na PC, toto vybavení bylo včetně SW zhotoveno u firmy Zwick.



Obr. 16 Tvrdoměr Zwick 3212

Tab. 19 Naměřené hodnoty tvrdosti

Materiál:	Plazma	1	2	3	4	5	6	Jednotka
Vysokopevnostní ocel	VZ	469	469	461	345	352	356	[HV5]
	TC	492	487	465	313	330	339	[HV5]
Korozivzdorná ocel	VZ	215	222	222	203	189	185	[HV5]
	TC	209	194	199	205	200	200	[HV5]
Uhlíková ocel	VZ	152	152	145	121	120	120	[HV5]
	TC	152	152	151	144	133	124	[HV5]
Hliník	VZ	67	64	63	72	75	84	[HV5]
	TC	68	68	68	86	96	93	[HV5]

TC=TransCut 300, VZ=vzduchová Power Cut LPH 50

V Tab. 19 jsou uvedeny naměřené hodnoty tvrdosti. Z hodnot vidíme změnu tvrdosti struktury, která proběhla v řezaném materiálu jako důsledek tepelného ovlivnění. Tato změna se projevila u ocelí uhlíkové a vysokopevnostní oceli. Zatímco u oceli korozivzdorné jen u vzorku řezaného vzduchovou plazmou. U vzorku řezaného TransCut 300 jsou hodnoty tvrdosti téměř stejné. U vzorku hliníku došlo naopak v tepelně ovlivněné oblasti řezu k poklesu tvrdosti v důsledku snížení deformačního zpevnění. Největší hodnoty tvrdosti byla naměřena na tepelně ovlivněné oblasti a jejího přechodu se základním materiálem. U vzorku hliníku došlo naopak v tepelně ovlivněné oblasti řezu k poklesu tvrdosti v důsledku snížení deformačního zpevnění. Největší rozdíl mezi tepelně ovlivněnou oblastí a základním materiálem je vidět u vysokopevnostní oceli.

ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo seznámení se s problematikou tepelného dělení plazmou, která je velice progresivní technologií řezání materiálu. Byla provedena literární studie plazmového řezání včetně nového druhu stabilizace plazmy vodní parou. Byla navržena a připravena experimentální hodnocení řezatelnosti materiálů. Bylo provedeno porovnání mezi klasickou vzduchovou plazmou a novou plazmou TransCut 300 založené na stabilizaci vodní parou.

V experimentu bylo nařezáno několik řezů z vysokopevnostní oceli, hliníku, korozivzdorné oceli a uhlíkové oceli. Na povrchu řezu, těchto vzorcích, byla zkoumána a vyhodnocována makrostruktura, mikrostruktura, tepelně ovlivněná oblast a tvrdost. Po vyhodnocení všech struktur řezu a naměřených hodnot můžeme vyvozovat tyto závěry.

Na vzorcích řezané vzduchovou plazmou jsou zřetelně vidět oxidické vrstvy oproti plazmě stabilizované vodní parou kde je povrch čistý bez viditelných vrstev oxidů. Velmi tenká vrstva se ukázala jen u vzorku vysokopevnostní oceli.

Tepelně ovlivněná oblast byla téměř identická u obou druhů plazem. Viditelná a měřitelná byla jen u vysokopevnostní oceli a uhlíkové oceli.

Změna tvrdosti struktury, která proběhla v řezaném materiálu jako důsledek tepelného ovlivnění se projevila u oceli uhlíkové a vysokopevnostní. U oceli korozivzdorné jen u vzorku řezaného vzduchovou plazmou. U vzorku hliníku došlo naopak v tepelně ovlivněné oblasti řezu k poklesu tvrdosti v důsledku snížení deformačního zpevnění.

Přínos stabilizace vodní parou je kovově lesklé a bezoxidové povrchy. Řezný proces na bázi kapaliny zabraňuje nitridaci řezných hran. V porovnání se vzduchovou plazmou jsou řezy čisté a nepotřebují dodatečnou mechanickou úpravu. Nebezpečí tvorby pórů při následných svařovacích pracích je znatelně sníženo.

Plazmové zařízení TransCut 300 je přístroj, který je nejlehčí v své třídě a díky tomu je velice mobilní. Díky stabilizaci vodní parou se obejde bez stlačeného vzduchu a postačí přípojka 230 V. Je šetrný k životnímu prostředí díky snížení emisí závažných a škodlivých látek.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. DVOŘÁK, M. a kol. Technologie II, 2vyd. CERM Brno, 7/2004, 237s. ISBN 80-214-2683-7
2. BLAŠČÍK, F. a kol. Technológia tvárnenia, zlievárenstva a zvarovania, 1vyd. ALFA Bratislava 1988, 830s. ISBN 063-563-87
3. KOLEKTIV AUTORŮ. Materiály a jejich svařitelnost, 1vyd. Zeross, Ostrava 2001, 292s. ISBN 80-85771-85-3
4. KOLEKTIV AUTORŮ. Technologie svařování a zařízení, 1vyd. Zeross, Ostrava 2001, 395s. ISBN 80-85771-81-0
5. KOLEKTIV AUTORŮ. Navrhování a posuzování svařovaných konstrukcí a tlakových zařízení, 1vyd. Zeross, Ostrava 1999, 249s. ISBN 80-85771-70-5
6. KOLEKTIV AUTORŮ. Výroba a aplikované inženýrství ve svařování, 1vyd. Zeross, Ostrava 2000, 214s. ISBN 80-85771-72-1
7. MATĚJKA, D. A BANKO, B. Plazmové striekanie kovových a keramických práškov, 1vyd. SNP, Banská Bystrica 1988, 272s. ISBN 063-062-87
8. PLAZMOVÝ ŘEZACÍ SYSTÉM TRANSCUT 300 - Plazmové řezání s kapalným řezacím médiem © Fronius 02/2006
9. HEINRICH, M. Svět svaru – Plazmové řezání 3/2006, 32s.
10. LEINVEBER, J. ŘASA, J. VÁVRA, P. Strojnické tabulky, 3vyd. Scientia s.r.o, Praha 1999, 985s. ISBN 80-7183-164-6
11. Lega-Inox, Creusabero 4800, 6s 2008
12. FRONIUS s.r.o. Praha 10 [online cit. dn26.5.2009] Dostupné na World wide web: http://www.fronius.com/cps/rde/xchg/SID-06B415A3-EFEA286B/fronius_ceska_republika/hs.xsl/29_5778.htm
13. HYPERTHERM Inc. Hanover USA [online cit. dn26.5.2009] Dostupné na World wide web: http://www.hypertherm.com/en/Information_Center/What_is_Plasma/what_is_plasma.jsp

14. NEREZOVÉ MATERIÁLY s.r.o. Kunovice, [online cit. dn26.5.2009]

Dostupné na World wide web: <http://www.nerezove-materialy.cz/katalog.pdf>

15. MM Průmyslové spektrum Praha 10, [online cit. dn26.5.2009] Dostupné na

World wide web: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nove-technologie-obloukoveho-svarovani-a-deleni-plazmou>

16. PLAZMA CZ s.r.o. Tábor, [online cit. dn26.5.2009] Dostupné na World

wide web: <http://www.plazmacz.cz/prednosti.htm>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
(g)		Gas-plný stav hmoty
(s)		Solid-pevný stav hmoty
A	%	Tažnost
ČOV		Čistička odpadních vod
e ₁ , e ₂		elektrony
E ₁ , E ₂		Energie elektronů
HD		HD Hy Definition plazma představuje poslední vývojový stupeň plazmového řezání.
KCU3	J.cm ²	Vrubová houževnatost
KCV -20°C	J.cm ⁻²	Vrubová houževnatost
OES		Optická emisní spektrometrie
Re	MPa	Mez pevnosti v kluzu
Rm	MPa	Mez pevnosti v tahu
SW		Software-Programové vybavení
TC		TransCut 300
TIG		Tungsten Inert Gas Welding, Svařování v ochranné atmosféře
TOO		Tepelně ovlivněná oblast
Trip		Transformation Induced by Plasticity
Udn	eV	Energie disociace
U _i		Kinetická energie
v	m.s ⁻¹	Rychlost tělesa
VZ		Vzduchová plazma